

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
UEN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
DIRECCIÓN INVESTIGACIÓN APLICADA



INFORME DE AVANCE FASE IV: RECOMENDACIONES PARA LA CONCEPTUALIZACIÓN
Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA GESTIÓN DE LODOS EN SISTEMAS DE
FILTRACIÓN RÁPIDA PARA REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y COLOR
CASO DE ESTUDIO: PLANTA POTABILIZADORA DE CARTAGO

CÓDIGO I.A.: 2017-IA-008

ELABORADO POR: RODOLFO ARAYA ÁLVAREZ

REVISADO POR: ANDRÉS LAZO PÁEZ

MARZO, 2019



**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
-05107

Firma: _____



Contenido

1. Introducción	3
2. Objetivo General	3
3. Objetivos Específicos	3
4. Metodología	4
5. Resultados obtenidos	4
5.1. Estimación de la cantidad y calidad de los lodos residuales generados en la Planta Potabilizadora de Cartago	4
5.1.1 Sedimentadores	5
5.1.2 Limpieza de filtros	8
5.2 Propuesta de procesos y operaciones para la gestión de lodos residuales	8
5.2.1 I Iteración	11
5.2.1.1 Lodos generados por limpieza de filtros	11
5.2.1.1.1 Ecuador de lodos de limpieza de filtros	11
5.2.1.1.2 Clarificación de lodos de limpieza de filtros	11
5.2.1.2 Lodos generados por la purga de los sedimentadores	13
5.2.1.2.1 Ecuador de lodos de purga de sedimentadores	13
5.2.1.2.2 Espesado de lodos de purga de sedimentadores	13
5.2.1.3 Proceso de deshidratado de lodos	15
5.2.1.3.1 Ecuación de lodos	15
5.2.1.3.2 Deshidratado mecanizado	15
5.2.1.3.2.1 Acondicionamiento químico	16
5.2.1.3.2.2 Deshidratado mecanizado	17
5.2.2 II Iteración	20
5.2.2.1 Lodos generados por limpieza de filtros	20
5.2.2.1.1 Ecuador de lodos de limpieza de filtros	20
5.2.2.1.2 Clarificación de lodos de limpieza de filtros	20
5.2.2.2 Lodos generados por la purga de los sedimentadores	22
5.2.2.2.1 Ecuador de lodos de purga de sedimentadores	22
5.2.2.2.2 Espesado de lodos de purga de sedimentadores	23
5.2.2.3 Proceso de deshidratado de lodos	25
5.2.2.3.1 Ecuación de lodos	25
5.2.2.3.2 Deshidratado mecanizado	25
5.2.2.3.2.1 Acondicionamiento químico	25
5.2.2.3.2.2 Deshidratado mecanizado	26



5.3 Estimación preliminar de costos de inversión	31
5.4 Estimación preliminar de los costos de operación del sistema de gestión de lodos	34
5.5 Consideraciones de mejoras para sistemas de potabilización respecto al tema de extracción de lodos	35
5.6 Pago de canon ambiental	37
5.7 Estimación del área requerida para el proyecto	39
5.8 Estimación preliminar de área en caso de usar lechos de secado	42
5.9 Consideraciones para disposición final de sólidos	42
6. Conclusiones	44
7. Recomendaciones	46
8. Bibliografía	49
Anexo 1. Memoria de Cálculo del Proyecto	50



1. Introducción

Por medio de los resultados obtenidos en las Fases I, II y III de este proyecto, se puede indicar de forma general, que se realizaron y se obtuvieron los siguientes trabajos y resultados:

1. Identificación de literatura o bibliografía referente a la gestión de lodos en plantas potabilizadoras.
2. Identificación de las regulaciones nacionales referidas al tema de estudio.
3. Identificación de las operaciones y procesos de una planta potabilizadora (PPot) que generan residuos o lodos residuales.
4. Identificación y comprensión de la situación actual de la gestión de lodos en algunas plantas potabilizadoras de AyA.
5. Caracterización referida a perfil de sólidos y parámetros físico-químicos de los lodos generados en el proceso de potabilización.
6. Caracterización básica de la sedimentabilidad de los lodos residuales generados en el proceso de potabilización.
7. Evaluación de metodologías para la deshidratación de lodos, lo anterior mediante el acondicionamiento por medio de polímeros y deshidratado mecanizado de los lodos. Este aspecto se realizó a través de una contratación (2018CDS-00060-PRI).

Este documento pretende ser una guía para los diseñadores y operadores de plantas potabilizadoras con el fin de poder orientarlos respecto a los procesos y operaciones unitarias utilizadas en la gestión de lodos de plantas potabilizadoras. Es importante resaltar que este documento pretende solamente orientar al personal mencionado en los aspectos detallados y es responsabilidad del diseñador de cada sistema, el adecuado uso del mismo y la correcta conceptualización y dimensionamiento de los sistemas de gestión de residuos en las plantas potabilizadoras.

2. Objetivo General

Identificar las operaciones y procesos unitarios mínimos que deben ser considerados por el diseñador en la concepción de un sistema para la gestión de lodos en plantas potabilizadoras; así como recomendar rangos para los parámetros de diseño sanitario.

3. Objetivos Específicos

1. Identificar los procesos de potabilización que generan lodos residuales.
2. Identificar las características y estimar las cantidades de los lodos residuales generados en la Planta Potabilizadora de Tres Ríos y de Cartago.
3. Identificar las operaciones y procesos unitarios recomendados para la gestión de los residuos mencionados.



4. Asignar parámetros de diseño sanitario para las operaciones y procesos indicados.
5. Realizar un dimensionamiento sanitario preliminar (prediseño) de las operaciones y procesos recomendados para la gestión de lodos de la planta potabilizadora indicada.
6. Identificar oportunidades de mejora para la extracción de lodos de los sedimentadores de la planta potabilizadora mencionada.
7. Estimar los costos asociados a las mejoras indicadas en los apartados anteriores.
8. Identificar los recursos humanos y económicos necesarios para la operación y mantenimiento del sistema para la gestión de lodos mencionado.
9. Realizar un análisis costo-beneficio de implementar las mejoras indicadas con respecto al pago del canon por vertido.

4. Metodología

Con la información obtenida en las Fases I, II y III de este proyecto de investigación, se procederá a definir para la Planta Potabilizadora de Cartago, las cantidades y calidades de los lodos residuales producidos y las operaciones que los generan. Una vez caracterizados los residuos, se definirán los procesos y operaciones unitarias mínimas recomendadas para la correcta gestión de los lodos residuales generados en la potabilización del agua.

Después de que se encuentren definidos los procesos y operaciones mencionadas, se procederá a establecer y justificar los parámetros sanitarios de diseño de los mismos, para lograr el objetivo planteado. Con esta información, se realizará un dimensionamiento sanitario preliminar de las mismas y una estimación preliminar de costos. Adicionalmente, se presentarán las recomendaciones sobre aspectos de mejora para la evacuación de los lodos residuales de la PPot y una estimación de los costos asociados a estas mejoras.

Se realizará una estimación de los recursos humanos y de costos de operación y mantenimiento (O&M) requeridos para una correcta operación del sistema para la gestión de lodos.

Finalmente, se realizará un análisis costo beneficio que valore los costos de capital y de O&M del sistema de gestión de lodos versus el costo en el que se incurriría si se pagara el canon por vertido de esos lodos.

5. Resultados obtenidos

La planta potabilizadora de Cartago, trata más de 300 L/s y posee 3 módulos principales; cada uno de ellos se encuentra compuesto de los procesos de floculación, un sedimentador laminar y dos filtros rápidos.

5.1. Estimación de la cantidad y calidad de los lodos residuales generados en la Planta Potabilizadora de Cartago

Para el desarrollo de esta sección, se establecen las siguientes consideraciones:



1. Las operaciones que generan lodos residuales en el proceso de potabilización, son los sedimentadores y los filtros.
2. Los lodos que se generan en los floculadores son arrastrados hacia los sedimentadores, por lo que se disponen en la purga de los sedimentadores.
3. Se realizan purgas constantes de los sedimentadores, con el fin de mantener la turbiedad del sobrenadante de los sedimentadores (agua que va a hacia los filtros) con valores cercanos a 1 UNT. Estas purgas son los lodos de los sedimentadores y floculadores a tratar y se hacen para cada unidad, con una frecuencia que se determina por los operadores y la calidad del agua a tratar.
4. La cantidad de lodo de purga de los sedimentadores se estima como la capacidad de la tolva de los sedimentadores y a través de un balance de masa. Se asume que cada tolva recibe un aporte igual de lodos. Los valores obtenidos permiten al diseñador tener una idea de la cantidad de lodos generados en estos procesos y a tratar.
5. El lavado de los filtros se realiza con la frecuencia indicada por los actuales operadores de la planta potabilizadora. Para las estimaciones desarrolladas, se utiliza una frecuencia de 16 horas entre lavado de cada filtro, la cual es la realizada por los operadores con condiciones de mala calidad del agua.
6. No se realiza el dimensionamiento del sistema de gestión de lodos residuales para el caso de vaciado completo y lavado de sedimentadores; lo anterior, pues los volúmenes de agua y lodo generados son superiores al volumen total de los sedimentadores. El adecuado manejo o adecuada gestión de esta actividad, requiere de cambios operativos profundos que se deben discutir en conjunto con futuras mejoras a los sistemas de gestión de lodos residuales.

5.1.1 Sedimentadores

Los sedimentadores de la planta potabilizadora de Cartago acumulan en tolvas, los contaminantes removidos del agua; formando lodos residuales. Estos lodos, son extraídos del sedimentador a través de purgas y llevados a un canal de recolección de lodos. Cada sedimentador cuenta con 4 tolvas de forma piramidal invertida donde se recolectan los lodos. En la siguiente figura se presenta un detalle en planta de los sedimentadores 1 y 2 de la PPot de Cartago.

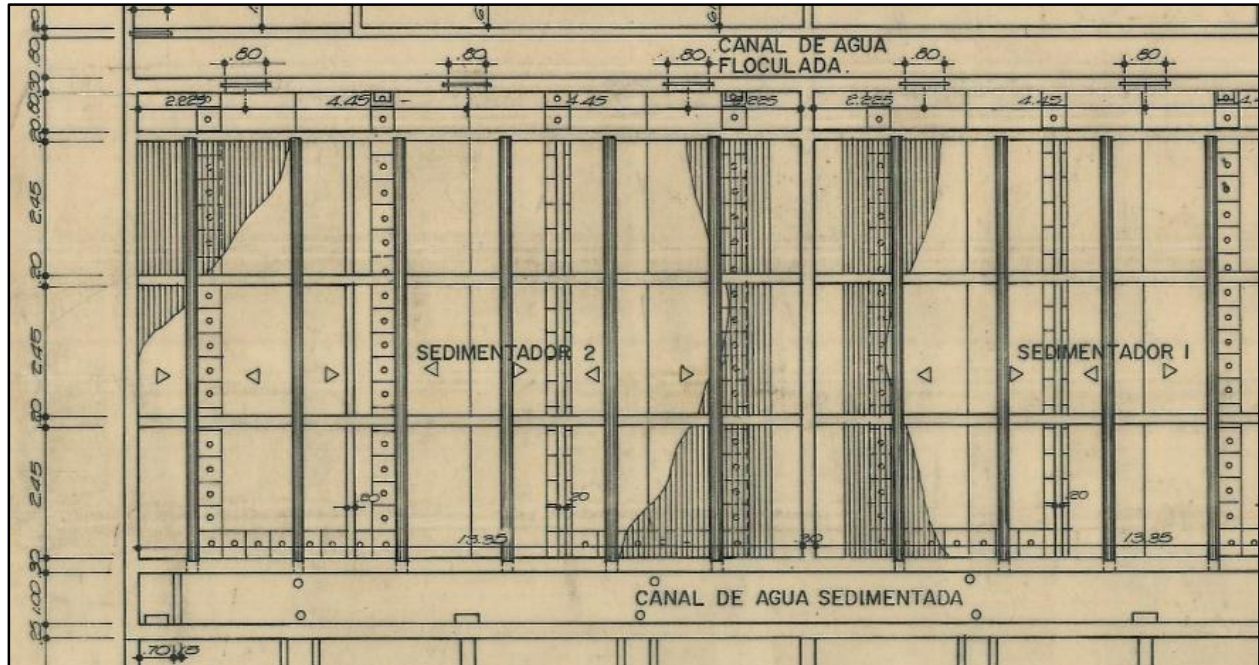


Figura 1 Sedimentador 1 y 2 de PPot de Cartago

Como se mencionó anteriormente, la determinación del volumen de lodo recolectado en los sedimentadores se determinará de dos maneras. La primera asume que las tolvas del sedimentador se encuentran llenas en su totalidad. Para determinar el volumen mencionado, se procede a estimar el área de la tolva y posteriormente su volumen. En la siguiente figura, se presenta un detalle de la geometría de la tolva.

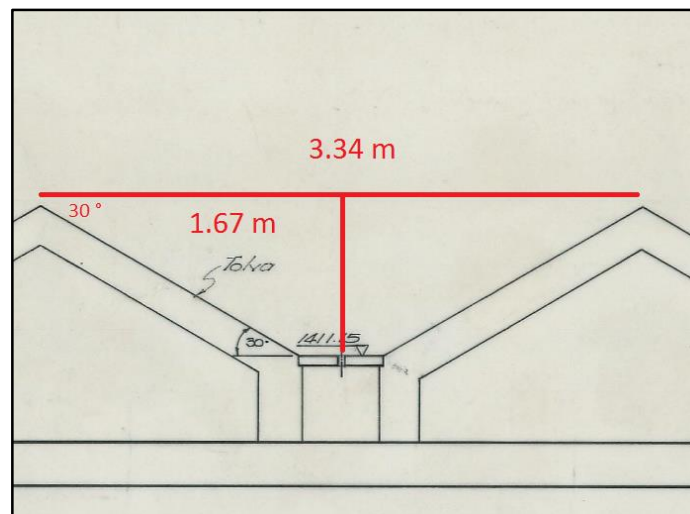


Figura 2 Sección transversal de cada una de las tolvas del sedimentador.

En el siguiente cuadro, se presentan las características y dimensiones generales de cada sedimentador.

Cuadro 1 Características generales de los sedimentadores de la PPot de Cartago

Parámetro	Valor
Cantidad de módulos en la planta, #mod	3
Cantidad de módulos por purga	1
Tolvas por módulo	4
Longitud del módulo (m)	13.35
Ancho del módulo (m)	7.75
Relación base/tolva (m)	3.34

Con las características indicadas en la Figura 2 y las que se presentan en el cuadro 1, se procede a determinar el volumen de las tolvas del sedimentador. Se utiliza un factor de seguridad para la estimación de 1.5, con lo que se obtiene un volumen de lodo generado al día de 74.8 m³; los cálculos de este volumen se presentan en la memoria de cálculo que se encuentra en el anexo, en el cuadro que se llama: Volumen de la tolva del sedimentador.

Adicionalmente, se procede a estimar la cantidad de lodos que se generan en el sedimentador, mediante un balance de masas. Para realizar la estimación indicada, se utiliza como guía el documento elaborado por Conagua (2007), datos proporcionados por el área operativa y análisis realizados por el área de Investigación Aplicada de la UEN ID y previamente documentados en informes anteriores. Del balance de masa obtenido, se obtiene un caudal de lodo de purga del sedimentador de 75 m³/día; valor muy similar al generado por la capacidad de la tolva del sedimentador con el factor de seguridad mencionado. El detalle de los cálculos, se encuentra en el cuadro denominado: Volumen de lodos generados por sedimentador - Balance Masa, de la memoria de cálculo que se presenta en el anexo de este documento.

Respecto a la calidad de los lodos acumulados en el sedimentador, para el Informe Fase II B de esta investigación, se caracterizó una muestra compuesta tomada de la Planta Potabilizadora de Cartago y se obtuvieron los resultados que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 2 Caracterización de muestra compuesta de lodo de purga del sedimentador. PPot Cartago.

Parámetro	Valor	Límite*	Límite**	Conagua (2007)
Potencial de hidrógeno, pH (-)	6.7	6 - 9	5 - 9	6 - 8
Sólidos totales, ST (mg/l)	5 260	----	----	1 000 - 40 000
Sólidos disueltos, SD (mg/l)	528	----	----	----
Sólidos suspendidos totales, SST (mg/l)	4 732	300	50	1 000 - 40 000
Sólidos suspendidos sedimentables, SSed (ml/l)	650	5	1	----
Demanda química de oxígeno, DQO (mg/l)	1 535	750	150	30 a 5 000
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO (mg/l)	16	300	50	30 a 300
Grasas y aceites, G&A (mg/l)	10	50	30	----
Sustancias activas al azul de metileno, SAAM (mg/l)	< 0,05	5	5	----

*Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, DE 33601-MINAE-S. Límite para vertido en alcantarillado sanitario.

**Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, DE 33601-MINAE-S. Límite para vertido en cuerpo receptor.

Como puede observarse, según el análisis de calidad de agua residual realizado, no se cumplen con el decreto 33601-MINAE-S para vertido a alcantarillado sanitario y cuerpo receptor, los parámetros de Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Sedimentables y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Si se comparan los valores obtenidos con los que se presentan en la literatura (Conagua, 2007) para lodos que se producen en plantas potabilizadoras que utilizan sulfato de aluminio como coagulante, la mayoría de los parámetros se encuentran dentro de lo esperado por la literatura, como puede verse en el cuadro anterior.

5.1.2 Limpieza de filtros

La limpieza de los filtros, se realiza al existir una pérdida de carga determinada y su frecuencia depende de la calidad del agua efluente de los sedimentadores y afluente a los filtros. Según se conversó con los operadores de la PPot de Cartago, cuando las condiciones del agua son difíciles, el lavado de los filtros se realiza con una frecuencia de cada 16 horas, parámetro que será utilizado para el dimensionamiento preliminar realizado. Adicionalmente, se indicó que la duración de esta operación es de aproximadamente 5 minutos y que no se realiza un enjuague de los filtros.

Con estos y otros datos utilizados, se realiza la estimación de los volúmenes de aguas de retrolavado generadas por día en la PPot. Se obtiene que, para cada limpieza de filtro, se generan 88.7 m³ de residuos, los cuales representan aproximadamente 799 m³ de agua residual por día. Los cálculos realizados para estas estimaciones se encuentran en la memoria de cálculo indicada en el cuadro denominado: Limpieza de filtros - retrolavados.

Con respecto a la calidad de las aguas residuales generadas por el proceso de limpieza de los filtros, según el Informe Fase II B de esta investigación, las características generales se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 3 Calidad de las aguas de retrolavado

Parámetro	Valor
Sólidos totales, ST (mg/l)	423
Sólidos disueltos, SD (mg/l)	107
Sólidos suspendidos totales, SST (mg/l)	316

Como se puede observar, el parámetro de Sólidos Suspendidos Totales (SST) incumple el Decreto 33601-MINAE-S tanto para vertido en alcantarillado sanitario como para vertido en cuerpo receptor.

5.2 Propuesta de procesos y operaciones para la gestión de lodos residuales

Para la propuesta de procesos para la gestión de los lodos y aguas residuales producidos por las purgas de los sedimentadores y la limpieza de los filtros, se utilizarán los datos y resultados obtenidos y expuestos en los apartados anteriores y los resultados generados con la contratación 2018CDS-00060-PRI "Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales en plantas potabilizadoras".



La propuesta para la gestión de los lodos residuales que se presenta en este documento, incluye las siguientes operaciones y procesos:

1. Ecuación
2. Espesado a gravedad y clarificación
3. Acondicionamiento del lodo
4. Deshidratado

Debido a que las cantidades y calidades de lodos producidos en las purgas de los sedimentadores difieren sustancialmente de las producidas en la limpieza de los filtros, no se recomienda mezclar ambos residuos; por lo que se gestionan inicialmente en líneas separadas (Conagua, 2007). La propuesta planteada, incluye las operaciones y procesos que se presentan en la siguiente figura.

Para realizar el dimensionamiento preliminar del sistema de gestión de lodos residuales de la planta potabilizadora, se debieron realizar dos iteraciones de cálculos. Es decir, se realizó una primera iteración que permite estimar las dimensiones iniciales y los flujos entre operaciones y procesos. La segunda iteración, se realiza basada en los datos obtenidos de la primera iteración, lo anterior para ajustar dimensiones y verificar flujos y el balance de masa general. En los siguientes apartados se presentan los principales resultados obtenidos de las interacciones mencionadas.

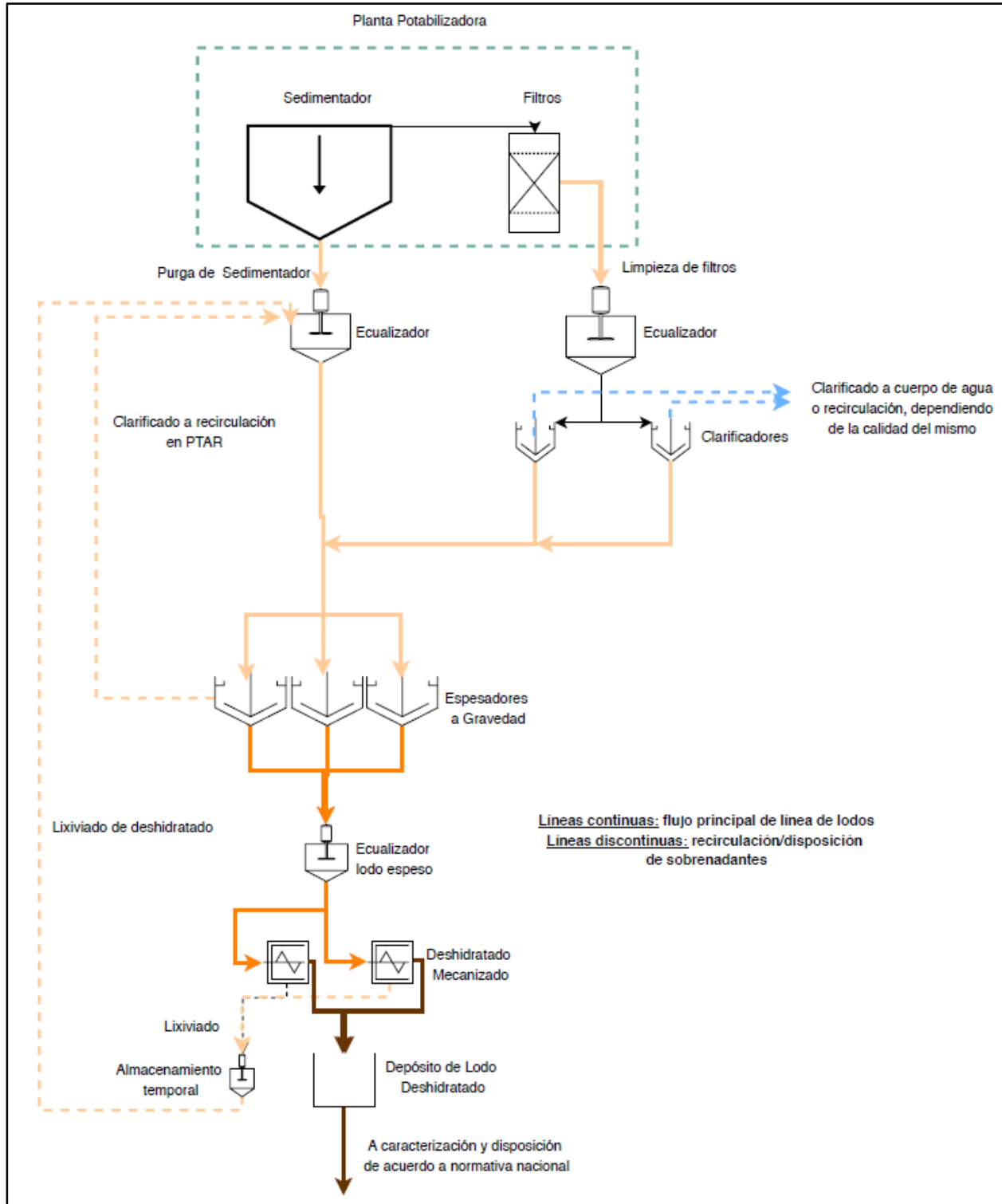


Figura 3 Propuesta de procesos para la gestión de lodos en la Planta Potabilizadora de Cartago.

5.2.1 Iteración

5.2.1.1 Lodos generados por limpieza de filtros

En la sección 5.1.2 Limpieza de filtros, se presentan los caudales y volúmenes generados por la limpieza de los filtros, también se muestra una caracterización básica de los mismos. Para la correcta gestión de estos residuos, se propone utilizar un tanque de ecualización y posteriormente dos clarificadores de los lodos generados.

El ecualizador tiene como fin servir de almacenamiento temporal de las aguas residuales, para amortiguar los flujos de este residuo hacia los siguientes procesos, para el adecuado dimensionamiento de las operaciones y equipos subsiguientes. Los clarificadores se proponen para reducir el contenido de agua en el lodo y por ende su volumen; lo que mejora la eficiencia de las etapas posteriores.

5.2.1.1.1 Ecualizador de lodos de limpieza de filtros

Para estimar el volumen del tanque de ecualización, se utiliza la metodología presentada en Tchobanoglous, (2005); el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Ecualización de Lodo de limpieza de filtros.

De los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de ecualización de aproximadamente 173 m³.

5.2.1.1.2 Clarificación de lodos de limpieza de filtros

Para el dimensionamiento preliminar de los clarificadores propuestos 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 es de aproximadamente: 316 mg/L (Informe de Avance para Fase II: Muestras para determinación de cantidad y calidad de lodos residuales generados. Investigación Aplicada - AyA, 2018).
2. La salida de lodo espeso del clarificador es de 0.5%.
3. La carga de sólidos a aplicar al espesador es de 14 kgMS/m²*día (Pruebas realizadas: de velocidad de sedimentación).

De los cálculos realizados, se obtiene que se requieren de dos clarificadores, que deben funcionar 24 horas al día, con las características básicas que se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 4 Dimensiones preliminares de los clarificadores

Parámetro	Valor
Número de clarificadores	2
Área superficial/clarificador (m ²)	16.0
Sección	Circular
Diámetro (m)	4.5
Altura útil de clarificador (m)	3.5
Volumen de cada clarificador (m ³)	56



Los valores que se presentan en el cuadro anterior, se obtienen de aplicar la tasa o carga de sólidos mencionada y seguidamente, se revisan las dimensiones con respecto al criterio de tasa hidráulica de carga superficial, que según von Sperling (2007) se recomienda se encuentre entre 20 a 30 $m^3/m^2 \cdot d$; se toma para el pre-dimensionamiento un valor de 25 $m^3/m^2 \cdot d$ y se obtienen los valores presentados. Se revisa que el tiempo de retención hidráulico sea menor a 24 horas (von Sperling, 2007).

Se sugiere al diseñador considerar las siguientes recomendaciones:

1. El diseño más común de espesadores a gravedad consiste en un tanque circular (CONAGUA, 2007; Andreoli, 2007), alimentados en el centro, con equipos para remoción del lodo en el fondo del tanque y remoción del sobrenadante a través de su perímetro. La profundidad de pared mojada varía entre 3 a 4 metros (CONAGUA, 2007).
2. Pendiente del piso, normalmente entre 2:12 a 3:12, es mayor que la de los sedimentadores. (CONAGUA, 2007).
3. 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.
4. El dimensionamiento del tanque puede llevarse a cabo mediante la tasa (carga) de aplicación de sólidos y la tasa hidráulica superficial.
5. Se debe considerar dejar previsto el uso de polímeros o productos químicos que ayuden en el espesado de los sólidos de las aguas de los retrolavados.

Del balance de masa para cada clarificador, se obtienen los resultados que se presentan en el siguiente cuadro, de los cuales el valor de [SST]a se obtiene de análisis realizados y el de [SST]e y [SST]p son un estimado basado en experiencia operativa.

Cuadro 5 Balance de masa para cada clarificador

Parámetro	Valor
Caudal afluente, Q_a (m^3/d)	399.3
Sólidos suspendidos afluente, [SST]a (mg/L)	316
Caudal efluente, Q_e (m^3/d)	376.3
Sólidos suspendidos efluente, [SST]e (mg/L)	30
Caudal de purga, Q_p (m^3/d)	23.0
Sólidos suspendidos purga, [SST]p (mg/L)	5 000
Lodo seco afluente (kg/d), L_a	126
Lodo seco efluente (kg/d), L_e	11
Lodo seco purga (kg/d), L_p	115

El caudal de agua clarificada, debe caracterizarse (calidad físico química como microbiológica) para poder evaluar las siguientes alternativas:

1. Tratamiento y recirculación a cabecera de planta potabilizadora.
2. Vertido a cuerpo de agua receptor.

3. Tratamiento posterior y vertido a cuerpo de agua.
4. Reuso.
5. Recirculación a planta de tratamiento de aguas residuales (lodos de potabilización).

El caudal de purga obtenido, con la concentración de sólidos suspendidos totales estimada, se enviará a los espesadores a gravedad que se muestran en la figura 3.

5.2.1.2 Lodos generados por la purga de los sedimentadores

En la sección 5.1.1 Sedimentadores, se presentan los caudales y volúmenes generados en la purga de los sedimentadores. Además, se muestra una caracterización básica de los mismos. Para la correcta gestión de estos residuos, se propone utilizar un tanque de ecualización y posteriormente tres espesadores a gravedad.

El ecualizador tiene como fin, servir de almacenamiento temporal de los lodos residuales, para amortiguar (disminuir) los flujos de este residuo hacia los siguientes procesos, para el adecuado dimensionamiento de las operaciones y equipos subsiguientes. Los espesadores a gravedad se proponen para reducir el contenido de agua en el lodo y por ende su volumen; lo que mejora la eficiencia de las etapas posteriores.

5.2.1.2.1 Ecualizador de lodos de purga de sedimentadores

Para estimar el volumen del tanque de ecualización, se utiliza la metodología presentada por Tchobanoglous, (2005); el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Ecualización de lodos de purga de sedimentadores.

De los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de ecualización de aproximadamente 90 m³. Para una altura de 3.5 m se obtiene un diámetro del tanque de ecualización de 5.7 m.

5.2.1.2.2 Espesado de lodos de purga de sedimentadores

Para el dimensionamiento preliminar de los espesadores a gravedad propuestos 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 (ver figura 3), se utilizan las siguientes consideraciones:

1. Se utilizarán tres espesadores para el manejo de los lodos obtenidos del sedimentador.
2. La concentración de SST a la entrada del espesador se obtiene de un balance de masa, del cual se reciben purgas del clarificador de retrolavados y el lodo del homogenizador de purga de los sedimentadores.
3. La salida de lodo espeso se estima sea de aproximadamente 3%.
4. La carga de sólidos a aplicar al espesador es de 19.6 kg MS/m²*día (Pruebas realizadas: de velocidad de sedimentación).



5. Se deja previsto a la entrada del espesador, un sistema de preparación y dosificación de coagulante y floculante. Según las pruebas realizadas y documentadas en el Informe Fase #3, Informe Final: “Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales en plantas potabilizadoras” (2018CDS-00060-PRI), se recomienda el uso de dos productos:
 - a. Como coagulante, CQPAC 01: Solución de Clorhidróxido de Aluminio al 50%. Dosis de espesamiento: 2.24 kg CQPAC01/Ton MS
 - b. Como floculante, Chemifloc AN270S: Poliacrilamida. Polielectrolito Aniónico. Dosis de espesamiento: 1.12 kg Chemifloc AN270S/Ton MS

De los cálculos realizados, se obtiene que se requieren de tres espesadores a gravedad, que deben funcionar 24 horas al día, con las características básicas que se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 6 Dimensiones preliminares de los espesadores.

Parámetro	Valor
Número de espesadores	3
Área superficial/espesador (m ²)	21.9
Sección	Circular
Diámetro (m)	5.3
Altura de espesador (m)	3.5
Volumen de cada espesador (m ³)	76.7

Se revisa la tasa hidráulica de carga superficial de cada espesador a gravedad, se obtiene un valor de 4.1 m³/m²*d y se compara con el rango establecido por Conagua (2007) para estos lodos, el cual es de 4 a 8 m³/m²*d. Adicionalmente, se verifica que el tiempo de retención hidráulico de cada espesador sea menor a 24 horas, lo cual también se cumple.

Se sugiere al diseñador considerar las siguientes recomendaciones:

1. 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.
2. La profundidad de pared mojada varía entre 3 a 4 metros (CONAGUA, 2007).
3. Pendiente del piso, normalmente entre 2:12 a 3:12, es mayor que la de los sedimentadores (CONAGUA, 2007).
4. 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.
5. El dimensionamiento del tanque puede llevarse a cabo mediante la tasa (carga) de aplicación de sólidos y la tasa hidráulica superficial.
6. Se debe considerar dejar previsto el uso de polímeros o productos químicos que ayuden en el espesado de los sólidos de los lodos.

Del balance de masa para cada espesador, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 7 Balance de masa para cada espesador a gravedad.

Parámetro	Valor
Caudal afluente, Q_a (m^3/d)	90.4
Sólidos suspendidos afluente, $[SST]_a$ (mg/L)	4 751
Caudal efluente, Q_e (m^3/d)	76.2
Sólidos suspendidos efluente, $[SST]_e$ (mg/L)	50
Caudal de purga, Q_p (m^3/d)	14.2
Sólidos suspendidos purga, $[SST]_p$ (mg/L)	30 000
Lodo seco afluente (kg/d), L_a	429
Lodo seco efluente (kg/d), L_e	4
Lodo seco purga (kg/d), L_p	425

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 (lodos residuales, ver figura 3). El caudal de purga obtenido, con la concentración de sólidos suspendidos totales estimada, se enviará al proceso de deshidratación de lodos que se muestran en la figura 3.

5.2.1.3 Proceso de deshidratado de lodos

Para el deshidratado de lodos, se propone contar con un tanque de equalización o tampón de lodo espeso, para almacenar temporalmente los lodos espesos. Esto permite amortiguar los flujos de lodo a los equipos de deshidratado para el adecuado dimensionamiento de los mismos.

5.2.1.3.1 Ecuación de lodos

Para estimar el volumen del tanque de equalización, se utiliza la metodología presentada por Tchobanoglous (2005); el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Ecuación de lodo espeso.

De los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de equalización de aproximadamente $33 m^3$.

5.2.1.3.2 Deshidratado mecanizado

Según los resultados de la contratación 2018CDS-00060-PRI, “Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales de plantas potabilizadoras”, el deshidratado mecanizado debe contar con al menos los siguientes procesos:

1. Acondicionamiento químico del lodo
2. Deshidratado mecanizado

El propósito del acondicionamiento químico del lodo es el de facilitar la liberación y separación del agua en los equipos de deshidratación. Igualmente, modificar la estructura física del lodo, para facilitar su manejo y disposición final (Berzosa, M. 2018).

5.2.1.3.2.1 Acondicionamiento químico

De las pruebas realizadas para la contratación mencionada (ver informes I, II y III del contrato), se obtiene que el polímero que genera el mejor desempeño al menor costo posible para el lodo evaluado, es un floculante aniónico con las propiedades que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 8 Características del polímero para acondicionamiento.

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

Es importante destacar, que la selección de los productos químicos para acondicionamiento de las aguas y los lodos de plantas potabilizadoras, requiere de una caracterización detallada de estos mismos y de pruebas de desempeño de los productos químicos, 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. Para el caso de estudio, la caracterización de los lodos se detalla en:

1. Informe Fase II (Gestión de Lodos en Sistemas de Filtración Rápida para Remoción de Turbiedad y Color. Caso de Estudio: Planta Potabilizadora de Cartago).
2. Apartado 5.1 de este informe.

En los documentos generados en la contratación 2018CDS-000060-PRI se presentan las pruebas realizadas a escala laboratorio y piloto y los resultados obtenidos de las mismas.

Algunas de las recomendaciones que se desprenden de los resultados obtenidos de la contratación 2018CDS-000060-PRI, "*Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales de plantas potabilizadoras*", se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 9 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 en estudio 60 min
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.

De las pruebas realizadas, para el lodo evaluado, se obtiene una dosis de polímero para deshidratación de 1.61 kg/ton MS (Informe Fase III, 2018CDS-00060-PRI).

5.2.1.3.2.2 Deshidratado mecanizado

De las pruebas realizadas y bajo las condiciones de estudio (tipo de lodo, concentración del mismo, equipos evaluados, etc), 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.

Con los datos obtenidos en las etapas anteriores (espesado de lodo y ecualizado de lodo espeso), se procede a seleccionar dos equipos para deshidratado de lodo con las características que se presentan en el siguiente cuadro. El detalle de los equipos se encuentra en el siguiente enlace: <https://en.amcon.co.jp/specvolute/#ec>.

Cuadro 10 Características del equipo de deshidratado propuesto para el lodo espeso de la Planta Potabilizadora de Cartago

Parámetro	Valor
Dosis de polímero (kg/ton MS)	1.61
Concentración de la solución de polímero (%)	0.05
Tiempo de maduración (min)	60
Caudal de lodo (m ³ /d)	42.5
Concentración de sólidos suspendidos totales entrada, [SSTe] (mg/L)	30 000
Concentración de sólidos suspendidos totales salida, [SSTs] (%)	25
Flujo másico (kg MS/d), F	1 276
Masa del lodo (kg)	5 105
Volumen de lodo seco al 25% (L/d)	4 401
Número de equipos en funcionamiento	2
Número de equipos de respaldo	0
Capacidad de cada equipo (kg MS/h), Ce	78
Capacidad total (kg MS/h)	156
Horas de funcionamiento por día (h/d)	8.2
Largo de cada equipo (mm)	1 847
Ancho de cada equipo (mm)	1 100
Alto de cada equipo (mm)	1 705
Consumo de Energía de cada equipo (kW)	0.9
Peso vacío de cada equipo (kg)	420
Peso en operación de cada equipo (kg)	1 070

El volumen de lodo generado a 25% MS, se estima utilizando una densidad específica para el lodo deshidratado de 1.16 (von Sperling, 2007). Como puede observarse, se generan 4.4 m³ por día de lodo al 25% de masa seca (MS). Dependiendo de la frecuencia con la que se desea sean removidos de la planta de tratamiento estos lodos, se debe de proveer de un área o contenedor para almacenamiento de lodo seco. Del balance de masa para cada deshidratador, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 11 Balance de masa para cada deshidratador

Parámetro	Valor
Caudal afluente, Q_a (m^3/d)	21.3
Sólidos suspendidos afluente, $[SST]_a$ (mg/L)	30 000
Caudal lixiviado, Q_l (m^3/d)	19.3
Sólidos suspendidos lixiviado, $[SST]_l$ (mg/L)	2 900
Caudal de lodo desh , Q_d (m^3/d)	2.0
Sólidos suspendidos lodo desh, $[SST]_d$ (mg/L)	250 000
Densidad del lodo al 25% (kg/m^3)	1.16
Lodo seco afluente (kg/d), L_a	638
Lodo seco lixiviado (kg/d), L_l	56
Lodo seco deshidratado (kg/d), L_d	582

Del balance de masa que se presenta en el cuadro anterior, se puede estimar que se generan $19.3 m^3$ de lixiviado por día por cada deshidratador ($38.6 m^3$ en total), que deben ser retornados a cabecera de planta de tratamiento de lodos (pues la calidad no cumple para vertido) y $2.0 m^3$ de lodo deshidratado al 25% de Materia Seca ($4.0 m^3$ total). Este último valor de lodo deshidratado ($4 m^3$) difiere del estimado en el cuadro 10 ($4.4 m^3$), lo anterior pues en el balance de masa sí se incluye que parte del lodo (sólidos suspendidos) que entra al deshidratador sale por el lixiviado. El caudal de lixiviado, debe caracterizarse (calidad físico química como microbiológica) y se recomienda se recircule a la cabecera de la planta de tratamiento de aguas residuales (lodos residuales, ver figura 3).

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 por Tchobanoglous (2005); el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Almacenaje de Lixiviado. De los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de almacenaje de aproximadamente $31 m^3$. Este cálculo no incluye el agua de lavado de los equipos, por lo que el diseñador debe tener presente que debe gestionarse el agua de lavado de una manera adecuada.

Como se deduce de los datos anteriores, el diseñador debe considerar todos los flujos (cantidades) y calidades de los mismos para el dimensionamiento final de los procesos y equipos. En la siguiente figura, se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

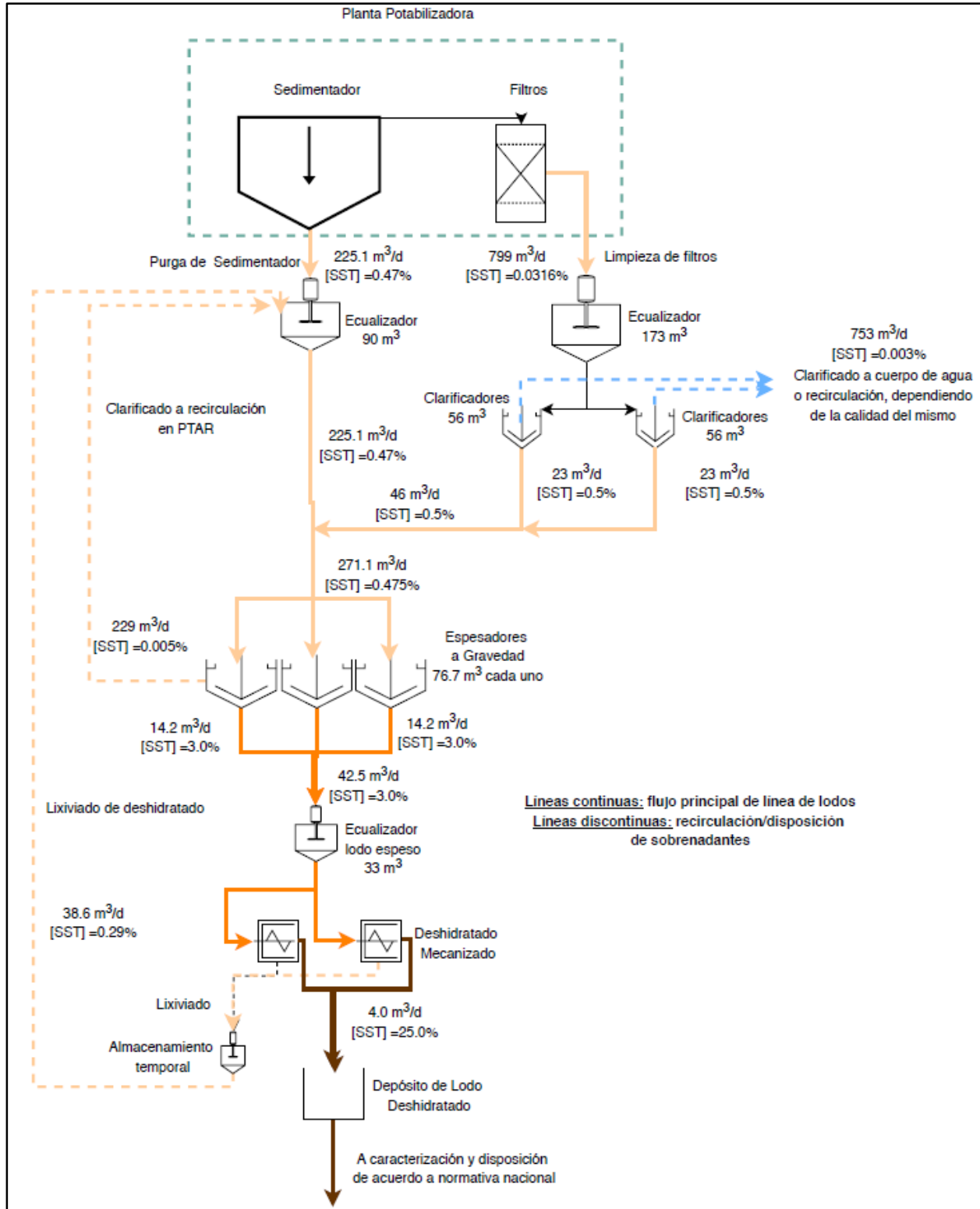


Figura 4 Esquema de funcionamiento y balance de masa para la gestión de lodos de la planta potabilizadora de Cartago (I Iteración)

5.2.2 II Iteración

Se realiza una segunda iteración de los cálculos, debido a que existen flujos que se obtienen de los balances de masa de la primera iteración que requieren algún ajuste sanitario. Por lo anterior, se vuelven a calcular algunas de las operaciones y procesos y otras se mantienen igual pues no se ven afectadas por los flujos mencionados. Para mejorar la comprensión del lector, se presentan en estas secciones todos los cálculos realizados, aún y cuando algunos no se vieron afectados por los flujos obtenidos de la I Iteración.

5.2.2.1 Lodos generados por limpieza de filtros

En la sección 5.1.2 Limpieza de filtros, se presentan los caudales y volúmenes generados por la limpieza de los filtros, además; una caracterización básica de los mismos. Para la correcta gestión de estos residuos, se propone utilizar un tanque de ecualización y posteriormente dos clarificadores de los lodos generados.

El ecualizador tiene como fin servir de almacenamiento temporal de las aguas residuales, para amortiguar (disminuir) los flujos de este residuo hacia los siguientes procesos, para el adecuado dimensionamiento de las operaciones y equipos subsiguientes. Los clarificadores se proponen para reducir el contenido de agua en el lodo y por ende su volumen; lo que mejora la eficiencia de las etapas posteriores.

5.2.2.1.1 Ecualizador de lodos de limpieza de filtros

Para estimar el volumen del tanque de ecualización, se utiliza la metodología presentada Tchobanoglous (2005); el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Ecualización de Lodo de limpieza de filtros.

De los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de ecualización de aproximadamente 173 m³. Este valor es el mismo obtenido para la Iteración I, es decir no se ve afectado por los cálculos realizados.

5.2.2.1.2 Clarificación de lodos de limpieza de filtros

Para el dimensionamiento preliminar de los clarificadores propuestos 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 es de aproximadamente: 316 mg/L (Informe de Avance para Fase II: Muestreos para determinación de cantidad y calidad de lodos residuales generados. Investigación Aplicada - AyA, 2018).
2. La salida de lodo espeso del clarificador es de 0.5%.
3. La carga de sólidos a aplicar al espesador es de 14 kgMS/m²*día (Pruebas realizadas: de velocidad de sedimentación).

De los cálculos realizados, se obtiene que se requieren de dos clarificadores, que deben funcionar 24 horas al día, con las características básicas que se presenta en el siguiente cuadro.



Cuadro 12 Dimensiones preliminares de los clarificadores

Parámetro	Valor
Número de clarificadores	2
Área superficial/clarificador (m ²)	16.0
Sección	Circular
Diámetro (m)	4.5
Altura de clarificador (m)	3.5
Volumen de cada clarificador (m ³)	56

Los valores que se presentan en el cuadro anterior, se obtienen de aplicar la tasa o carga de sólidos mencionada y seguidamente, se revisan las dimensiones con respecto al criterio de tasa hidráulica de carga superficial, que según Von Sperling (2007) se recomienda se encuentre entre 20 a 30 m³/m²*d; se toma para el pre-dimensionamiento un valor de 25 m³/m²*d y se obtienen los valores presentados. Se revisa que el tiempo de retención hidráulico sea menor a 24 horas (von Sperling, 2007).

Se sugiere al diseñador considerar las siguientes recomendaciones:

1. El diseño más común de espesadores a gravedad consiste en un tanque circular (CONAGUA, 2007; Andreoli, 2007), alimentados en el centro, con equipos para remoción del lodo en el fondo del tanque y remoción del sobrenadante a través de su perímetro. La profundidad de pared mojada varía entre 3 a 4 metros (CONAGUA, 2007).
2. Pendiente del piso, normalmente entre 2:12 a 3:12, es mayor que la de los sedimentadores. (CONAGUA, 2007).
3. 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.
4. El dimensionamiento del tanque puede llevarse a cabo mediante la tasa (carga) de aplicación de sólidos y la tasa hidráulica superficial.
5. Se debe considerar dejar previsto el uso de polímeros o productos químicos que ayuden en el espesado de los sólidos de las aguas de los retrolavados.

Los valores que se presentan en el apartado anterior, no se ven afectados por la iteración II de las estimaciones realizadas.

Del balance de masa para cada clarificador, se obtienen los resultados que se presentan en el siguiente cuadro, de los cuales el valor de [SST]_a se obtiene de análisis realizados y el de [SST]_e y [SST]_p son un estimado.

Cuadro 13 Balance de masa para cada clarificador

Parámetro	Valor
Caudal afluente, Q _a (m ³ /d)	399.3
Sólidos suspendidos afluente, [SST] _a (mg/L)	316
Caudal efluente, Q _e (m ³ /d)	376.3
Sólidos suspendidos efluente, [SST] _e (mg/L)	30



Parámetro	Valor
Caudal de purga, Q_p (m^3/d)	23.0
Sólidos suspendidos purga, $[SST]_p$ (mg/L)	5 000
Lodo seco afluente (kg/d), L_a	126
Lodo seco efluente (kg/d), L_e	11
Lodo seco purga (kg/d), L_p	115

El caudal de agua clarificada, debe caracterizarse (calidad físico química como microbiológica) para poder evaluar las siguientes alternativas:

1. Tratamiento y recirculación a cabecera de planta potabilizadora.
2. Vertido a cuerpo de agua receptor.
3. Tratamiento posterior y vertido a cuerpo de agua.
4. Reuso.
5. Recirculación a planta de tratamiento de aguas residuales (lodos de potabilización).

El caudal de purga obtenido, con la concentración de sólidos suspendidos totales estimada, se enviará a los espesadores a gravedad que se muestran en la figura 4.

5.2.2.2 Lodos generados por la purga de los sedimentadores

En la sección 5.1.1 Sedimentadores, se presentan los caudales y volúmenes generados en la purga de los sedimentadores, además; una caracterización básica de los mismos. Para la correcta gestión de estos residuos, se propone utilizar un tanque de equalización y posteriormente tres espesadores a gravedad.

El equalizador tiene como fin, servir de almacenamiento temporal de los lodos residuales, para amortiguar (disminuir) los flujos de este residuo hacia los siguientes procesos, para el adecuado dimensionamiento de las operaciones y equipos subsiguientes. Los espesadores a gravedad se proponen para reducir el contenido de agua en el lodo y por ende su volumen; lo que mejora la eficiencia de las etapas posteriores.

5.2.2.2.1 Equalizador de lodos de purga de sedimentadores

Para estimar el volumen del tanque de equalización, se utiliza la metodología presentada Tchobanoglous (2005); el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Equalización de lodos de purga de sedimentadores, en la pestaña Cálculos II Iteración.

De la figura 4, se puede observar que los flujos de lodos o aguas residuales que entran al tanque de equalización de lodos de purga del sedimentador, son los que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 14 Caracterización de flujos a ecualizador de lodos de purga

Fuente	Caudal (m ³ /día)	[SST] (mg/L)
Purga de sedimentadores	225.1	4 700
Recirculado de espesadores	228.5	50
Recirculado de lixiviados	38.5	2 900
Lodo purga de clarificadores	46.0	5 000

Del balance de masa realizado con las corrientes o flujos que se presentan en el cuadro anterior, se obtiene que del homogenizador sale un flujo de 538.1 m³/día con una concentración de [SST] igual a 2 622 mg/L.

Con estos datos y de los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de ecualización de aproximadamente 106 m³. Para una altura de 3.5 m se obtiene un diámetro del tanque de ecualización de 6.2 m.

5.2.2.2 Espesado de lodos de purga de sedimentadores

Para el dimensionamiento preliminar de los espesadores a gravedad propuestos 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 (ver figura 4), se utilizan las siguientes consideraciones:

1. Se utilizarán tres espesadores para el manejo de los lodos obtenidos del sedimentador.
2. La concentración de SST a la entrada de los espesadores es la que se obtuvo del balance de masa indicado anteriormente.
3. La salida de lodo espeso se estima sea de aproximadamente 3%.
4. La carga de sólidos a aplicar al espesador es de 21.3 kg MS/m²*día (Pruebas realizadas: de velocidad de sedimentación), misma que se obtiene de las pruebas mencionadas y una concentración de SS del lodo afluente de 4 520 mg/L. Este último valor se obtiene si no se recircula el sobrenadante de los Espesadores a Gravedad y se dispone de los mismos.
5. Se deja previsto a la entrada del espesador, un sistema de preparación y dosificación de coagulante y floculante. Según las pruebas realizadas y documentadas en el Informe Fase #3, Informe Final: “*Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales en plantas potabilizadoras*” (2018CDS-00060-PRI), se recomienda el uso de dos productos:
 - a. Como coagulante, CQPAC 01: Solución de Clorhidróxido de Aluminio al 50%. Dosis de espesamiento: 2.24 kg CQPAC01/Ton MS
 - b. Como floculante, Chemifloc AN270S: Poliacrilamida. Polielectrolito Aniónico. Dosis de espesamiento: 1.12 kg Chemifloc AN270S/Ton MS.

De los cálculos realizados, se obtiene que se requieren de tres espesadores a gravedad, que deben funcionar 24 horas al día, con las características básicas que se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 15 Dimensiones preliminares de los espesadores

Parámetro	Valor
Número de espesadores	3
Área superficial/espesador (m ²)	13.6
Sección	Circular
Diámetro (m)	5.3
Altura de espesador (m)	3.5
Volumen de cada espesador (m ³)	77.3

Se revisa la tasa hidráulica de carga superficial de cada espesador a gravedad, se obtiene un valor de 8.1 m³/m²*d y se compara con el rango establecido por Conagua (2007) para estos lodos, el cual es de 4 a 8 m³/m²*d, este valor es superior al recomendado por Conagua, pero inferior al recomendado por von Sperling (2007) que es entre 20 a 30 m³/m²*día. Adicionalmente, se verifica que el tiempo de retención hidráulico de cada espesador sea menor a 24 horas, lo cual también se cumple.

Se sugiere al diseñador considerar las siguientes recomendaciones:

1. El diseño más común de espesadores a gravedad consiste en un tanque circular (CONAGUA, 2007; von Sperling, 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.
2. La profundidad de pared mojada varía entre 3 a 4 metros (CONAGUA, 2007).
3. Pendiente del piso, normalmente entre 2:12 a 3:12, es mayor que la de los sedimentadores (CONAGUA, 2007).
4. 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.
5. El dimensionamiento del tanque puede llevarse a cabo mediante la tasa (carga) de aplicación de sólidos y la tasa hidráulica superficial.
6. Se debe considerar dejar previsto el uso de polímeros o productos químicos que ayuden en el espesado de los sólidos de los lodos.

Del balance de masa para cada espesador, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 16 Balance de masa para cada espesador a gravedad.

Parámetro	Valor
Caudal afluente, Qa (m ³ /d)	179.4
Sólidos suspendidos afluente, [SST]a (mg/L)	2 622 (4 520 sin recirc.)
Caudal efluente, Qe (m ³ /d)	76.2
Sólidos suspendidos efluente, [SST]e (mg/L)	50
Caudal de purga, Qp (m ³ /d)	15.5
Sólidos suspendidos purga, [SST]p (mg/L)	30 000
Lodo seco afluente (kg/d), La	470

Parámetro	Valor
Lodo seco efluente (kg/d), Le	4
Lodo seco purga (kg/d), Lp	466

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/lodos residuales (ver figura 4). El caudal de purga obtenido, con la concentración de sólidos suspendidos totales estimada, se enviará al proceso de deshidratación de lodos que se muestran en la figura 4.

5.2.2.3 Proceso de deshidratado de lodos

Para el deshidratado de lodos, se propone contar con un tanque de equalización 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.

5.2.2.3.1 Ecuación de lodos

Para estimar el volumen del tanque de equalización, se utiliza la metodología presentada por Tchobanoglous, (2005); el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Ecuación de lodo espeso.

De los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de equalización de aproximadamente 36 m³.

5.2.2.3.2 Deshidratado mecanizado

Según la contratación 2018CDS-00060-PRI, “Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales de plantas potabilizadoras”, el deshidratado mecanizado debe contar con al menos los siguientes procesos:

1. Acondicionamiento químico del lodo.
2. Deshidratado mecanizado.

El propósito del acondicionamiento químico del lodo es el de facilitar la liberación y separación del agua en los equipos de deshidratación. Igualmente, modificar la estructura física del lodo, para facilitar su manejo y disposición final (Berzosa, M. 2018).

5.2.2.3.2.1 Acondicionamiento químico

De las pruebas realizadas para la contratación mencionada (ver informes I, II y III del contrato), se obtiene que el polímero que genera el mejor desempeño al menor costo posible para el lodo evaluado, es un floculante aniónico con las propiedades que se presentan en el siguiente cuadro.

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 mismos y de pruebas de desempeño de los productos químicos, 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.

Cuadro 17 Características del polímero para acondicionamiento.

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

Algunas de las recomendaciones 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 18 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 en estudio 60 min.
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 válvulas de contrapresión.
Puntos de dosificación	Uso de mezclador estático, dejar varios puntos de inyección, así como toma muestras.

De las pruebas realizadas, para el lodo evaluado, se obtiene una dosis de polímero para deshidratación de 1.61 kg/ton MS (Informe Fase III, 2018CDS-00060-PRI).

5.2.2.3.2 Deshidratado mecanizado

De las pruebas realizadas y bajo las condiciones de estudio (tipo de lodo, concentración del mismo, equipos evaluados, etc), 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.

Con los datos obtenidos en las etapas anteriores (espesado de lodo y ecualizado de lodo espeso), se procede a seleccionar dos equipos para deshidratado de lodo con las características que se presentan en el siguiente cuadro. El detalle del equipos se encuentra en el enlace: <https://en.amcon.co.jp/specvolute/#ec>.

Cuadro 19 Características del equipo de deshidratado.

Parámetro	Valor
Dosis de polímero (kg/ton MS)	1.61
Concentración de la solución de polímero (%)	0.05
Tiempo de maduración (min)	60
Caudal de lodo (m ³ /d)	46.6
Concentración de sólidos suspendidos totales entrada[SSTe] (mg/L)	30 000
Concentración de sólidos suspendidos totales salida [SSTs] (%)	25
Flujo másico (kg MS/d), F	1 399
Masa del lodo (kg)	5 598
Volumen de lodo seco al 25% (L/d)	4 826
Número de equipos en funcionamiento	2
Número de equipos de respaldo	0
Capacidad de cada equipo (kg MS/h), Ce	78
Capacidad total (kg MS/h)	156
Horas de funcionamiento por día (h/d)	9.0
Largo de cada equipo (mm)	1 847
Ancho de cada equipo (mm)	1 100
Alto de cada equipo (mm)	1 705
Consumo de Energía de cada equipo (kW)	0.9
Peso vacío de cada equipo (kg)	420
Peso en operación de cada equipo (kg)	1 070

El volumen de lodo generado a 25% MS, se estima utilizando una densidad específica para el lodo deshidratado de 1.16 (von Sperling, 2007); como puede observarse, se generan 4.8 m³ por día de lodo al 25% de masa seca (MS). Dependiendo de la frecuencia con la que se desea sean removidos de la planta de tratamiento estos lodos, se debe de proveer de un área o contenedor para almacenamiento de lodo seco.

Del balance de masa para cada deshidratador, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 20 Balance de masa para cada deshidratador.

Parámetro	Valor
Caudal afluente, Qa (m ³ /d)	23.3
Sólidos suspendidos afluente, [SST]a (mg/L)	30 000
Caudal lixiviado, Ql (m ³ /d)	19.3
Sólidos suspendidos lixiviado, [SST]l (mg/L)	2 900
Caudal de lodo desh , Qd (m ³ /d)	2.2
Sólidos suspendidos lodo desh, [SST]d (mg/L)	250 000
Densidad del lodo al 25% (kg/m ³)	1.16
Lodo seco afluente (kg/d), La	700
Lodo seco lixiviado (kg/d), Ll	56
Lodo seco deshidratado (kg/d), Ld	644

Del balance de masa que se presenta en el cuadro anterior, se puede estimar que se generan 19.3 m³ de lixiviado por día por cada deshidratador (38.6 m³ en total), que deben ser retornados a cabecera de planta de tratamiento de lodos (pues la calidad no cumple para vertido) y 2.2 m³ de lodo deshidratado al 25% de Materia Seca (4.4 m³ total). Este último valor de lodo deshidratado (4.4 m³) difiere del estimado en el cuadro 19 (4.8 m³), lo anterior pues en el balance



de masa sí se incluye que parte del lodo (sólidos suspendidos) que entra al deshidratador sale por el lixiviado. El caudal de lixiviado, debe caracterizarse (calidad físico química como microbiológica) y se recomienda se recircule a la cabecera de la planta de tratamiento de aguas residuales (ver figura 4).

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 en el libro Metcalf & Eddy, Cuarta Edición, sección 5.3 *Flow Equalization*; el detalle de los cálculos preliminares se presenta en la memoria de cálculo (Anexo) en el cuadro denominado Almacenaje de Lixiviado pestaña Cálculos II Iteración. De los cálculos realizados, se obtiene que se requiere de un volumen de almacenaje de aproximadamente 29 m³. Este cálculo no incluye el agua de lavado de los equipos, por lo que el diseñador debe tener presente que debe gestionarse el agua de lavado de una manera adecuada.

Como se deduce de los datos anteriores, el diseñador debe considerar todos los flujos (cantidades) y calidades de los mismos para el dimensionamiento final de los procesos y equipos. En la siguiente figura, se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

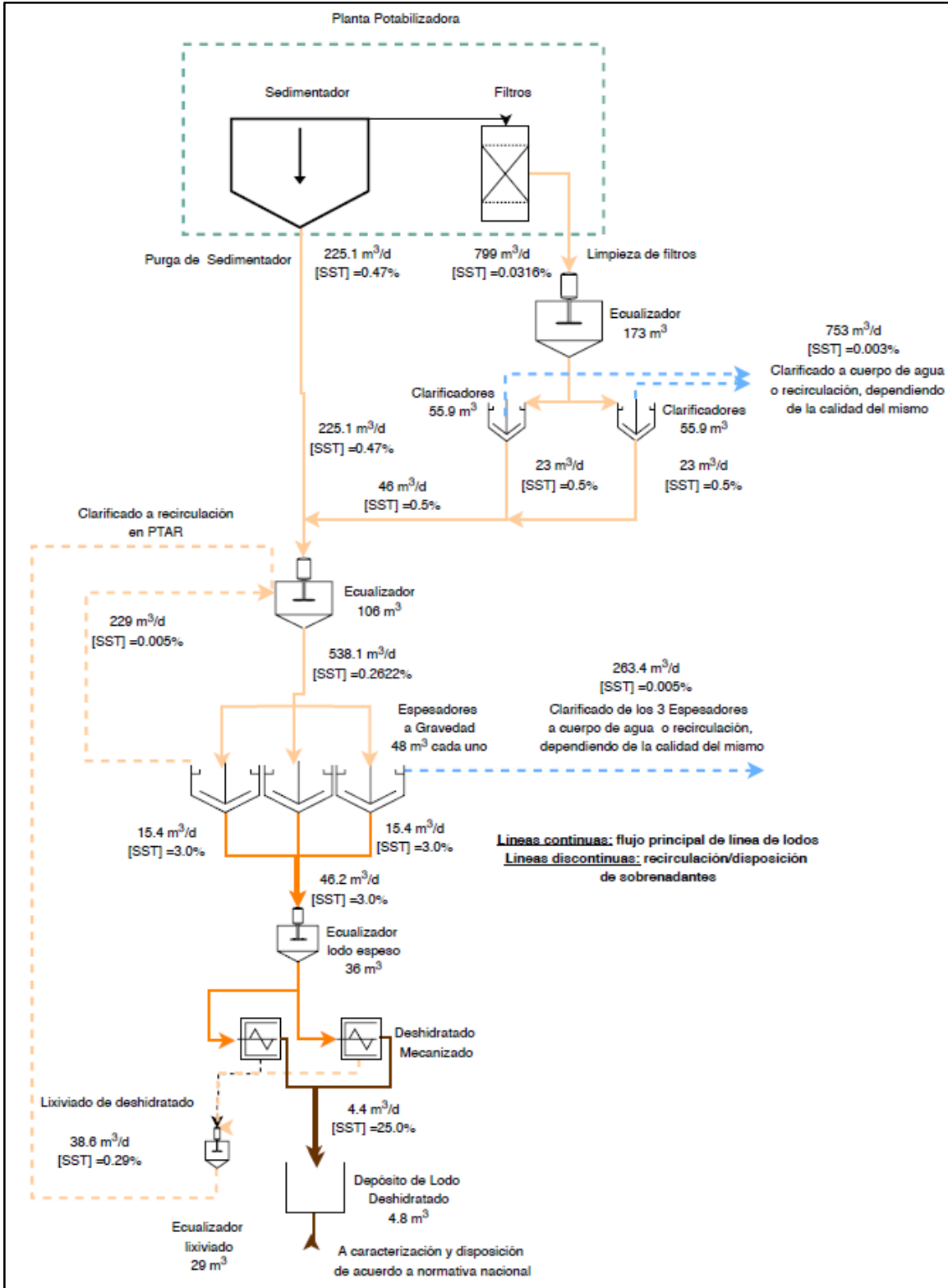


Figura 5 Esquema de funcionamiento y balance de masa para la gestión de lodos de la planta potabilizadora de Cartago (II Iteración)

A manera de resumen, en el siguiente cuadro se presenta un detalle general de los procesos y operaciones resultado de los cálculos preliminares realizados.

Cuadro 21 Detalles generales de los procesos y operaciones para la gestión de lodos residuales de la Planta Potabilizadora de Cartago.

Operación/Proceso	# obras	Volumen (m ³)	Área (m ²)	Altura (m)	Diámetro (m)
Ecuación lodos	1	106.0	30.3	3.5	6.2
Ecuación filtro	1	172.9	49.4	3.5	7.9
Clarificadores	2	55.9	16.0	3.5	4.5
Espesadores a Gravedad	3	77.3	13.6	3.5	5.3
Ecuación lodo espeso	1	36.0	10.3	3.5	3.6
Deshidratadores	2	---	2.0	---	---
Depósito de lodo deshidratado	1	4.8	4.8	1	2.5
Almacenamiento temporal de lixiviado	1	29.0	8.3	3.5	3.2
Laboratorio	1	---	40	---	---
Caseta deshidratación	1	---	100	---	---

Con el fin de realizar una revisión general de las estimaciones realizadas, se procede a realizar un balance de masa general de los procesos y operaciones propuestos. Se realiza un volumen de control sobre todos los procesos presentados en la figura 5, por lo que se tendría como residuos afluentes las purgas de los sedimentadores y la limpieza de filtros y los efluentes sería el lodo seco y el sobrenadante de los clarificadores. En el siguiente cuadro se presenta el balance de masa realizado.

Cuadro 22 Balance de masa general.

Ubicación	Parámetro	Valor
Afluente	Caudal de purga sed. (m ³ /d)	225.1
	[SST] (mg/L)	4 700
	Caudal limpieza filtros (m ³ /día)	798.5
	[SST] (mg/L)	316.0
Efluente	Caudal lodo seco (m ³ /d)	4.4
	[SST] (mg/kg)	250 000
	Caudal SN clarificadores (m ³ /d)	752.6
	[SST] (mg/L)	30.0
	Caudal SN Espesadores (m ³ /d)	263.4
	[SST] (mg/L)	50.0
Balance	Afluente (kg/d)	1 310.3
	Efluente (kg/d)	1 310.1
	Error (%)	0.02

Como puede observarse del cuadro anterior, el porcentaje de error es muy bajo, por lo que se considera que el balance de masa general cierra de manera adecuada. Es importante notar que

el valor de [SST] para el lodo seco, se expresa en mg/kg y debe incluirse en los cálculos del balance de masa la densidad del lodo seco.

5.3 Estimación preliminar de costos de inversión

Se procede a realizar una estimación preliminar de los costos de inversión asociados a los procesos, operaciones y equipos seleccionados y dimensionados preliminarmente en las secciones anteriores. La estimación de costos, se divide en una estimación inicial asociada a los procesos principales y a su equipamiento, para posteriormente, incorporarlo a una estimación de las Fases de Proyecto y costos asociados a estas fases; lo anterior, con el fin de contar con un estimado preliminar de costos del proyecto. En el siguiente cuadro, se presentan los costos preliminares de procesos y equipamiento general.

Cuadro 23. Costos preliminares de inversión de procesos y equipos para la gestión de lodos.

#	Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total	Fuente
1	Medidores de caudal (afluente clarificadores, espesadores y deshidratadores), recirculación	Unidad	10	\$8 000	\$80 000	Aquaworks, 2016
2	Ecualizador 106 m ³ (lodo de sedimentadores)	m ³	106	\$560	\$59 360	Dirección General de Tributación, 2013
3	Ecualizador 173 m ³ (limpieza de filtros)	m ³	173	\$560	\$96 880	Dirección General de Tributación, 2013
4	Clarificadores de 56 m ³ (2 unidades)	m ³	112	\$1 050	\$117 600	PyC - Sed Secundario Golfito
5	Barrelos - clarificador diám 4.50 m	Unidad	2	\$28 786	\$57 572	Estimación basada presupuesto Procesos Auto-mecanizados, 2017
6	Espesadores a gravedad de 77.7 m ³ (3 unidades)	m ³	232	\$1 050	\$243 495	Dirección General de Tributación, 2013
7	Barrelos - espesador a gravedad - diám 5.3 m	Unidad	3	\$29 497	\$88 492	Estimación basada presupuesto Procesos Auto-mecanizados, 2017
8	Ecualizador de 36 m ³ (Lodo espeso)	m ³	36	\$560	\$20 160	Dirección General de

#	Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total	Fuente
						Tributación, 2013
9	Equipo de deshidratado	Unidad	2	\$224 000	\$448 000	Cotización WWT - Quepos, 2017.
10	Depósito de almacenamiento de 13 m3 (lodo deshidratado)	m ³	13	\$560	\$7 280	Dirección General de Tributación, 2013
11	Unidad preparadora de polímero (espesador y deshidratadores)	Unidad	2	\$17 900	\$3 800	Cotización WWT - Quepos, 2017.
12	Almacenamiento temporal de lixiviado	m ³	29	\$560	\$16 240	Dirección General de Tributación, 2013
13	Equipo de monitoreo presuntivo	Global	1	\$20 000	\$20 000	Estimación
14	Tubería y valvulería	Global	global	\$119 470	\$119 470	10%, Plant Design Economics.
15	Equipo electromecánico (bombes y dosificadoras)	Global	global	\$119 471	\$119 471	10%, Plant Design Economics
					\$1 549 055	Total (\$)

Del cuadro anterior, se puede determinar que, para procesos y equipamiento para los mismos, una estimación preliminar de inversión para los mismos es de aproximadamente \$1.55 millones. La estimación preliminar de las fases y costos asociados a cada fase del proyecto, se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 24 Fases preliminares del proyecto y estimación de costos asociada.

Rubro	Descripción	Total (\$)
1	Trabajos por administración	\$172 194
2	FASE 1 Cronograma y planos finales (2 meses)	
	1. Cronograma global	
	2. Planos finales:	
	2.1 Anteproyecto	\$20 351
	2.2 Planos constructivos y especificaciones técnicas	\$81 404
	2.3 Presupuesto	\$10 176
3	FASE II: Construcción de obras y suministro e instalación de equipos	
	1. Destronque, desmonte y limpieza	\$13 300
	2. Excavación en roca	\$5 000
	3. Aceras del lote	\$16 250
	4. Sistema de Gestión de Lodos	\$1 549 055
	5. Sistema de control y medición en línea	\$77 453
	6. Instalación eléctrica	\$123 924
7. Laboratorio, caseta para deshidratado, almacenamiento lodo seco	\$141 900	

Rubro	Descripción	Total (\$)
	8. Interconexiones	\$10 000
	9. Evacuación de agua pluvial	\$10 776
	11. Acceso vehicular	\$10 000
	12. Instalación de equipo	\$77 453
4	FASE III: Puesta en marcha y transferencia tecnológica (seis meses)	
	1. 6 meses puesta en marcha y operación	\$228 912
5	Inspección	\$61 053
6	Dirección Técnica	\$101 756
7	Ganancia	\$203 511
9	Imprevistos	\$253 876
10	Financiamiento Bancario	\$244 213
11	Financiamiento Garantías	\$40 702
12	Garantías	\$162 809
	Sub Total	\$3 443 875
	TOTAL	\$3 616 068

Como puede observarse del cuadro anterior, un estimado preliminar de los costos asociados al proyecto de Gestión de Lodos en la Planta Potabilizadora de Cartago, es de aproximadamente \$3.6 millones. En el siguiente cuadro y figura se resumen y representan los costos globales para el proyecto en estudio.

Cuadro 25 Resumen de costos asociados al proyecto.

Descripción	Total
Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA)	\$274 740
Obra civil sin sistema de gestión	\$408 603
Sistema de gestión	\$1 549 055
Instalación	\$77 453
Financiamiento y garantías	\$447 724
Puesta en marcha y transferencia tecnológica	\$228 912
Ganancia e imprevistos	\$457 387
Gastos por administración	\$172 194

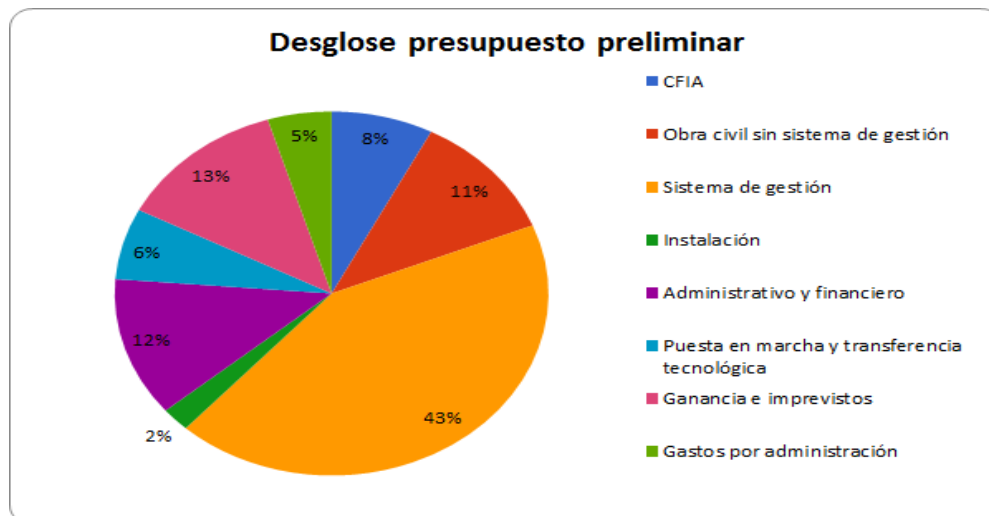


Figura 6 Representación gráfica de los costos asociados al proyecto



De la figura 6, se puede concluir que el sistema de gestión de lodos y aguas residuales representa el mayor costo del presupuesto preliminar, para luego ser seguido por la Ganancia e Imprevisto, Administrativo y Financiero y luego la obra civil que no incluye el sistema de gestión ni la instalación de equipos. Los gastos que se representan como Administrativo y Financiero, se refieren a financiamiento bancario, garantías y financiamiento de garantías.

5.4 Estimación preliminar de los costos de operación del sistema de gestión de lodos

Para poder generar un estimado de los costos de operación del sistema de gestión de lodos y aguas residuales para la planta potabilizadora de Cartago, se tomaron las siguientes consideraciones:

1. Se requiere de una jornada de 24 horas de operación, para las cuales, en la jornada diurna se refuerza con un funcionario adicional. El costo de la mano de obra se estima utilizando el índice salarial de AyA, con el salario de Jefe Técnico con 15 anualidades.
2. La estimación de los costos energéticos se realiza estimando un consumo igual al generado por un caudal similar de bombeo de un sistema de agua potable. Adicionalmente, se adicionan estimaciones para consumo de equipos de dosificación, tornillo prensa de anillas móviles, bomba para lixiviados, iluminación y medidores de caudal.
3. En el caso de los productos químicos, del Informe Fase III de la Contratación 2018CDS-00060-PRI, "Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales en plantas potabilizadoras", se estiman y especifican el tipo y cantidades de productos químicos a utilizar; lo anterior para la operación de espesado y para el acondicionamiento del lodo para deshidratado.
4. Se estima un consumo de reactivos químicos para el control operativo del sistema de gestión de lodos y se estiman los costos asociados al monitoreo periódico del sistema de gestión de lodos por parte de un laboratorio externo acreditado.
5. Se estima el costo de un profesional para control operativo de los procesos, el cual realiza dos visitas al mes al sistema de tratamiento. Este profesional puede ser un funcionario de AyA.
6. Se estima la cantidad de lodos deshidratado generado y el costo por recolección y disposición en un relleno sanitario. El dato del costo se estimó utilizando como referencia el valor de recolección y disposición del lodo seco de la PTAR Los Tajos.

En el siguiente cuadro y figura se presenta un resumen de los costos asociados a la operación del sistema para la gestión de los lodos residuales de la planta potabilizadora de Cartago.

Cuadro 26 Estimado de costos operativos para el sistema de gestión de lodos.

Descripción	Costo
Mano de obra	\$6 610
Cargas sociales	\$2 776
Energía eléctrica	\$2 618

Descripción	Costo
Polímeros	\$634
Monitoreo	\$1 597
Profesional para control operativo	\$661
Transporte y disposición de residuos	\$9 626
Imprevistos	\$579
Total mensual	\$25 100

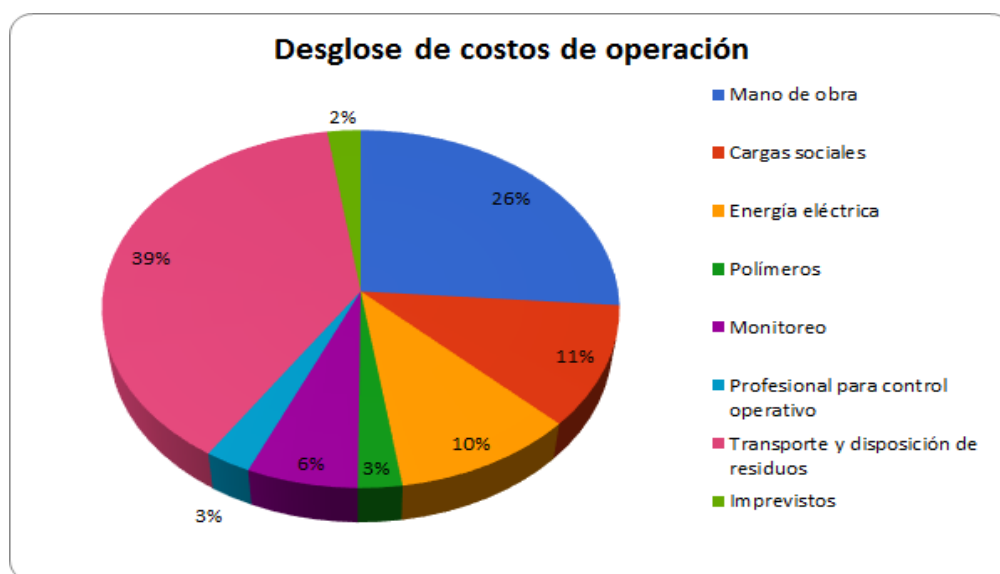


Figura 7 Representación gráfica de los costos asociados a la operación del sistema de gestión de lodos.

Como puede observarse, preliminarmente se estima que se incurriría en un costo aproximado de \$25 100 por mes, para la operación del sistema para gestión de lodos de la planta potabilizadora de Cartago. El desglose porcentual de los costos de O&M, se presenta en la figura 7, de donde se puede concluir que el transporte y disposición de residuos, representa la mayor parte de los costos, luego la mano de obra, siguiendo con las cargas sociales y la energía eléctrica. Con este costo de O&M y la cantidad de lodo seco deshidratado (1 386 kgMS/d), se obtiene un costo estimado de \$0.6 por cada kilogramo de materia seca gestionado.

Todos los cálculos realizados para la determinación de los costos presentados se encuentran en la memoria de cálculo (Anexo).

5.5 Consideraciones de mejoras para sistemas de potabilización respecto al tema de extracción de lodos

Uno de los aspectos más importantes para la correcta selección y dimensionamiento de los procesos y operaciones que componen un sistema de gestión de lodos y aguas residuales de plantas potabilizadoras, se refiere al diseño del sedimentador y sistema de extracción de lodos de la planta potabilizadora.

De las investigaciones realizadas, existen sistemas para extracción mecanizada de lodos de los sedimentadores de las plantas potabilizadoras. Algunos de los equipos existentes consisten de recolectores de lodos que se desplazan en el fondo de los sedimentadores mediante sistemas

de cadenas y rastras que llevan el lodo espeso a una fosa de lodo espeso y sistemas de succión de lodo espeso que se desplaza en el fondo del sedimentador. En las siguientes figuras, se presenta un detalle de los sistemas comerciales existentes.

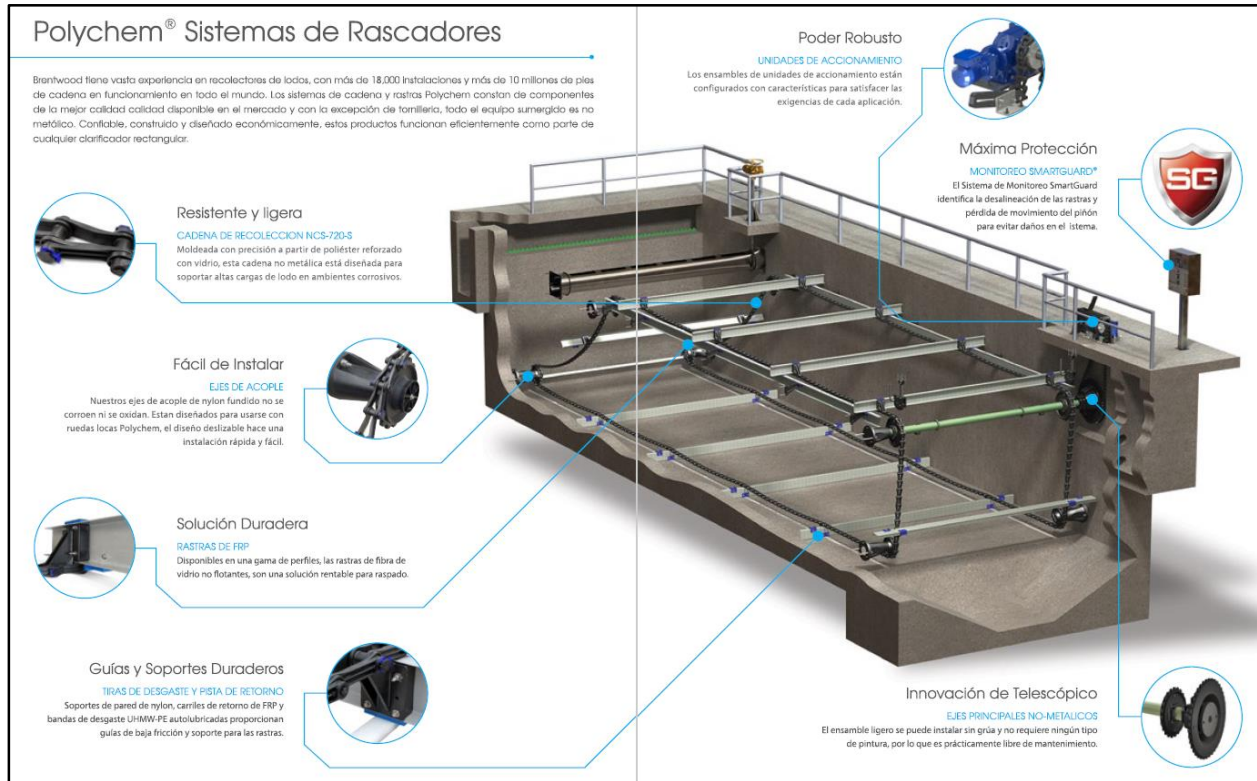


Figura 8 Sistema de recolección de lodos mediante cadena y rastras. (Fuente: Polychem, Brentwood. 2019)

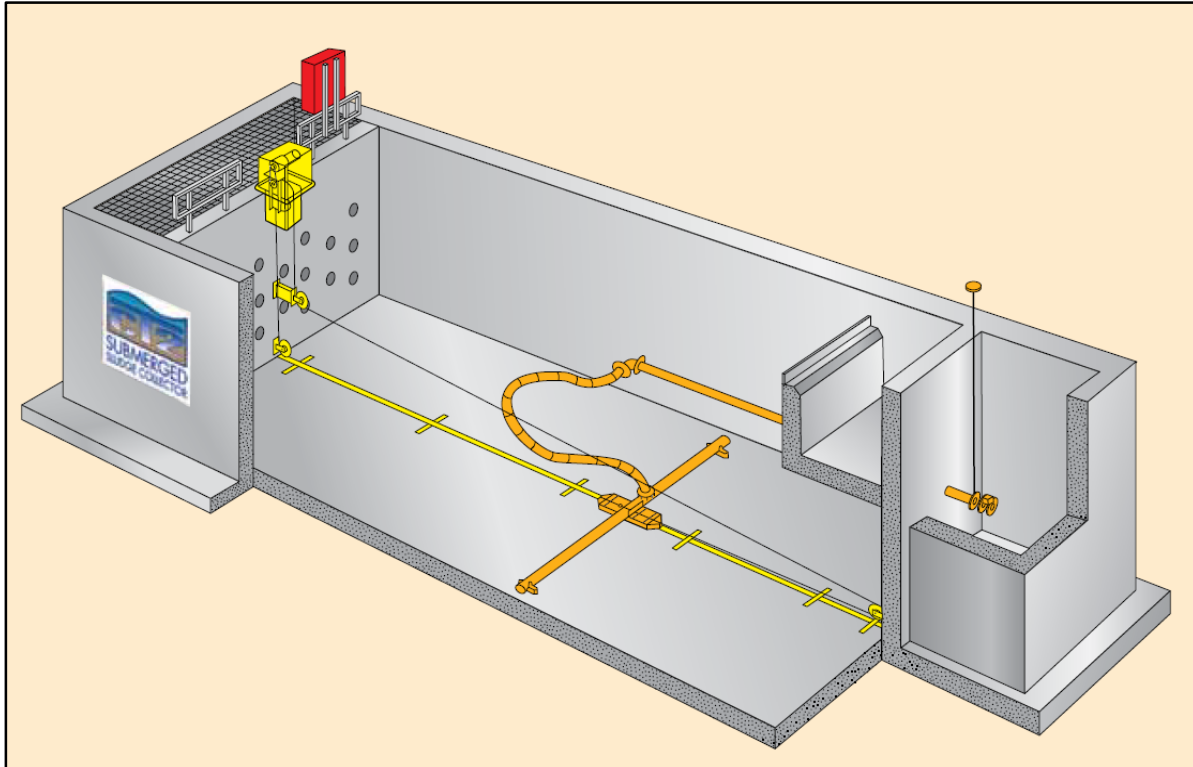


Figura 9 Sistema de recolección y succión de lodo espeso. (Leopold. 2019)

Los sistemas mencionados tienen el propósito de recolectar lodo del fondo del sedimentador de la planta potabilizadora, teniendo como resultado un lodo más espeso, menos cantidad de lodo y disminuyendo la posibilidad de que el lodo ya espeso en el fondo del sedimentador, se diluya con el agua sobrenadante del proceso. Lo anterior, disminuye la cantidad de lodo a tratar y mejora las características de espesado del mismo, disminuyendo el tamaño de las operaciones y procesos del sistema de gestión de lodos y por ende reduciendo la inversión de capital requerida.

Este tipo de sistemas, requiere que el fondo de los sedimentadores de las plantas potabilizadoras, tengan una pendiente o tolvas con pendiente pequeña, no pronunciada; este no es el caso de los sedimentadores de la PPot de Cartago; por lo cual, el análisis de implementar este sistema en Cartago, requeriría una reingeniería de los sedimentadores. En caso contrario, podría requerirse una inversión mucho mayor a la planteada anteriormente para el sistema de gestión de lodos.

Se recomienda que, para futuros proyectos de plantas potabilizadoras, los diseñadores, evalúen la posibilidad de incorporar sistemas de extracción de lodos como los mencionados. Para el caso de proyectos existentes, se deben valorar y estudiar los mecanismos de purga de lodos y retrolavados, en cada instalación; en caso de ser necesario, se requerirán modificaciones al sistema existente. Esto por cuanto cada unidad operativa tiene consideraciones diferentes para sus labores.

5.6 Pago de canon ambiental

El Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos, Decreto N° 34431-MINAE-S, en su capítulo cuarto, detalla el procedimiento de aplicación del Canon. Por lo anterior, se rescatan los

siguientes artículos.

“Artículo 20. Fijación del monto a cobrar. Se fija como monto máximo del canon para los próximos seis años, el equivalente en colones a \$0,22 (veintidós centavos de dólar) por cada kilogramo de DQO y \$0,19 (diecinueve centavos de dólar) por cada kilogramo de SST vertidos, calculado según el tipo de cambio definido por el Banco Central de Costa Rica a la entrada en vigencia del presente decreto”.

“El monto máximo para cada parámetro de contaminación sujeto a cobro, será ajustado en forma anual tomando en cuenta la variación en el índice de precios al consumidor calculado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Al finalizar el sexto año el monto máximo será revisado y ajustado”.

“Artículo 21. Del cobro gradual del canon. El monto máximo del canon se aplicará gradualmente a lo largo del período señalado en el artículo 20, conforme al siguiente procedimiento:

- A. Durante el primer año de aplicación del canon, se cobrará un monto anual correspondiente al diez por ciento (10%) del monto máximo fijado para el período de seis años.*
- B. Durante el segundo año de aplicación del canon, se cobrará un monto anual correspondiente al veinte por ciento (20%) del monto máximo fijado para el período de seis años.*
- C. Durante el tercer año de aplicación del canon, el monto anual será equivalente al treinta y cinco por ciento (35%) del monto máximo fijado para el período de seis años.*
- D. Durante el cuarto año de aplicación del canon, se cobrará un monto anual correspondiente al cincuenta y cinco por ciento (55%) del monto máximo fijado para el período de seis años.*
- E. Durante el quinto año de aplicación del canon, se cobrará un monto anual correspondiente al setenta y cinco por ciento (75%) del monto máximo fijado para el período de seis años.*
- F. Durante el sexto año de aplicación del canon, se cobrará un monto anual correspondiente al cien por ciento (100%) del monto máximo del canon”.*

Es importante mencionar que el Canon establece la forma en que se deben calcular las cargas contaminantes y los incentivos o penalidades que se dan por cumplimiento o incumplimiento con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.

Si se aplica el Canon Ambiental por Vertido, se debe estimar la generación diaria y anual de Sólidos Suspendidos Totales y DQO para el caso del lodo producido por los sedimentadores y por el lavado de los filtros. Para el caso en estudio, se cuenta con una caracterización de una muestra compuesta, para los parámetros de SST y DQO para los lodos generados en la purga de los sedimentadores y de SST para una muestra compuesta de los residuos de la limpieza de los filtros. Para el caso de la DQO de los filtros, se toma un valor recomendado por la literatura (Conagua, 2007). En el siguiente cuadro, se presenta un resumen de lo expuesto y la estimación diaria de SST y DQO generada por cada proceso.

Cuadro 27 Caracterización y producción diaria de lodos.

Parámetro	Purga de Sedimentador	Lavado de filtro
Demanda química de oxígeno, DQO (mg/L)	1 535	50 (Conagua, 2007)
Sólidos suspendidos totales, SST (mg/L)	4 732	316
Demanda química de oxígeno, DQO (kg/d)	346	40
Sólidos suspendidos totales, SST (kg/d)	1 065	252

Si se aplica la forma de cálculo con los montos establecidos por el canon mencionado, a las producciones de lodos estimadas para una planta potabilizadora que no cuenta con un sistema de gestión de aguas y lodos residuales, se obtienen los costos anuales y acumulado que se deberían pagar y que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 28 Estimación del canon aplicado a la generación de lodos en la Ppot, sin tratamiento de aguas residuales y lodos residuales.

Año	%	Sedimentadores		Filtros		Total	Total	Acumulado
		DQO	SST	DQO	SST	\$/año	Año	%
1	10	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	40 226	40 223
2	20	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	80 453	120 680
3	35	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	140 793	261 472
4	55	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	221 246	482 718
5	75	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	301 699	784 417
6	100	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	402 265	1 186 682
7	100	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	402 265	1 588 947
8	100	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	402 265	1 991 212
9	100	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	402 265	2 393 477
10	100	90 244	256 363	2 164	53 495	402 265	402 265	2 795 742

En 10 años de aplicación del canon a los vertidos de la planta potabilizadora, sin contar con un sistema de gestión de aguas y lodos residuales, se estaría pagando aproximadamente \$2.8 millones, por este concepto.

5.7 Estimación del área requerida para el proyecto

Con el fin de estimar los requerimientos de área mínimos para el proyecto de gestión de lodos en la planta potabilizadora de Cartago, se procede a resumir en un cuadro los resultados obtenidos en las secciones anteriores, referidos al área o huella de cada proceso o equipo. En el siguiente cuadro, se presentan los requerimientos de área de cada proceso u operación.

Cuadro 29 Requerimientos de área para cada proceso o equipo.

Operación	Número de obras	Volumen (m ³)	Área (m ²)	Altura (m)	Diámetro (m)
Ecuilización de lodo de purga sedimentador	1	106	30.3	3.5	6.2
Ecuilización de limpieza de filtros	1	173	49.4	3.5	7.9
Clarificadores de limpieza de filtros	2	56	16.0	3.5	4.5
Espesadores a gravedad	3	77	22.1	3.5	5.3
Ecuilizador de lodo espeso	1	36	10.3	3.5	3.6
Equipo de deshidratado mecanizado	2	---	2.0	---	---



Operación	Número de obras	Volumen (m ³)	Área (m ²)	Altura (m)	Diámetro (m)
Depósito de lodo deshidratado	1	13	13	1	4.1
Almacenamiento temporal de lixiviado	1	29	8.3	3.5	3.2
Laboratorio	1	---	40	---	---
Caseta deshidratado lodos	1	---	100	---	---

Al montar los requerimientos de área de cada proceso en una vista en planta en el terreno de la Planta Potabilizadora de Cartago, se genera la figura que se presenta a continuación. Preliminarmente, se puede decir que el terreno actual de la planta potabilizadora es suficiente para los procesos y operaciones propuestas. Es importante resaltar, que la propuesta que se presenta, no considera la topografía y curvas de nivel del terreno, por lo que las ubicaciones de los procesos pueden variar.

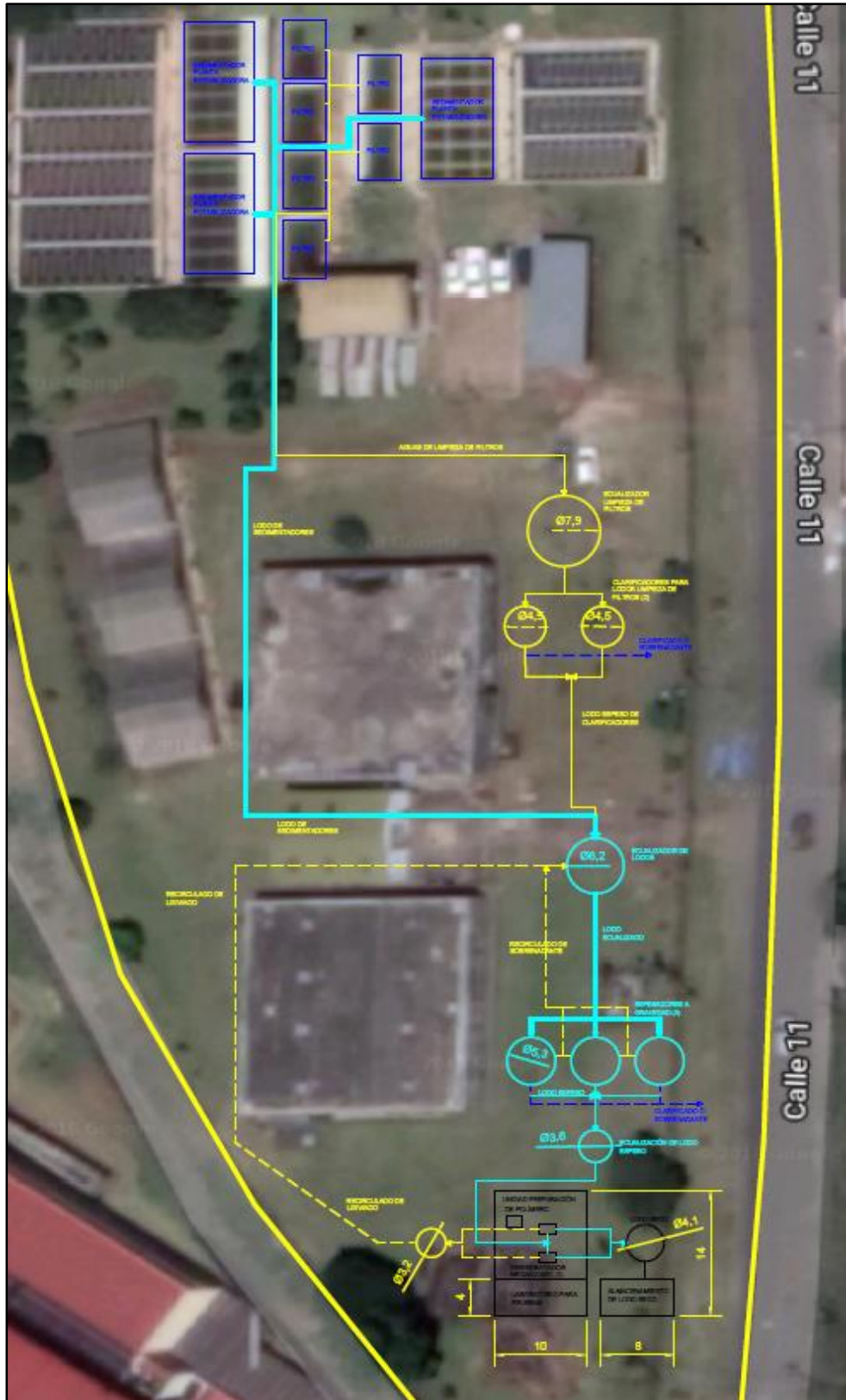


Figura 9 Estimación del área requerida para los procesos y operaciones para la gestión de lodos en la planta potabilizadora de Cartago.

5.8 Estimación preliminar de área en caso de usar lechos de secado

Es común en el tratamiento de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, el uso de lechos de secado para el deshidratado de los biosólidos. Con el fin de poder tener una idea del tamaño de estas estructuras y poder compararlas con el deshidratado mecanizado, se procedió a realizar una estimación preliminar de las mismas.

Para realizar las estimaciones indicadas, se utilizaron las siguientes consideraciones:

1. Los lechos de secado utilizados son lechos de arena.
2. El lodo que llega a los lechos de secado, se recomienda pase por las etapas de espesado a gravedad mencionadas en los apartados anteriores, y en caso de que sea necesario, se acondicione mediante productos químicos (para mejorar el desaguado) en las mismas.
3. La estimación del área requerida, se realiza utilizando una tasa de aplicación de sólidos de $130 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{día}$; según Tchobanoglous 2005, la misma puede encontrarse entre 100 a $160 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{día}$.
4. El lodo que entra al lecho de secado, posee una concentración de SS de 3%.
5. Los lechos de secado se ubicarán después de los espesadores a gravedad.
6. La distribución de las celdas de los lechos de secado, se debe realizar basado en el tiempo de secado del lodo y los requerimientos operativos de la empresa.

Basado en las consideraciones mencionadas y en la producción de SS del sistema de tratamiento ($1\ 386 \text{ kgMS/día}$), se obtiene preliminarmente, que se requiere de una superficie de aproximadamente $3\ 900 \text{ m}^2$ de terreno para construir los lechos mencionados. En el apartado anterior, se estimó un área de 100 m^2 para la caseta donde se colocarían los equipos de deshidratado mecanizado.

5.9 Consideraciones para disposición final de sólidos

Adicionalmente a la Legislación mencionada en el Informe Fase I (*Estudio bibliográfico sobre alternativas para la gestión de lodos en plantas potabilizadoras*) de esta investigación, se incluye el análisis del Decreto Ejecutivo 41527-S-MINAE "Reglamento general para la clasificación y manejo de residuos peligrosos", donde se 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 N° 27000-MINAE del 29 de abril de 1998 "Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales."

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

- 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.

- 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.



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

6. Conclusiones

1. Las plantas potabilizadoras producen aguas y lodos residuales que deben tratarse para poder ser dispuestos o reutilizados según los requerimientos de la legislación nacional.
2. El país cuenta con Leyes y Reglamentos que establecen el marco normativo regulatorio que permite establecer las metas a alcanzar por medio del sistema de gestión de lodos y aguas residuales.
3. Los principales procesos de una planta potabilizadora que generan lodos o aguas residuales son las purgas o limpieza de los sedimentadores y floculadores, y el retrolavado o limpieza de los filtros.
4. Debido a que los diseños actuales de las plantas potabilizadoras no permiten extraer fácilmente el lodo espeso concentrado en el fondo de los sedimentadores a un caudal constante y regulado, y con una calidad homogénea, se debe incorporar en la etapa de gestión de lodos, el uso de homogenizadores o equalizadores de caudal.
5. Debido a que las descargas de la limpieza de los filtros se realizan con altos caudales y en poco tiempo, se debe incorporar en el diseño, el uso de homogenizadores.
6. Los diseñadores de plantas potabilizadoras deben incorporar cambios en la conceptualización y dimensionamiento de los sistemas de recolección y extracción de lodos espesos en los diseños de los sedimentadores. Lo anterior, debido a que el proceso de potabilización representa un esfuerzo importante en la separación de fases que se pierde con los diseños actuales de las purgas de los lodos, pues estos se diluyen mucho al realizar esta operación.
7. Para el deshidratado mecanizado de lodos de plantas potabilizadoras, se requiere que las aguas y lodos residuales del proceso de potabilización sean espesados hasta alcanzar valores de concentración de materia seca superiores al 3%.
8. Para el espesado de aguas y lodos residuales, se utilizan comúnmente, clarificadores y espesadores a gravedad. En la mayoría de ocasiones, se debe acondicionar el lodo con productos químicos con el fin de mejorar los resultados de la etapa de espesado.



9. Los lodos espesos que se van a deshidratar, requieren de un acondicionamiento previo mediante el uso de polímeros para mejorar los resultados del proceso de deshidratado.
10. El tipo y cantidad de productos químicos a utilizar en el proceso de deshidratado de lodos, debe ser evaluado previo a su selección mediante ensayos en laboratorio y pruebas a escala de ser posibles. Es importante mencionar, que las pruebas a los productos químicos, dependen del tipo de equipo de deshidratado de lodos seleccionado.
11. Según las pruebas realizadas y para el lodo de purga de uno de los sedimentadores de la Planta potabilizadora de Tres Ríos, se determinó que después del espesamiento del lodo, una dosis de polímero aniónico (floculante - poliacrilamida) de 1.61 kg/ton MS, era necesaria para acondicionar el lodo previo a la etapa de deshidratado.
12. Se debe evaluar el tipo o los tipos de productos químicos, así como de las concentraciones a las cuales se vayan a utilizar para el acondicionamiento de los lodos. Adicionalmente y dependiendo del uso que se le vaya a dar a los subproductos del proceso de gestión de lodos residuales, se deben verificar las certificaciones de calidad de los productos, por ejemplo, su cumplimiento con las certificaciones NSF y otros.
13. Existen pruebas de laboratorio diseñadas para generar los parámetros básicos de diseño para espesadores a gravedad y para los procesos de deshidratado.
14. Se debe generar una vasta caracterización físico química y microbiológica de las aguas residuales y lodos residuales producto de los procesos de potabilización. Para el caso de estudio, la caracterización de los lodos se detalla en:
 - a. Informe Fase II (Gestión de Lodos en Sistemas de Filtración Rápida para Remoción de Turbiedad y Color. Caso de Estudio: Planta Potabilizadora de Cartago).
 - b. Apartado 5.1 de este informe.
 - c. En los documentos generados en la contratación 2018CDS-000060-PRI se presentan las pruebas realizadas a escala laboratorio y piloto y los resultados obtenidos de las mismas.
15. Alcanzar valores de humedad menores a 75% vía equipos mecanizados de deshidratado, es una tarea que se considera poco factible.
16. Un sistema de gestión de aguas y lodos residuales es tan complejo como una planta de tratamiento de aguas residuales; razón por la cual, se deben suministrar tanto los recursos económicos como financieros requeridos para la correcta operación del sistema. Por ejemplo, para la propuesta preliminar planteada a la Planta Potabilizadora de Cartago, la inversión de capital ronda los \$3.6 millones y los costos de O&M pueden ser superiores a los \$25 mil mensuales.
17. El sistema de gestión de aguas y lodos residuales de la Planta Potabilizadora de Cartago, en caso de que se decida que sea mecanizado, debe contemplar al menos las operaciones de equalización, clarificación, espesado, acondicionado y deshidratado de lodos.



18. Se debe caracterizar las aguas y lodos afluentes y efluentes a cada proceso de tratamiento con el fin de evaluar en sitio si se requiere de tratamientos posteriores, si se reincorpora al sistema de potabilización o se dispone adecuadamente. Los parámetros a monitorear, en el caso del proceso, son los Sólidos Suspendidos, para el caso de vertido o reuso, los requeridos por la legislación existente y finalmente, en caso de que existan flujos que se re-circulen al sistema de potabilización, se debe garantizar que no se afecte la calidad físico química y microbiológica del agua a tratar.

7. Recomendaciones

Para la Administración Superior:

1. Encomendar al personal que ejerce la Regencia Química a nivel del AyA la creación y coordinación de una unidad de Gestión de Residuos a nivel de AyA que pueda apoyar a las áreas operativas con la correcta gestión de los residuos ordinarios y peligrosos que se puedan generar en las labores cotidianas de la institución.
2. Según la estrategia que se seleccione para la gestión de lodos residuales en AyA, dotar de los recursos humanos y económicos necesarios a las áreas operativas que estarán a cargo de los procesos respectivos.

Para la UEN de Investigación y Desarrollo:

1. Realizar las pruebas en laboratorio y a escala piloto necesarias para generar los parámetros de diseño requeridos para los clarificadores y espesadores a gravedad; lo anterior para cada planta potabilizadora existente que requiera de un sistema para la gestión de aguas y lodos residuales. Para realizar lo mencionado en este punto, se recomienda seguir los protocolos desarrollados por la UEN ID en los informes I, II y III de este proyecto.
2. Apoyar al LNA en la implementación de pruebas de tratabilidad de aguas y lodos residuales de plantas potabilizadoras, con el fin de poder generar los parámetros de diseño para los sistemas de gestión de estos residuos.

Para las áreas operativas:

1. Implementar un plan para la atención de la gestión de aguas y lodos residuales del proceso de potabilización, donde se incluya:
 - a. Optimización de los sistemas de extracción o purga de lodos y de los lavados de los filtros.
 - b. Cuantificación de las aguas o lodos residuales producidos.
 - c. Caracterización físico-química de los residuos generados.
 - d. Solicitud de diseño y construcción de sistema para la gestión de residuos basado en las características del sistema de potabilización existente y en los recursos humanos y financieros del operador. Esta solicitud debe incluir un listado de requerimientos mínimos operativos.



- e. Capacitar al personal operativo en los aspectos requeridos para operar un sistema para gestión de aguas o lodos residuales.
 - f. Solicitud de recursos humanos y financieros para operar el sistema de gestión de lodos.
 - g. Solicitud al LNA de caracterización de los residuos generados.
2. En los sistemas de potabilización para los cuales se desee realizar mejoras en la gestión de lodos y aguas residuales, se debe determinar en sitio y en funcionamiento de la planta, las cantidades o caudales de aguas y lodos residuales generados en el proceso de potabilización.
 3. Realizar reportes operacionales de los sistemas de tratamiento de lodos residuales.
 4. Capacitar a los operadores de los sistemas de gestión de aguas y lodos residuales en la operación y mantenimiento de los procesos mencionados y en los aspectos de salud ocupacional que se requieran.
 5. Caracterizar todos los productos y subproductos generados en todas las etapas o procesos de sistema de tratamiento de lodos residuales, con el fin de valorar las correctas el funcionamiento de los procesos utilizados.

Para el Laboratorio Nacional de Aguas:

1. Evaluar los productos químicos que se puedan utilizar en la Gestión de Lodos de Plantas Potabilizadoras con el fin de validar la eficiencia y resultados que los mismos produzcan, cuando sea requerido.
2. Caracterizar los efluentes de los sistemas de gestión de aguas y lodos residuales según la normativa o legislación vigente. Los resultados obtenidos deben ser enviados a los operadores de los sistemas de tratamiento.
3. Caracterizar los lodos deshidratados según los requerimientos del Reglamento general para la clasificación y manejo de residuos peligrosos, Decreto N° 41527-S-MINAE.
4. Caracterizar los lodos deshidratados según los requerimientos del Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos, Decreto N° 39316-S.
5. Implementar pruebas de tratabilidad para aguas y lodos residuales con el fin de generar criterios de diseño de sistemas para gestión de aguas y lodos residuales.

Para las áreas de diseño:

1. Incorporar en el diseño de plantas potabilizadoras sistemas aptos para la extracción de lodo espeso de los sedimentadores bajo condiciones de caudal constante y composición homogénea.



2. Incorporar en el diseño de plantas potabilizadoras el sistema para gestión de aguas y lodos residuales producidos en el proceso mencionado.
3. Capacitar a los diseñadores de sistemas de potabilización en diseño de sistemas para gestión de aguas y lodos residuales.



8. Bibliografía

1. Acueductos y Alcantarillados. *Presupuesto de Sedimentador Secundario para Golfito*. Departamento de Diseño. 2017.
2. 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.
3. Berzosa, M. *Presupuesto de Equipos para Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. WWT Ingeniería S.A. 2017.
4. Comisión Nacional del Agua. *Guía para el Manejo, Estabilización y Disposición de Lodos Químicos*. CONAGUA. 2007.
5. Crittenden, R; et al. *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2012.
6. Dirección General de Tributación. *Manual de Valores Base Unitarios*. 2013.
7. EPA. *Water Treatment Residuals Management for Small Systems*. Water Research Foundation. 2009.
8. Henze, M et al. *Tratamiento Biológico de aguas residuales*. Principios, modelación y diseño. 2008.
9. Ministerio de Ambiente y Energía. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Decreto N°33601-MINAE-S. 2007
10. Ministerio de Salud. Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos. Decreto N°39316-S. 2015.
11. Peters, M. *Plant Design Economics for Chemical Engineers*. Fourth Edition. Mc Graw Hill International Editions. 1991.
12. Procesos Auto-Mecanizados S.L. *Cotización Barrelos Decantadores Circulares*. 2017.
13. 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.
14. Tchobanoglous, G; et al. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Metcalf & Eddy. 2005.
15. von Sperling, M et al. *Sludge Treatment and Disposal*. Biological Wastewater Treatment Series. Volume Six. IWA. London. 2007.



Anexo 1. Memoria de Cálculo del Proyecto