

UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN
FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



VIABILIDAD DE LADRILLOS REFRACTARIOS A PARTIR DE LODOS PTAP EL
ROLLO.

NOMBRES Y APELLIDOS

ING. EDWIN MIJAIL PINAYA SOLIZ

TRABAJO QUE SE PRESENTA EN OPCIÓN AL DIPLOMADO EN GESTION
INTEGRAL DE AGUA Y SANEAMIENTO


SUCRE – BOLIVIA

2024

CESIÓN DE DERECHOS

Al presentar este trabajo como requisito previo a la obtención del Diploma en Gestión Integral del Agua y Saneamiento para el Área rural de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. P. S.', is written over a faint, light blue rectangular stamp. The signature is fluid and cursive.

Sucre, septiembre del 2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mis padres y hermanos, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en cada paso de esta etapa formativa. Su confianza y aliento me han motivado a alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Para la realización del presente
trabajo de investigación agradezco
a mis docentes del Diplomado,

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes	1
Justificación.....	1
Planteamiento del Problema	3
Formulación del problema.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos específicos	3
Diseño metodológico	4
CAPITULO I.....	6
MARCO TEORICO Y CONTEXTUAL	6
1.1 Operaciones unitarias en la potabilización de agua.....	6
1.1.1 Reactivos químicos en la potabilización.....	7
1.2 Generación de lodos aluminosos.....	10
1.3 Análisis técnico.....	16
1.4 Viabilidad económica.....	28
CAPITULO II DIAGNOSTICO.....	34
2.1 Análisis y discusión de la información obtenida.....	34
CAPITULO III CONCLUSIONES	37
BIBLIOGRAFIA	38
ANEXOS.....	40
ANEXO A: Análisis fisicoquímico de lodos entrada a lecho.....	40
ANEXO B: Análisis fisicoquímico de lodos salida de lecho	41
ANEXO C: Análisis fisicoquímico de aluminio en lodos.....	42

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Tamaño de mercado de ladrillos refractarios	2
Ilustración 2 Diagrama de bloques potabilización del agua.....	9
Ilustración 3 Decantadores de la PTAP El Rollo.....	10
Ilustración 4 Extractores de fangos.....	11
Ilustración 5 Sección transversal de una era de secado de arena.....	13
Ilustración 6 Construcción del lecho de secado piloto.....	14
Ilustración 7 Operación y cargado de lodo en lecho a escala.....	15
Ilustración 8 Recolección de lodo.....	15
Ilustración 9 Equipo centrifugador	26
Ilustración 10 Filtro Prensa	27
Ilustración 12 Diagrama de bloques proceso de fabricación incluyendo lodo.....	30
Ilustración 11 Resistencia a la compresion	31

Índice de Tablas

Tabla 1 Resultados de Análisis Físicoquímico Realizados en Control de Calidad de la PTAP	13
Tabla 2 Sistemas de deshidratación natural y mecánico	17
Tabla 3 Pruebas de mezclas y cantidad de ladrillos.....	29
Tabla 4 Costo de materiales para la construcción de un área de secado.....	32

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Volumen de extracción de fangos año 2022 (m ³ /mes).....	12
Gráfica 4 Humedad libre en función del tiempo	20
Gráfica 5 Velocidad de secado vs Humedad libre	25

RESUMEN

El análisis técnico teórico sugiere que los lodos aluminosos generados en las plantas de tratamiento de agua potable presentan potencial para ser utilizados en la fabricación de ladrillos. Esta viabilidad técnica depende de la correcta proporción de los componentes en la mezcla y de la superación de desafíos asociados al secado. Los lechos de secado han mostrado ser efectivos en pruebas piloto, aunque su optimización a escala industrial requeriría estudios adicionales. La opción de usar equipos mecánicos de deshidratación podría acelerar el proceso, pero debido a su elevado costo, los lechos de secado se perfilan como la opción más viable y sostenible en un contexto teórico.

Desde una perspectiva económica teórica, el proyecto podría ser rentable si se reducen los costos operativos y de inversión inicial, sobre todo considerando el creciente mercado de ladrillos refractarios con alto contenido de alúmina. Es necesario profundizar el análisis económico teórico adaptado a las condiciones del mercado boliviano, además de explorar convenios potenciales con empresas que podrían estar interesadas en la adquisición de estos ladrillos.

En cuanto a la fase de pruebas, se recomienda continuar con estudios teóricos sobre la optimización de la mezcla y el proceso de sinterización, que permitan mejorar la eficiencia y calidad de los ladrillos. Asimismo, es fundamental realizar un estudio teórico del impacto ambiental, para asegurar que el proceso se alinee con las normativas locales aplicables.

Finalmente, la construcción de lechos de secado para la deshidratación de los lodos no solo garantiza un método eficiente y adecuado, sino que teóricamente permitiría reutilizar el agua drenada en épocas de sequía, contribuyendo así a una gestión más sostenible de los recursos hídricos en la ciudad de Sucre.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Es común que las plantas potabilizadoras que utilizan procesos de coagulación y filtración descarguen los lodos generados directamente en cuerpos de agua superficiales. Sin embargo, esta práctica suele contravenir las regulaciones ambientales debido a las características de estos residuos (GARCÉS A. Fernando, 1996), representan un desafío en la gestión de residuos debido a su volumen y composición.

Los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua requieren de una caracterización detallada para determinar su disposición final o posibles usos. (Kleber Gomes Ramirez, 2018)

En 1988, un error humano contaminó el suministro de agua de Camelford, Reino Unido, con altos niveles de aluminio. Alrededor de 20,000 personas estuvieron expuestas, sufriendo diversos síntomas. Aunque muchos se recuperaron, estudios posteriores sugirieron posibles efectos a largo plazo en la salud relacionados con la exposición al aluminio. (IAGUA, 2019)

Las características de los lodos de alúmina varían de una planta a otra, dependiendo de la calidad de agua cruda, del tratamiento recibido y de la época del año, sin embargo, poseen características básicas similares (Torres 2012).

El potencial de los lodos producidos hoy en día va en ascenso y representa una alternativa económica como ecológica de grandes beneficios, que pueden contribuir en gran medida al saneamiento del entorno del trabajo del hombre. Cada día el medio ambiente sufre los efectos contaminantes y se hace imperiosa la necesidad de promover estrategias de control que ayuden a disminuir en gran medida los efectos colaterales de la contaminación (MUJICA et al., 2006).

Justificación

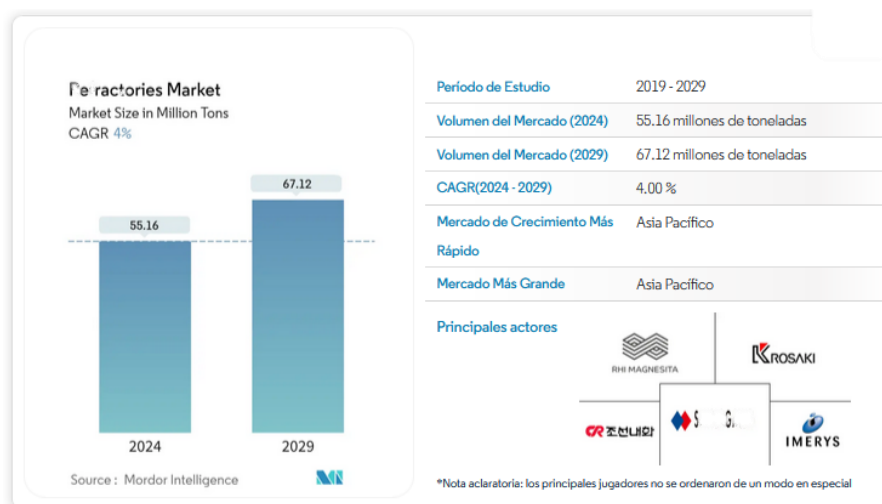
Los lodos aluminosos, subproductos de la coagulación en plantas potabilizadoras, representan un desafío significativo en la gestión de residuos debido a su volumen y composición. Estos lodos, ricos en compuestos de aluminio como hidróxidos y óxidos, pueden contener además otros elementos y compuestos que pueden afectar su manejo y disposición final. Una gestión

inadecuada de estos residuos puede generar impactos ambientales negativos, como la contaminación de suelos y aguas superficiales y subterráneas, así como la eutrofización de cuerpos de agua. Sin embargo, estos lodos también representan una oportunidad para la recuperación de recursos valiosos y la generación de productos de alto valor agregado, contribuyendo así a la economía circular

El ladrillo refractario de alta alúmina es un material refractario compuesto principalmente de silicato de aluminio (Al_2O_3), con un contenido superior al 48%. Según su composición mineralógica, se clasifica en cuatro tipos: mullita-corindón, corindón-mullita y mullita. Además, según su contenido de alúmina, se pueden distinguir tres grados: alta (superior a 65%), media (55-65%) y baja (48-55%). (Csacement, 2021)

El tamaño del mercado de refractarios se estima en 55,16 millones de toneladas en 2024 y se espera que alcance 67,12 millones de toneladas en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual del 4% durante el período previsto (2024-2029). (mordorintelligence, 2023)

Ilustración 1 Tamaño de mercado de ladrillos refractarios



Fuente:(Mordor Intelligence Research & Advisory,2023)

Planteamiento del Problema

El creciente volumen de lodos aluminosos generado por las plantas potabilizadoras representa un problema ambiental significativo debido a su potencial de contaminación. Sin embargo, estos residuos también contienen valiosos compuestos de aluminio, lo que plantea la posibilidad de su reutilización en la producción de materiales de construcción.

Por ejemplo: Los ladrillos refractarios de alta alúmina, estos con una demanda creciente en diversos sectores industriales, presentan una oportunidad para valorizar estos lodos. La composición química de los lodos aluminosos, rica en óxidos de aluminio, los hace potencialmente adecuados como materia prima para la fabricación de estos materiales.

No obstante, la viabilidad de esta propuesta debe ser evaluada desde una perspectiva técnica y económica. Es necesario determinar si los lodos aluminosos pueden ser procesados de manera eficiente para obtener las propiedades requeridas en los ladrillos refractarios, y si este proceso resulta rentable en comparación con las tecnologías convencionales de producción.

Formulación del problema

¿Cuál es la factibilidad técnica y económica de valorizar los lodos aluminosos generados en la planta potabilizadora El Rollo a través de su incorporación en la producción de ladrillos refractarios de alta alúmina, y cuáles son los ajustes necesarios en los procesos de producción y las propiedades de los materiales resultantes para garantizar su calidad y competitividad en el mercado?

Objetivo General

Analizar la viabilidad técnica y económica de valorizar los lodos aluminosos generados en la planta potabilizadora "El Rollo" como materia prima para la producción de materiales

Objetivos específicos

Evaluar el potencial teórico de los lodos aluminosos como materia prima para la producción de ladrillos refractarios

Identificar los principales desafíos técnicos y económicos asociados a la utilización de lodos aluminosos en la producción de materiales de construcción

Proponer un modelo conceptual para la valorización de los lodos aluminosos en la industria de la construcción, considerando aspectos ambientales y socioeconómicos.

Diseño metodológico

Enfoque Cualitativo, Inductivo, Básico, No Experimental y Exploratorio

Enfoque Cualitativo: Este estudio tiene un componente teórico, el enfoque cualitativo es adecuado porque permite explorar en profundidad conceptos como la viabilidad, el potencial y los desafíos asociados a la valorización de los lodos aluminosos.

Método Inductivo: Dado el carácter exploratorio de la investigación, el método inductivo es el más apropiado. Se partirá de observaciones y datos específicos (revisión bibliográfica, casos de estudio) para generar conclusiones y teorías más generales sobre la viabilidad de la valorización de los lodos.

Tipo de Investigación Básica: El objetivo principal es generar conocimiento nuevo y profundizar en la comprensión de un fenómeno, sin una aplicación práctica inmediata. Se busca contribuir al cuerpo teórico existente sobre la valorización de residuos industriales.

Diseño No Experimental: Al ser una investigación teórica, no se manipulan variables ni se establecen grupos de control. La investigación se basa en la revisión de la literatura existente y en la construcción de modelos conceptuales.

Nivel de Investigación Exploratoria: El objetivo es explorar un área de investigación poco estudiada o que presenta lagunas de conocimiento. Se busca identificar las principales variables y relaciones entre ellas.

Técnicas y Fuentes de Recolección de Datos

Dado el carácter teórico de la investigación, las principales técnicas y fuentes de recolección de datos serán:

- Revisión bibliográfica: Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura científica, técnica y gris relacionada con la valorización de residuos industriales, la producción de materiales de construcción, las propiedades de los lodos aluminosos y los procesos de coagulación en plantas potabilizadoras.
- Análisis documental: Se analizarán documentos técnicos, informes de investigación, normativas y políticas relacionadas con el tema.
- Estudios de caso: Se pueden analizar casos de éxito o fracaso de proyectos similares en otras partes del mundo para identificar lecciones aprendidas y mejores prácticas.

CAPITULO I

MARCO TEORICO Y CONTEXTUAL

1.1 Operaciones unitarias en la potabilización de agua

El proceso de potabilización del agua es el conjunto de operaciones unitarias y tratamientos necesarios para transformar el agua cruda (generalmente procedente de ríos, lagos o acuíferos) en agua potable, es decir, agua apta para el consumo humano.

Los procesos que se utilizan en la potabilización del agua pueden variar dependiendo de las características del agua cruda y de los estándares de calidad que deben cumplirse.

En el tratamiento de aguas estos vienen abarcando desde la mecánica de fluidos hasta procesos de transferencia de masa en los cuales se ven involucrados los distintos elementos presentes en el agua, para ello es necesario conocer la procedencia de la misma ya que existen distintos tipos de agua, estas clases de agua son clasificados de la siguiente manera.

CLASE "A" Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.

CLASE "B" Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

CLASE "C" Aguas de utilidad general, que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica.

CLASE "D" Aguas de calidad mínima, que, para consumo humano, en los casos extremos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de presedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por elevado contenido de sólidos en suspensión, y luego tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica especial contra huevos y parásitos intestinales.

(Ley N° 1333, Capítulo III, Art. 4°, año 1993)

La Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) “El Rollo”, es una planta de tipo convencional, estas son capaces de remover turbiedad, sedimentos, microorganismos, dureza,

olor, color y las características que se requieran dependiendo del estado en que se encuentre el agua cruda. (ELAPAS 2023).

Una vez identificado el tipo de agua a tratar se eligen la operaciones unitarias y reactivos químicos a utilizar.

1.1.1 Reactivos químicos en la potabilización

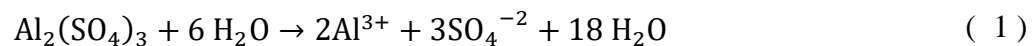
a) Sulfato de aluminio:

Se añade al agua cruda en pequeñas cantidades y se mezcla para formar flóculos que se sedimentan y eliminan las partículas en suspensión y los sólidos disueltos.

Puede encontrarse en forma sólida o líquida. En forma sólida se presenta en gránulos de diversos tamaños o polvos. La fórmula de este compuesto es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de aluminio hidratado) se agrega al agua en dosis controladas y se mezcla con agitación para asegurar una distribución uniforme en todo el volumen del agua.

Su concentración se define en general por su contenido de alúmina, expresada en Al_2O_3 con un 17% de este aproximadamente.

Cuando el sulfato de aluminio se disuelve en agua, se disocia en iones aluminio (Al^{3+}) y iones sulfato (SO_4^{2-}), de acuerdo con la siguiente reacción química:



En solución acuosa, los iones aluminio y sulfato pueden interactuar con otras sustancias presentes en el agua, lo que puede llevar a la formación de precipitados o flóculos que se utilizan en el proceso de coagulación-floculación para la eliminación de impurezas del agua.

b) Polímero catiónico

Los polímeros catiónicos son utilizados en el tratamiento de agua potable como coagulantes primarios o coadyuvantes de coagulación en conjunto con otros coagulantes como el sulfato de aluminio.

Su función principal es la de neutralizar las cargas negativas de las partículas coloidales presentes en el agua cruda, favoreciendo así su aglutinación y floculación para su posterior eliminación por sedimentación y filtración. Además, los polímeros catiónicos pueden mejorar la claridad y transparencia del agua, reducir la turbiedad y minimizar la formación de subproductos de desinfección.

Es importante destacar que los polímeros catiónicos utilizados en el tratamiento de agua potable deben cumplir con ciertos requisitos de calidad y estar aprobados por las autoridades sanitarias correspondientes para garantizar su seguridad y eficacia en la potabilización del agua.

c) Hidróxido de Calcio

La adición de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 en la potabilización del agua se utiliza para elevar el pH y precipitar las impurezas en el agua. El hidróxido de calcio se disuelve en agua para formar iones de calcio Ca^{2+} e iones hidroxilo OH^- , lo que aumenta el pH del agua.

El aumento del pH puede ayudar a la coagulación y floculación de las partículas suspendidas en el agua, lo que facilita su eliminación mediante procesos de sedimentación y filtración. Además, el aumento del pH puede ayudar a prevenir la corrosión de las tuberías de distribución de agua y proteger la calidad del agua potable.

d) Hipoclorito de calcio:

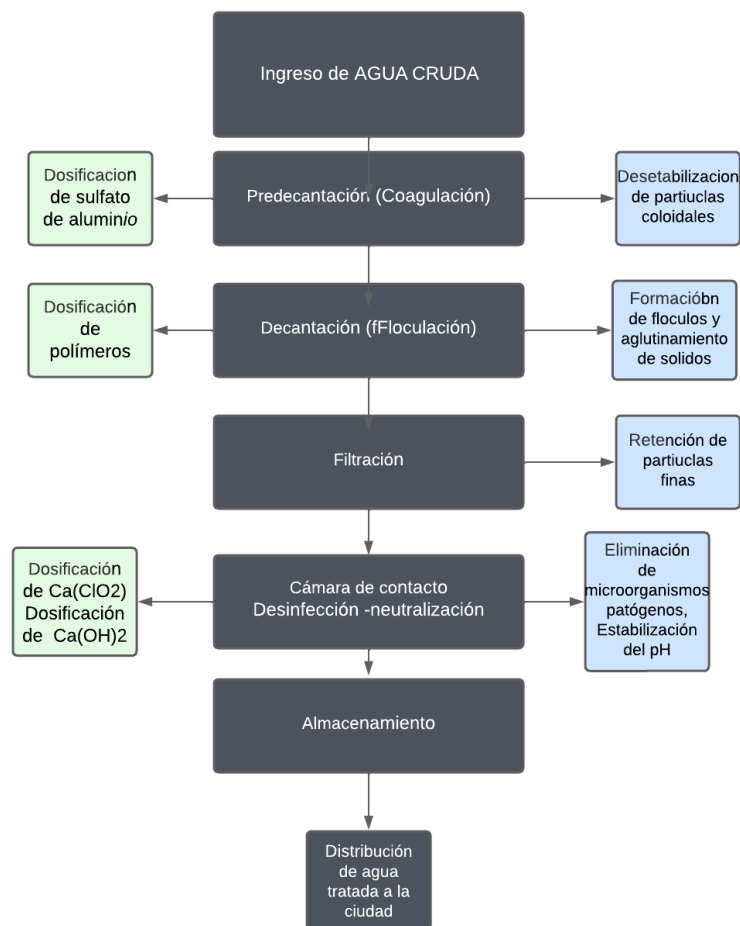
El hipoclorito de calcio es un compuesto químico utilizado como agente desinfectante en el tratamiento de agua potable. Al entrar en contacto con el agua, se disocia en iones de calcio, hipoclorito y cloro libre. El cloro libre es el agente desinfectante activo que mata los microorganismos patógenos presentes en el agua.

En general, el contenido de cloro activo en el hipoclorito de calcio suele oscilar entre el 60% y el 70%, dependiendo del proveedor que comercialice este reactivo químico. Para determinar la cantidad exacta de hipoclorito de calcio necesario para desinfectar agua clarificada, es necesario realizar un análisis del contenido de cloro en el producto y calcular la dosis adecuada.

Es importante tener en cuenta que el hipoclorito de calcio es un producto altamente reactivo y corrosivo, por lo que es necesario tomar precauciones adecuadas para su manipulación y almacenamiento.

Para un mejor entendimiento de lo anteriormente mencionado se presenta el siguiente diagrama de bloques que resume el proceso.

Ilustración 2 Diagrama de bloques potabilización del agua



Fuente: Elaboración propia

1.2 Generación de lodos aluminosos

Los lodos que se producen básicamente en la sedimentación son los residuos de la coagulación química, los mismos que están compuestos por los precipitados de aluminio provenientes del uso del sulfato de aluminio, al igual que por el material orgánico e inorgánico removido, arena, limo, arcilla, polímero o ayudante de coagulación usados, y por el agua de arrastre utilizada para su transporte.

Los decantadores son del tipo flujo ascendente (lodos activados), estos son equipos utilizados en la potabilización del agua para remover partículas y sólidos en suspensión del agua cruda. Estos decantadores funcionan mediante el principio de sedimentación, donde las partículas más pesadas se depositan en el fondo del tanque y son removidas por medio de válvulas.

Ilustración 3 Decantadores de la PTAP El Rollo



Fuente: Elaboración propia

Para evacuar estos lodos la PTAP cuenta con los extractores de fangos que son válvulas extractoras y estas se encuentran, por debajo de los decantadores, se cuentan con 3 unidades de decantación, cada unidad decantadora posee 4 válvulas extractoras y en total se tienen 12 válvulas de extracción de fangos. La función de estas válvulas es de expulsar o extraer los fangos acumulados en el lecho de fangos del decantador.

La extracción de estos fangos se los puede realizar de manera programada es decir automática o de manera manual.

Ilustración 4 Extractores de fangos



Fuente: Elaboración propia

Así mismo existe lavados de los decantadores (donde están conectados los extractores de fangos) de manera trimestral. Se muestra a continuación datos obtenidos del año 2022

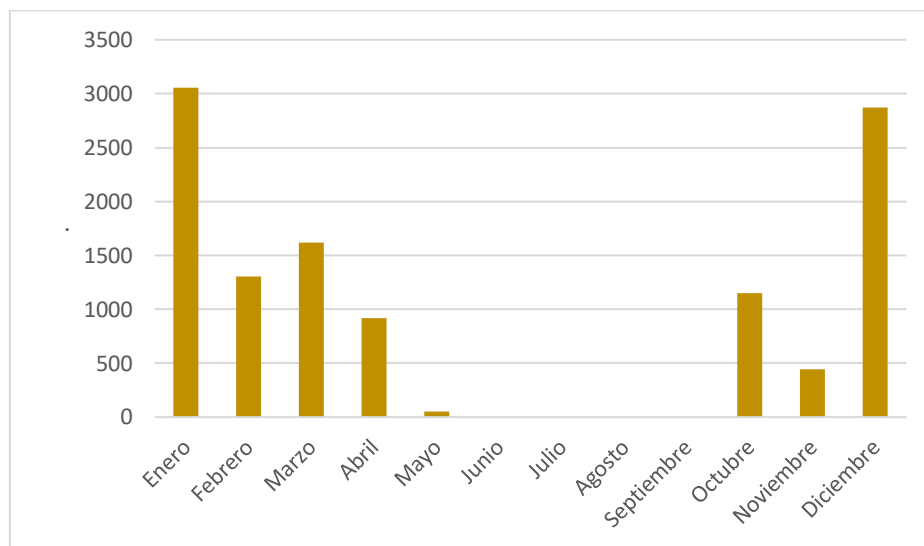
Datos Históricos de la extracción de fangos por mes en la PTAP

Meses	Extracción de fangos (m ³ /mes)
Enero	3053
Febrero	1305
Marzo	1617
Abril	918
Mayo	54
Junio	0
Julio	0

Agosto	0
Septiembre	0
Octubre	1150
Noviembre	446
Diciembre	2871

Fuente: E.L.A.P.A.S (2022)

Gráfica 1 Volumen de extracción de fangos año 2022 (m³/mes)



Fuente: Elaboración propia

Para un análisis más práctico se muestra a continuación resultados de los análisis fisicoquímicos realizados en el año 2023.

Tabla 1 Resultados de Análisis Físicoquímico Realizados en Control de Calidad de la PTAP

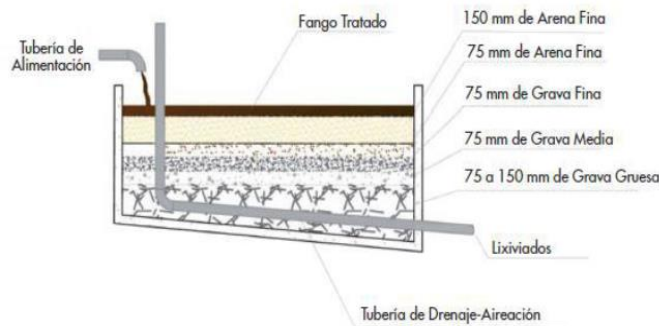
Detalles	Sólidos Sedimentables lodos (ml/1 h)	Turbiedad Lodos (NTU)	Aluminio Lodos (mg Al /l)
Entrada Lecho de secado Piloto	700	20000	81.8
Salida Lecho de Secado Piloto	24	578	0.979

Fuente: División de control de calidad E.L.A.P.A.S (2023)

1.1 Tratamiento de residuos solidos

En la práctica, las eras de secado convencionales están constituidas por una capa de material drenante, dividida en compartimentos, y sobre la que se vierte el fango en tongadas de 20-30 cm como máximo para permitir el proceso de secado. La capa drenante suele estar compuesta por un lecho de arena (fina y gruesa), dispuesto sobre una capa soporte de grava de distintos tamaños como se muestra en la siguiente ilustración

Ilustración 5 Sección transversal de una era de secado de arena



Fuente: Metcalf y Eddy (2003)

La deshidratación de los fangos en las eras se logra mediante drenaje (filtración) y evaporación en dos etapas, así:

- En una primera fase, el agua abandona el fango por filtración a través de la arena, favoreciendo el desprendimiento de los gases ocluidos y disueltos, que tienden a hacer flotar los sólidos. La concentración de sólidos podría llegar hasta un 20%.
- La segunda fase de evaporación es más lenta, y produce una disminución de la capa de fangos, agrietando su superficie y favoreciendo la evaporación del agua de las capas inferiores, al generarse grietas cada vez más profundas. Al final de esta fase, el fango tendrá una consistencia tal que le permitirá ser manejable, alcanzándose niveles de sequedad del 40-60% después de 10 a 15 días bajo condiciones favorables.

Aprovechando las infraestructuras existentes, se diseñó un lecho de secado a escala piloto para mejorar la eficiencia en la separación de fases. Mediante un modelo matemático, se obtuvo una curva de secado que permitió predecir el contenido de humedad óptimo. Esta solución innovadora, si bien presenta desafíos, contribuye a una gestión más sostenible de los residuos generados en la planta.

Ilustración 6 Construcción del lecho de secado piloto



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 7 Operación y cargado de lodo en lecho a escala



Fuente: Elaboración propia

Para la construcción de las camas de lecho de secado se usaron los siguientes materiales:

Dependiendo de las condiciones climáticas, el periodo de secado puede oscilar entre unos días y varias semanas. Cuando se utilicen lechos de secado de arena se debe aplicar el lodo en capas de 15 cm a 30 cm.

Ilustración 8 Recolección de lodo



Fuente: Elaboración propia

Se utiliza un geotextil en la parte superior del lecho con el propósito de prevenir la elevación de la arena durante el proceso de extracción de lodo. Esto evita que la capa de arena se llene de manera constante.

1.3 Análisis técnico

a) Aspecto legal.

Para cumplir con las normativas ambientales vigentes, estas indican:

- a) Se prohíbe toda conexión cruzada, por lo que: en sistemas de alcantarillado separados queda prohibida toda descarga de aguas residuales, crudas o tratadas, en forma directa o indirecta a los colectores del alcantarillado pluvial, y
- b) En sistemas de alcantarillado separados, no se permite ninguna descarga de aguas pluviales provenientes de techos y/o patios, en forma directa o indirecta, a los colectores del alcantarillado sanitario

(Decreto supremo N°24176)

A lo anteriormente mencionado se puede interpretar que: El Decreto Supremo N° 24176 prohíbe conexiones cruzadas en sistemas de alcantarillado, lo cual impacta directamente en la gestión de lodos aluminosos. El aprovechamiento de estos lodos requiere permisos ambientales y un plan de gestión de residuos. Aunque esto implica costos adicionales, también brinda oportunidades para la innovación y la mejora del impacto ambiental.

b) Tecnologías para el secado de lodo

Se conoce que la extracción del fango se lleva a cabo, normalmente, de forma manual, vertiendo el fango seco en carretillas o cintas transportadoras, que lo conducen fuera de las eras para ser almacenados o cargados sobre camión. Con la retirada del fango también se elimina algo de arena de la capa drenante, al quedar adherida a la torta, lo que obliga a reponer parte de la arena cada cierto tiempo.

Lechos de secado

El dimensionamiento de los lechos de secado puede hacerse con base a diferentes criterios. Uno de ellos es considerando el número de habitantes por metro cuadrado y, por otro lado, es posible basarse en la producción anual de lodos por metro cuadrado.

Según John Arundel (2002), los factores que deben estar incluidos en las decisiones de los procesos de tratamiento de lodos comprenden:

- Calidad del lodo
- Adecuación a las condiciones existentes del proceso de potabilización
- Flexibilidad del proceso
- Capacidad de la instalación
- Costos (mantenimiento, operación y construcción);
- Compatibilidad ambiental y Calidad del material procesado.

Tabla 2 Sistemas de deshidratación natural y mecánico

Sistemas de deshidratación natural y mecánico		
	Ventajas	Desventajas
Sistemas de secado natural	Menos costo de implementación (siempre que se disponga del área suficiente)	Altas exigencias de superficie
	Bajo consumo de energía y productos químicos	Alta dependencia de las condiciones climáticas
	Baja sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo	Requerimiento de mano de obra para la remoción de lodo
	Simplicidad de operación	
	Apropiados para plantas pequeñas y aisladas	

Sistemas de deshidratación natural y mecánico		
	Ventajas	Desventajas
Sistemas de deshidratación mecánica	Necesitan áreas menores	Mayor consumo de energía
	Independencia de las condiciones meteorológicas	Necesita utilizar acondicionadores químicos adecuados
	mayor eficiencia en menos tiempo	Alta sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo
		Necesidad de un lavado frecuente de las telas filtrantes y otros equipos en contacto directo con el lodo
		Eventuales problemas de ruido
		Vibraciones excesivas provocadas por el funcionamiento de bombas y motores

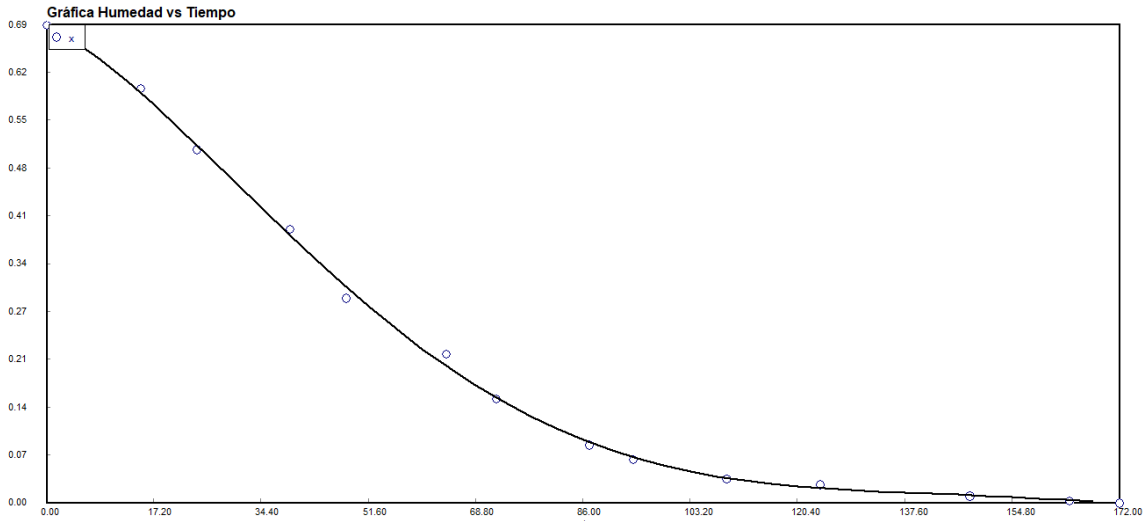
Fuente: José Rodríguez 2013

Para poder entender mejor sobre los lechos de secado se realizó el año 2023 la determinación de la humedad para que con esta se pueda estimar su cinética de secado a ciertas condiciones.

Peso (kg)	Tiempo (horas)	Humedad (xf)	Humedad libre (x)
1.315	0	0	0.685163498
1.195	15	0.091254753	0.593908745
1.08	24	0.178707224	0.506456274
0.93	39	0.292775665	0.392387833
0.8	48	0.391634981	0.293528517
0.695	64	0.47148289	0.213680608
0.61	72	0.536121673	0.149041825
0.52334	87	0.602022814	0.083140684
0.49604	94	0.62278327	0.062380228
0.45972	109	0.650403042	0.034760456
0.4488	124	0.658707224	0.026456274
0.4273	148	0.675057034	0.010106464
0.4184	164	0.681825095	0.003338403
0.41401	172	0.685163498	0

En un principio se pesa a intervalos de tiempo una muestra de lodo, esto con el fin de determinar la humedad libre esto con el objetivo de entender el comportamiento que esta tiene en a medida que transcurre el tiempo

Gráfica 2 Humedad libre en función del tiempo



Fuente: Polymath 6.10 (2012)

R ²	0.9989497
R ² adj	0.9982932
Rmsd	0.0019821
Variance	9.625E-05

En este estudio, se utilizó el software Polymath para ajustar una curva polinomial a los datos experimentales. La elección de Polymath se debió a su capacidad para manejar modelos matemáticos complejos y su facilidad de uso. Gracias a esta herramienta, se pudo obtener un ajuste preciso que permitió analizar en profundidad el comportamiento del sistema.

Se obtuvo los siguientes ajuste y comportamientos de la gráfica:

$$\text{Ajuste polinomial } x = a_0 + a_1 * t + a_2 * t^2 + a_3 * t^3 + a_4 * t^4 + a_5 * t^5 \quad (2)$$

$$x = 0.6861737 - 0.0047535 * t - 0.0001511 * t^2 + 2.324E^{-6} * t^3 - 1.176E^{-8} * t^4 + 2.037E^{-11} * t^5 \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = -0.0047535 - 0.0003022 * t + 6.971E^{-6} * t^2 - 4.702E^{-8} * t^4 + 1.018E^{-10} \quad (4)$$

Tiempo (horas)	Humedad (xf)	Humedad libre (x)	$\frac{dx}{dt}$
0	0	0.685163498	-0.0047535
15	0.091254753	0.593908745	-0.00787156
24	0.178707224	0.506456274	-0.00860723
39	0.292775665	0.392387833	-0.00849008
48	0.391634981	0.293528517	-0.00785756
64	0.47148289	0.213680608	-0.00615917
72	0.536121673	0.149041825	-0.0051886
87	0.602022814	0.083140684	-0.00341211
94	0.62278327	0.062380228	-0.00267058
109	0.650403042	0.034760456	-0.00139321
124	0.658707224	0.026456274	-0.00062197
148	0.675057034	0.010106464	-0.00037324
164	0.681825095	0.003338403	-0.00058328
172	0.685163498	0	-0.00066397

La derivada de la curva de ajuste representa la tasa de cambio de la humedad en función del tiempo, es decir, la velocidad de secado. Este parámetro es crucial para comprender los mecanismos de transferencia de masa involucrados en el proceso y optimizar las condiciones de operación.

Cálculo de la cinética de secado

$$R = -\frac{L_s}{A} * \frac{dX}{dt}$$

Donde:

R = Velocidad de secado.

LS = Masa del sólido seco

A = Área de secado

$\frac{dX}{dt}$ = Variación de la humedad respecto del tiempo

Cálculo de la masa de sólido

$$\text{Volumen de lodo} = B * A \quad (5)$$

Donde:

B= Altura de carga de lodo

A= Área de secado

Área de secado

$$A = \text{Base} * \text{Longitud}$$

$$A = 10\text{m} * 17.5\text{m} = 175\text{m}^2$$

$$A = 175\text{m}^2$$

Cálculo de la masa de sólido

$$\text{Volumen de lodo} = 0.50\text{m} * 175\text{m}^2 = 87.5\text{m}^3$$

Cálculo de la masa de sólido

$$\rho = \frac{m}{V} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\rho = 10.968 \frac{\text{mg}}{\text{ml}} * \frac{1\text{kg}}{10000\text{mg}} * \frac{10000\text{ml}}{1 \text{ m}^3} = 10.968 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Nota: El valor de 10.968 kg de lodo por metro cúbico representa aproximadamente el 1.1% de carga de solidos en 1000 litros, este valor cumple con lo citado anteriormente por Aguamarket 2010.

$$m[\text{kg}] = 87.5\text{m}^3 * 10.968 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 959.70 \text{ kg}$$

Masa de solido seco

$$L_s = 959.70 \text{ kg}$$

Determinación de velocidad de secado

$$R = - \frac{959.70 \text{ kg}}{175 \text{ m}^2} * \frac{dX}{dt}$$

$\frac{dx}{dt}$	R
-0.0047535	0.0260682
-	
0.00787156	0.0431677
-	
0.00860723	0.0472021
-	
0.00849008	0.0465596
-	
0.00785756	0.0430908
-	
0.00615917	0.0337769

-0.0051886	0.0284543
-	
0.00341211	0.018712
-	
0.00267058	0.0146455
-	
0.00139321	0.0076404
-	
0.00062197	0.0034109
-	
0.00037324	0.0020469
-	
0.00058328	0.0031987
-	
0.00066397	0.0036412

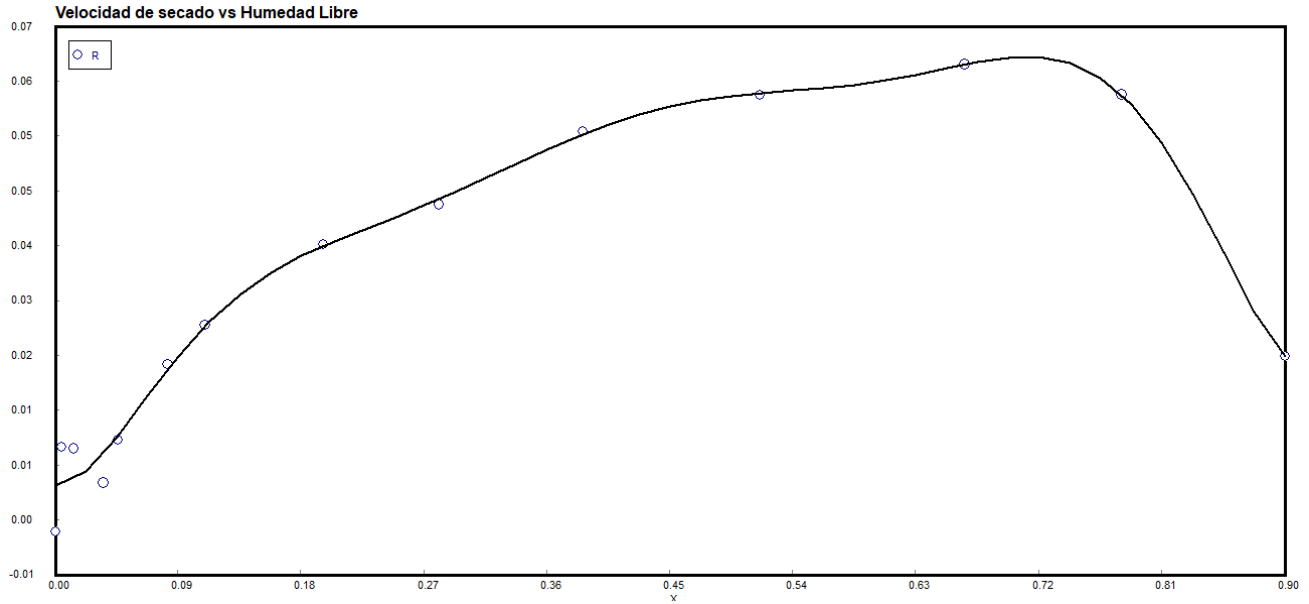
$$\begin{aligned}
 fx = & 0.003498 - 0.2135969 * x + 13.01671 * x^2 - 156.3388 * x^3 + 909.6698 \\
 & * x^4 - 2889.773 * x^5 + 5103.119 * x^6 - 4699.244 * x^7 \\
 & + 1757.706 * x^8
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 R = \int_{0.07}^{0.6851} (fx)dx = & 0.003498 * x - 0.1067985 * x^2 + 4.338903 * x^3 \\
 & - 39.08469 * x^4 + 181.934 * x^5 - 481.6288 * x^6 + 729.017 * x^7 \\
 & - 587.4055 * x^8 + 195.3006 * x^9
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$x(1) = 0.6851 \tag{8}$$

$$R = -0.0236536$$

Gráfica 3 Velocidad de secado vs Humedad libre



Fuente: Polymath 6.10 (2012)

R ²	0.9990908
R ² adj	0.9976361
Rmsd	0.0001366
Variance	7.31E-07

$$R_c = -0.0236536 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

Tiempo de secado en horas

$$t = - \frac{Ls}{A * R_c} (X_1 - X_2)$$

$$t = - \frac{959.70 \text{ kg}}{175 \text{ m}^2 * -0.0236536 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{hr}}} (0.6851 - 0.07) = 192.4342 \text{ hr}$$

$$t = 192.4342 \text{ hr} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hr}} = 8.018 \text{ día}$$

$$t \approx 8 \text{ días}$$

Nota: Si bien este análisis inicial nos permite comprender los fundamentos de la deshidratación del material, es fundamental reconocer que el proceso de secado debe ajustarse cuidadosamente en función de las condiciones operativas específicas y los volúmenes de recuperación deseados. Para ello, se requerirá un estudio más detallado de factores como el caudal de alimentación, los sistemas de drenaje y el tiempo de residencia.

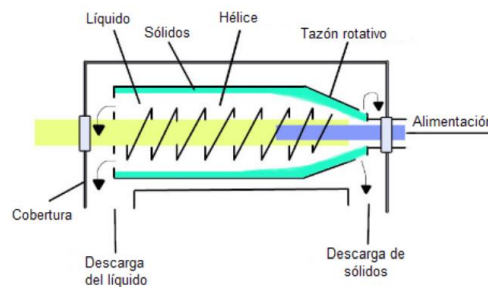
Sistemas de deshidratación mecánica

Los equipos principales utilizados en la industria para la deshidratación de lodos son los siguientes:

Centrifugación

La centrifugación es un proceso de separación sólido-líquido que aprovecha la fuerza centrífuga para acelerar la sedimentación de las partículas más densas hacia el exterior de un recipiente rotatorio. Esta técnica encuentra amplia aplicación en diversas industrias, desde la alimentaria hasta la farmacéutica, y permite obtener sólidos concentrados (torta) y un líquido clarificado. (Bioingepro, 2022)

Ilustración 9 Equipo centrifugador



Fuente: (Bioingepro, 2022)

Filtro Prensa

El tornillo prensa es un equipo de separación sólido-líquido que combina las funciones de espesamiento y deshidratación en un solo paso. El material de alimentación, o lodo, es transportado a través de un tornillo giratorio que lo comprime progresivamente, expulsando el líquido a través de las perforaciones de la carcasa. Este proceso permite obtener un sólido concentrado con un contenido de humedad típicamente entre 15% y 20%. Entre sus principales ventajas se encuentran la eliminación de la etapa de espesamiento previa, bajos niveles de ruido y consumo energético, así como la capacidad de autolimpieza.

Ilustración 10 Filtro Prensa



Fuente: Lenntech 2024

La capacidad de producción de un filtro de prensa es de entre 1.5 y 10 kg de sólidos por m² de superficie de filtración. para cada modelo de filtro de prensa el volumen de la cámara y la superficie de filtración depende del número de placas del filtro.

En términos prácticos el tiempo de prensado es menor de cuatro horas.

Una de las ventajas del filtro prensa es que pueden aceptar lodo con distinta capacidad de filtración. Es recomendable espesar el lodo antes de la operación en el filtro de prensado.

Aunque el lodo presenta gran capacidad de filtración permite capacidad de producción mayores, los filtros de prensa aceptan igualmente lodo con condiciones poco precisas para su

filtrado. Esta tolerancia significa que el sistema presenta condiciones de operabilidad seguras y con pocos riesgos. (Lenntech 2024)

1.4 Viabilidad económica

El tamaño del mercado de ladrillos con alto contenido de alúmina se valoró en 34,4 mil millones de dólares en 2023 y se prevé que alcance 47,8 mil millones de dólares en 2030 creciendo a una CAGR del 4,3% durante el período previsto 2024-2030. La industria de los refractarios está experimentando una transformación hacia modelos de producción más sostenibles. La creciente demanda de ladrillos de alta alúmina, combinada con la búsqueda de soluciones para gestionar los residuos industriales, ha generado un interés creciente en el aprovechamiento de lodos como materia prima. Esta estrategia no solo reduce el impacto ambiental, sino que también permite generar productos con mayor valor agregado. (verifiedmarketreports, 2024)

Ladrillos y bloques refractarios de alta alúmina

La alúmina es uno de los óxidos más estables desde el punto de vista químico, y ofrece una excelente dureza, resistencia y resistencia al desprendimiento. Los refractarios de aluminio son adecuados para el horno de revestimiento que funciona hasta 1850 ° C. Los refractarios de alúmina tienen las ventajas de una alta resistencia en la atmósfera oxidante y reductora y se utilizan ampliamente en las industrias de procesamiento térmico.

Asunto		LZ-80	LZ-75	LZ-70	LZ-65	LZ-60	LZ-55	LZ-48
Al ₂ O ₃ , /%	≥	80	75	70	65	60	55	48
Porosidad aparente, %	≤	21	24	24	24	26	22	22
Resistencia al aplastamiento en frío, MPa	≥	70	60	55	50	45	45	40
0.2 MPa refractariedad bajo carga, °C	≥	1530	1520	1510	1500	1430	1450	1420
Cambio lineal permanente, %		1500 °C * 2 h -0.4 ~ 0.2		1450 °C * 2 h -0.4 ~ 0.1				

Refractariedad excepcional: Presenta una refractariedad extremadamente alta, alcanzando temperaturas de hasta 1790 °C, lo que la hace ideal para aplicaciones en ambientes de alta temperatura.

Elevada temperatura de ablandamiento: Gracias a su alto contenido de alúmina y baja cantidad de impurezas, posee una temperatura de ablandamiento significativamente superior a la de los ladrillos refractarios tradicionales, garantizando una mayor estabilidad dimensional.

Excelente resistencia a la escoria: Demuestra una notable resistencia a la corrosión por escorias ácidas y alcalinas, lo que la hace adecuada para su uso en hornos y revestimientos expuestos a ambientes agresivos.

Alta resistencia al choque térmico: Su bajo coeficiente de expansión térmica minimiza el riesgo de fractura por cambios bruscos de temperatura, prolongando su vida útil.

Sólidas propiedades mecánicas: Ofrece una excelente resistencia a la compresión y flexión, lo que la convierte en un material estructural confiable en aplicaciones de alta temperatura.

La dosificación precisa de los componentes en la mezcla para la fabricación de ladrillos de alúmina es fundamental para garantizar la calidad del producto final y obtener costos de producción competitivos. Un análisis económico detallado, requiere conocer las proporciones exactas de los materiales y esta permitirá evaluar la viabilidad comercial de este proceso.

Dado que la experimentación requiere de una inversión significativa, el análisis económico actual es preliminar y sujeto a revisión una vez se disponga de más datos.

Para el análisis de manera teórica se pudo recabar la siguiente información.

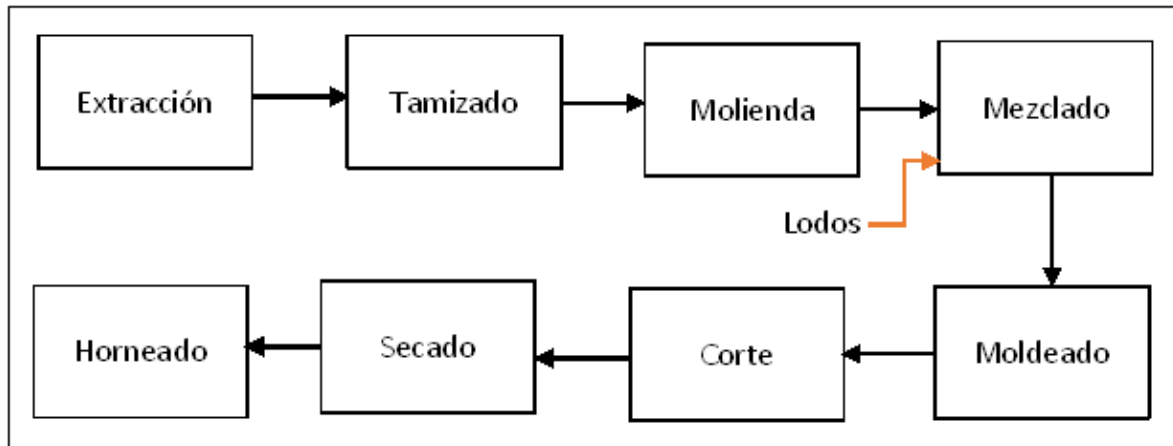
Tabla 3 Pruebas de mezclas y cantidad de ladrillos

Mezcla	Cantidad de lodo (kg)	Cantidad de arcilla (kg)	Unidades fabricadas
M1	30	1.470	500
M2	90	2.160	750
M3	180	2.820	1.000

Fuente: Marcela Muñoz 2016

Para la cocción de los ladrillos es importante recordar que el incremento de temperatura debe ser gradual durante las primeras 72 horas hasta alcanzar los 1200 °C, valor óptimo para la sinterización de los materiales y el desarrollo de las propiedades mecánicas deseadas.

Ilustración 11 Diagrama de bloques proceso de fabricación incluyendo lodo.



Fuente: Marcela Muñoz 2016

Para evidenciar el comportamiento de la dosificación del lodo en los ladrillos, se realiza una comparación de los parámetros de resistencia y absorción a ladrillos comunes y a los Ecobrick con esto determinar si se ve afectada la calidad del ladrillo o si es posible que el lodo la mejore. (Muñoz, 2016)

Ilustración 12 Resistencia a la compresión

Muestra	Resistencia MPa	Promedio (MPa)	Muestra	Resistencia MPa	Promedio (MPa)
Comun-1	62,6	51,9	Ecobrick-1	67,9	54,4
Comun-2	57,6		Ecobrick-2	64,2	
Comun-3	46,5		Ecobrick-3	54,2	
Comun-4	58,2		Ecobrick-4	30,9	
Comun-5	34,8		Ecobrick-5	54,9	

Fuente: (Muñoz, 2016)

Para la producción de este tipo de materiales según (Muñoz 2016) se requiere las siguientes inversiones

Equipo	Especificación	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Filtro prensa	Placas	1	\$ 84.476.144	\$ 84.476.144
Bomba	Autocebante de 2HP	1	\$ 863.600	\$ 863.600
Tanque	PVC 5000L	1	\$ 373.000	\$ 373.000
Tubería	PVC de 2"	5	\$ 53.676	\$ 268.380
Válvulas	Bola PVC 2" con doble universal	4	\$ 61.855	\$ 247.420
Subtotal				\$ 86.228.544
IVA				\$ 13.796.567
transporte				\$ 230.000
TOTAL				\$ 100.255.111

Esto al cambio de moneda en septiembre de 2024 sería aproximadamente de 24100\$

Es importante destacar que este estudio económico se realizó en Colombia en el año 2016, por lo que los costos de implementación en Bolivia requerirán ajustes significativos para reflejar las particularidades del mercado local.

Con el objetivo de maximizar el valor de los lodos aluminosos y reducir nuestros costos, buscamos establecer convenios con empresas interesadas en adquirir este material. Al transferir

la responsabilidad del transporte y disposición final a estas empresas, podremos enfocarnos en nuestras operaciones principales. A su vez, estas empresas obtendrán una materia prima de bajo costo, lo que les permitirá mejorar su competitividad en el mercado.

Una alternativa interesante consiste en adaptar un lecho de secado sobre el tanque de recuperación de agua o diseñar áreas de secado independientes que permitan recircular el agua filtrada. Esta solución no solo optimizará el consumo de agua, especialmente durante las épocas secas, sino que también reducirá los costos operativos asociados al suministro de agua fresca. Un estudio llevado a cabo en 2023 respaldó la factibilidad técnica y económica de esta propuesta, demostrando su potencial para mejorar la sostenibilidad ambiental del proceso.

Tabla 4 Costo de materiales para la construcción de un área de secado

Materiales Lecho de secado de arena					
Materiales	Altura(m)	Área (m ²)	Área (m ³)	Costo unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
Grava	0.15	175	26.25	80	2100
Gravilla	0.15	175	26.25	80	2100
Arena de cuarzo	0.2	175	35	1800	63000
Geotextil	-	175	-	7000	7000
Total (Bs)					74200

Fuente: Elaboración Propia

Los materiales a utilizar en el lecho de secado pueden variar según contrato con el proveedor, este solo sirve como un precio referencial.

La elección entre equipos mecánicos y sistemas de secado naturales debe basarse en una evaluación técnica y económica integral. Los equipos mecánicos, como centrífugas o filtros prensa, ofrecen una deshidratación rápida y eficiente, pero su adquisición y operación generan costos elevados. Los sistemas de secado naturales, por su parte, aprovechan la energía solar y el viento para deshidratar los lodos, lo que reduce los costos operativos. Sin embargo, su rendimiento puede verse afectado por las condiciones climáticas, requiriendo un diseño adecuado de los lechos de secado y sistemas de drenaje. Es esencial considerar factores como

la capacidad de tratamiento, la calidad del efluente y las condiciones climáticas locales para tomar una decisión informada.

Es importante tomar en cuenta sistemas de deshidratación natural, como los lechos de secado, presentan una serie de ventajas significativas en comparación con los equipos mecánicos. Al aprovechar la energía solar y el viento para evaporar el agua de los lodos, estos sistemas reducen significativamente el consumo energético y minimizan las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, su inversión inicial suele ser menor y los costos de operación son considerablemente más bajos.

CAPITULO II

DIAGNOSTICO

2.1 Análisis y discusión de la información obtenida.

El análisis de la viabilidad técnica y económica para la fabricación de ladrillos a partir de lodos aluminosos generados en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) El Rollo ofrece un panorama prometedor, pero con ciertos desafíos que requieren una evaluación cuidadosa. La información recabada sugiere que existe potencial para transformar estos lodos en una materia prima útil, lo que podría disminuir el impacto ambiental y generar productos de valor agregado. Sin embargo, para determinar la viabilidad de este proyecto, es necesario considerar tanto aspectos técnicos como económicos de manera detallada.

Viabilidad Técnica

Los lodos aluminosos que se generan en el proceso de coagulación-floculación de la PTAP están compuestos principalmente de precipitados de aluminio, arena, limo y otros materiales sólidos en suspensión, lo que les otorga ciertas propiedades físicas y químicas que podrían ser aprovechadas en la fabricación de ladrillos. De acuerdo con los análisis fisicoquímicos realizados, los lodos contienen una cantidad significativa de aluminio que, en combinación con otros materiales como arcilla, podría proporcionar una estructura adecuada para la elaboración de ladrillos refractarios o convencionales.

La adición de lodos aluminosos en la mezcla para fabricar ladrillos presenta ventajas potenciales, como el aprovechamiento de residuos que de otro modo requerirían una disposición controlada, además de reducir la dependencia de materias primas vírgenes. Sin embargo, uno de los principales desafíos técnicos es el secado de los lodos. El proceso de secado en lechos piloto ha mostrado que los lodos pueden deshidratarse en un periodo de 8 días, alcanzando una humedad residual del 20%. Esta característica permite manipular el material para integrarlo a la mezcla de ladrillos.

Una opción técnica adicional sería la utilización de equipos mecánicos para la deshidratación de lodos, como prensas de filtro o centrífugas, lo que podría acelerar significativamente el proceso de secado y beneficiar el transporte de los lodos para su uso en la fabricación de

ladrillos. Sin embargo, esta alternativa implica un mayor costo de inversión inicial y costos operativos elevados, lo que, dado el contexto local de Bolivia, podría no ser la opción más viable. Por ello, es preferible optar por la utilización de lechos de secado, aunque estos sean más lentos, son una solución más económica y sostenible.

Además, la implementación de lechos de secado podría complementarse con la adquisición de terrenos para su construcción, ya que el agua drenada en el proceso podría ser reutilizada en el ciclo de potabilización, especialmente en épocas secas donde el caudal de las fuentes de agua disminuye. Esto evitaría riesgos en el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Sucre, optimizando el uso de los recursos hídricos disponibles.

Viabilidad Económica

Desde el punto de vista económico, el mercado de ladrillos refractarios con alto contenido de alúmina es considerablemente atractivo, con una tasa de crecimiento estimada del 43% entre 2024 y 2030. Este tipo de ladrillos tiene aplicaciones importantes en la industria, especialmente en hornos y procesos de alta temperatura. El uso de lodos aluminosos podría reducir significativamente los costos de producción de ladrillos, al aprovechar un material de desecho que ya se genera en las plantas de tratamiento.

Sin embargo, a nivel local, el costo de implementar la tecnología necesaria para la producción de ladrillos a partir de lodos aluminosos debe considerarse cuidadosamente. Aunque el estudio presentado muestra una inversión estimada de \$24,100 para adaptar las infraestructuras existentes, este costo está basado en un análisis realizado en Colombia, por lo que los valores podrían variar en Bolivia. Factores como los costos de transporte, mano de obra, y energía, así como la disponibilidad de tecnologías para el secado y sinterización, deben ser evaluados para realizar un análisis más preciso.

En este contexto, se recomienda optar por la implementación de lechos de secado, ya que esta alternativa requiere una menor inversión inicial en comparación con los equipos mecánicos de deshidratación. A largo plazo, los lechos de secado también ofrecen beneficios adicionales, como la posibilidad de reutilizar el agua extraída para otros procesos de potabilización, lo cual

es especialmente valioso en épocas de baja disponibilidad de agua, ayudando a mantener un suministro estable para la ciudad de Sucre.

Además, el estudio muestra que la demanda de ladrillos en Bolivia es alta, lo que podría justificar la inversión inicial en el equipo y la infraestructura necesarios. La implementación de lechos de secado adicionales o el uso de sistemas de secado mecánicos también deben ser evaluados en función de la capacidad de producción requerida y las condiciones climáticas locales, ya que estas influirán directamente en los costos operativos.

Aspectos Ambientales y Legales

Desde una perspectiva ambiental, la reutilización de los lodos aluminosos para la fabricación de ladrillos podría contribuir a la sostenibilidad del proceso de tratamiento de agua. Al reducir la cantidad de residuos que necesitan disposición final, se minimizaría el impacto ambiental asociado a los vertederos y se promovería una economía circular. Asimismo, el uso de los lodos como materia prima reduce la extracción de arcillas naturales, contribuyendo a la conservación de los recursos geológicos.

Sin embargo, es importante considerar que el aprovechamiento de estos lodos estaría sujeto a las normativas ambientales locales. Según el Decreto Supremo N° 24176, la disposición de residuos industriales, como los lodos aluminosos, requiere permisos ambientales y un plan de gestión adecuado para evitar impactos negativos en el medio ambiente. Por lo tanto, antes de implementar este proyecto, sería necesario realizar una evaluación de impacto ambiental y obtener las autorizaciones pertinentes

CAPITULO III

CONCLUSIONES

El análisis técnico muestra que es factible utilizar los lodos aluminosos en la fabricación de ladrillos, siempre y cuando se superen ciertos desafíos relacionados con el secado y la proporción de los componentes de la mezcla. La tecnología de secado probada en lechos piloto ha demostrado ser eficaz, aunque la viabilidad a escala industrial requeriría una mayor optimización del proceso. La implementación de equipos mecánicos de deshidratación podría acelerar este proceso, pero su alto costo hace que, bajo las condiciones actuales, los lechos de secado sean la opción más viable y sostenible a largo plazo.

Desde el punto de vista económico, el proyecto podría ser rentable si se logran reducir los costos operativos y de inversión inicial, especialmente considerando el creciente mercado de ladrillos refractarios de alta alúmina. Se recomienda realizar un estudio más detallado para ajustar el análisis económico a las condiciones del mercado boliviano, así como explorar convenios con empresas locales que puedan estar interesadas en adquirir estos ladrillos.

Asimismo, sería conveniente continuar con las pruebas piloto en la obtención de ladrillos para optimizar la mezcla y el proceso de sinterización.

RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar a cabo un estudio de impacto ambiental para asegurar el cumplimiento de las normativas locales.

La adquisición de terrenos para lechos de secado no solo asegurará un método de deshidratación eficiente, sino que también permitirá aprovechar el agua drenada en épocas de sequía, reduciendo los riesgos de abastecimiento de agua a la ciudad de Sucre.

BIBLIOGRAFIA

Bioingepro, 2022. <https://bioingepro.com.ar>. [En línea]

Available at: <https://bioingepro.com.ar/2022/12/16/deshidratacion-de-lodos/>

[Último acceso: 1 Octubre 2024].

Csacement, 2021. <https://es.csacement.com>. [En línea]

Available at: <https://es.csacement.com/characteristics-of-the-high-alumina-fire-bricks.html>

[Último acceso: 28 Septiembre 2024].

Degremont, 1979. *Manual Técnico del agua*. Cuarta ed. Bilbao: Grafo S.A.

ELAPAS, 2023. <http://www.elapas.com.bo/contenido.php?id=4>. [En línea]

Available at: <http://www.elapas.com.bo/contenido.php?id=4>

[Último acceso: 5 Marzo 2023].

GARCÉS A. Fernando, D. A. J. C. y. D. N. O. M., 1996. *Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua*, Santiago de Chile: s.n.

IAGUA, 2019. <https://www.iagua.es>. [En línea]

Available at: <https://www.iagua.es/noticias/hach/monitorizacion-aluminio-reduce-riesgo-y-asegura-cumplimiento-normativa>

[Último acceso: 26 Septiembre 2024].

Kleber Gomes Ramirez, E. P. R. S. B. ,. C. C. M. C., 2018. Physico-chemical characterization of centrifuged of centrifuged sludge from the Tamandúá water treatment. *REVISTA MATERIA*.

mordorintelligence, 2023. <https://www.mordorintelligence.com>. [En línea]

Available at: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/refractories-market>

[Último acceso: 28 Septiembre 2024].

MUJICA F Viky C., P. C. L. G. y. O. M., 2006. *Propuesta técnica para el tratamiento y disposición final de los lodos*, Carabobo: Universidad de Carabobo.

Muñoz, M., 2016. *PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS STARTWATER COMO MATERIA PRIMA EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLO*. Bogota: s.n.

Nacional, H. C., 27 de abril 1992. *Ley Del Medio Ambiente No.1333*. La Paz: Gaceta Oficial Boliviana.

Torres, J. N. R., 2013. *Propuesta metodologica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilizacion en la sabana de Bogota*. Bogota: Universidad Libre.


Torres, P., 2012. Productive use of sludge from a drinking water treatment plant. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), pp. 145-154.

verifiedmarketreports, 2024. <https://www.verifiedmarketreports.com>. [En línea]

Available at: <https://www.verifiedmarketreports.com/es/product/high-alumina-bricks-market/> [Último acceso: 2 Octubre 2024].

ANEXOS

ANEXO A: Análisis fisicoquímico de lodos entrada a lecho

	DIVISIÓN CONTROL DE CALIDAD – ELAPAS		Código: FO-057	
	INFORME DE ENSAYO FISICOQUIMICO		Versión N°: 1	Página 1-1

**INFORME DE ENSAYO – LABORATORIO FISICOQUÍMICO
PARÁMETROS DE CONTROL DE CALIDAD DE LODOS - PTAP**

Registro N° .../2023....

INFORME DE ENSAYO N°		1		FECHA DE EMISIÓN INFORME		18/09/2023	
N° DE MUESTRA		1		ENCARGADO LABORATORIO		Ing. Eric Chavarria Flores	
N° DE REGISTRO DE ENSAYO		1					
DATOS DEL SOLICITANTE							
NOMBRE DEL SOLICITANTE				Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz			
DIRECCIÓN				Av. Omasuyos N°30			
PERSONA DE CONTACTO				Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz			
TELÉFONO CONTACTO				70318187			
DATOS DEL MUESTREO							
FECHA Y HORA DE MUESTREO				10/09/2023		Hrs: 9:00-10:00	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA				Lodos Extractor de Fangos			
FUENTE DE ABASTECIMIENTO				PTAP			
CANTIDAD APROXIMADA				3 L.			
SITIO DE MUESTREO				Filtros PTAP			
PTO. DE MUESTREO				Extractor de Fangos N°4			
COORDENADAS (GPS)				-19.022593, -65.285657			
TÉCNICA DE MUESTREO				Muestreo Puntual			
TEMPERATURA DE LA MUESTRA T(°C)				19.6			
MUESTREO POR:				Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz			
N° REGISTRO DE CADENA DE CUSTODIA (FO-031)				--			
CONDICIONES AMBIENTALES DE MUESTREO				T °C	25	H%	28
RESULTADOS DE ENSAYO							
ANÁLISIS REALIZADO POR				Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz Ing. Eric Chavarria Flores			
FECHA Y HORA DE INICIO DE ENSAYO				14/09/2023		Hrs: 9:00	
FECHA Y HORA DE FINALIZACIÓN DE ENSAYO				15/09/2023		Hrs: 13:00	
CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO				T °C	21.4	H%	48
N°	PARÁMETRO	RESULTADOS	LÍMITE MÁX. PERM. (L)	UNID.	DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	
2	Cianuro libre	0.010	0.2	mg/l CN	Cumple	Espectrofotométrico	
3	Cromo +6	0.065	0.1	mg/l Cr ⁺⁶	Cumple	Espectrofotométrico	
4	Hierro	0.15	1	mg/l Fe	Cumple	Espectrofotométrico	
5	pH (a 21.4 °C)	8.06	6.0-9.0		Cumple	Potenciométrico	
7	Sulfuros	0.030	2	mg/l S ⁻²	Cumple	Espectrofotométrico	
8	Nitritos	0.009	-	ug/l NO ₂ ⁻	Cumple	Espectrofotométrico	
11	Fenoles	N.D	1.0	mg/l fenol	Cumple	Espectrofotométrico	
12	Turbidez	20000	--	NTU	--	Nefelométrico	
13	Zinc	0.01	--	mg/L Zn	--	A.A	
14	Cadmio	0.005	--	mg/L Cd	--	A.A	
15	Plomo	-0.05	--	mg/L Pb	--	A.A	
18	Cobre	0.02	--	mg/L Cu	--	A.A	
21	Sólidos Sedimentables	700	--	ml/h	--	Volumétrico	

Nota 1: Los resultados reportados en la tabla se refieren únicamente a los ítems sometidos a este ensayo. El presente informe de ensayo no puede ser reproducido sin la autorización escrita de ELAPAS.

A.A = Absorción Atómica

Firma y Sello:
Fin del Informe

Ing. Eric Chavarria Flores
ENC. LAB. FISICOQUIMICA
E.L.A.P.A.S.

ANEXO B: Análisis fisicoquímico de lodos salida de lecho

	DIVISIÓN CONTROL DE CALIDAD – ELAPAS	Código: FO-057	
	INFORME DE ENSAYO FISICOQUIMICO	Versión N°: 1	Página 1-1

**INFORME DE ENSAYO – LABORATORIO FISICOQUIMICO
PARÁMETROS DE CONTROL DE CALIDAD DE LODOS - PTAP**

Registro N. /2023...

INFORME DE ENSAYO N°	1	FECHA DE EMISIÓN INFORME	30/10/2023			
N° DE MUESTRA	1	ENCARGADO LABORATORIO	Ing. Romer Méndez			
N° DE REGISTRO DE ENSAYO	--	DATOS DEL SOLICITANTE				
NOMBRE DEL SOLICITANTE	Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz					
DIRECCIÓN	Av. Omasuyos N°30					
PERSONA DE CONTACTO	Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz					
TELÉFONO CONTACTO	70118187					
DATOS DEL MUESTREO						
FECHA Y HORA DE MUESTREO	18/10/2023, Hrs. 9:00 A 10:00					
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Lodos de extractor de fangos					
FUENTE DE ABASTECIMIENTO	PTAP					
CANTIDAD APROXIMADA	3l.					
SITIO DE MUESTREO	Filtros PTAP					
PTO. DE MUESTREO	Extractor de Fangos N°4					
COORDENADAS (GPS)	-19.022593, -65.285657					
TÉCNICA DE MUESTREO	Muestreo Puntual					
TEMPERATURA DE LA MUESTRA T(°C)	19.6					
MUESTREADO POR:	Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz					
N° REGISTRO DE CADENA DE CUSTODIA	--					
CONDICIONES AMBIENTALES DE MUESTREO	T °C	25	H%	28		
RESULTADOS DE ENSAYO						
ANÁLISIS REALIZADO POR	Univ. Ana Belén López Montero Univ. Edwin Mijail Pinaya Soliz Ing. Romer Méndez Barrón					
FECHA Y HORA DE INICIO DE ENSAYO	24/10/2023, Hrs. 9:00					
FECHA Y HORA DE FINALIZACIÓN DE ENSAYO	26/10/2023, Hrs. 13:00					
CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO	T °C	21.4	H%	48		
N°	PARÁMETRO	RESULTADOS	LÍMITE MÁX. PERM. (*)	UNID.	DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD	MÉTODO DE ENSAYO
1	Cloruro libre	0.038	0.2	mg/L CN	Cumple	Espectrofotométrico
2	Cromo +6	0.281	0.1	mg/L Cr ⁶⁺	No Cumple	Espectrofotométrico
3	Hierro	2.23	1	mg/L Fe	No Cumple	Espectrofotométrico
4	pH (a 21.4 °C)	7.22	6.0-9.0		Cumple	Potenciométrico
5	Sulfuros	1.2	2	mg/L S ²⁻	Cumple	Espectrofotométrico
6	Nitritos	0.580	--	mg/L NO ₂ ⁻	Cumple	Espectrofotométrico
7	Fenoles	0.005	1.0	mg/l fenol	Cumple	Espectrofotométrico
8	Turbidez	578.0	--	NTU	--	Nefelométrico
9	Dureza de Calcio	189.2	--	mg/L Ca	--	Volumétrico EDTA
10	Dureza de Magnesio	68.8	--	mg/L Mg	--	Calculo
11	Dureza Total	258.0	--	mg/L Ca	--	Volumétrico EDTA
12	Alcalinidad Total	55.04	--	mg/L	--	Volumétrico
13	Aluminio	0.979	--	mg/L Al ³⁺	--	Espectrofotométrico
14	Cobre	0.076	--	mg/L Cu	--	Espectrofotométrico
15	Sulfatos	73	--	mg/L SO ₄ ²⁻	--	Espectrofotométrico
16	Sólidos Totales Disueltos	295	--	mg/l	--	Potenciométrico
17	Sólidos Sedimentables	24	--	ml/h	--	Volumétrico

Nota 1: Los resultados reportados en la tabla se refieren únicamente a los ítems sometidos a este ensayo. El presente informe de ensayo no puede ser reproducido sin la autorización escrita de ELAPAS

Firma y Sello:
Fin del informe

Ing. Romer Méndez Barrón
Jefe Div. Control de Calidad
E. L. A. P. A. S.

ANTES DE UTILIZAR ESTE DOCUMENTO VERIFICAR QUE CORRESPONDE A LA ÚLTIMA REVISIÓN
Última revisión: (1): 07/07/2022

ANEXO C: Análisis fisicoquímico de aluminio en lodos



UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
 Fundado el 15 de julio de 1986



N° C-29

ITA-SGC-FD-040.10

INFORME DE ENSAYO FISICO-QUIMICO N°: MAR - 127 / 2023

N. de Muestra: MAR/557-127		N. Solicitud: 557-2023	
Solicitante: EDWIN MIJAIL PINAYA SOLIZ			
Dirección: Av Omasuyos N° 30		Teléfono: 70318187	
Producto: LODO		N. de Lote: -----	
Cantidad Aprox.: 2 L	Envase: Plástico	Marca: -----	
Procedencia del Producto: Sicre		Fecha elab/venc.: FE:----- EV:-----	
Muestreado por: Edwin Mijail Pinaya Soliz		Fecha y hora Muestreo: 2023-10-09 11:00	
Lugar y punto de muestreo: PTAP El Rollo			
Fecha y hora Recepción en Laboratorio: 2023-10-09 11:26	Fecha y Hora de Ensayo: 2023-10-10 14:00	Fecha de Emisión Informe: 2023-10-13	
Condiciones Ambientales de ensayo: Temperatura °C: 21,8		Humedad relativa %: 25,0	

Observaciones: La muestra fue recibida en laboratorio con parámetros solicitados por el cliente, mediante formulario ITA-SGC-FD-044.Z0

RESULTADOS:

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	REFERENCIAS*		PRINCIPIO	NORMA DE ENSAYO
			Mínimo	Máximo		
Aluminio	mg/L	81,8	----	----	Espectro A.A	SM 3030-F / 1992

N° de Registro de datos: ITA-SGC-FD-093.10 - 103/2023

NOTA 1.- Los resultados reportados en la tabla se refieren unicamente a la muestra ensayada en laboratorio

(*) Ref. No existe norma boliviana especifica para el (los) parámetro (s) solicitado (s) en la muestra analizada.

Analista: M.R.T



[Signature]
 T.S. RESPONSABLE LABORATORIO MEDIO AMBIENTE Y RRHH INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS U.M.R.P.S.F.X.P.U.



[Signature]
 Lic. José Luis Yujra Román
 AUXILIAR DE ADMINISTRACIÓN INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS - ITA U.M.R.P.S.F.X.P.U.



NOTA: El presente informe de ensayo no puede ser reproducido total o parcialmente sin la autorización del ITA.



F. de Vigencia: 2019-01-01
 Dirección: Barrio Israel s/n (Zona Qara Punku) Teléfono: (591) (4) 6462672 6373894
 Email: ita.laboratorio@usfx.bo Web: tecnologia.usfx.bo/ita Casilla de correo No 368 Sucre - Bolivia