



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

“Análisis del polielectrolito óptimo en el proceso de acondicionamiento de lodos biológicos previo a la deshidratación con filtros banda en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba”

**Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Químico**

Autores:

Johanna Cristina Llivisaca Chiqui

crisrina.llivi22@gmail.com

CI: 1717854143

Marco Adrián Peláez Vera

marpelv@hotmail.com

CI: 0104982285

Directora:

Ing. Maritza Eleanor Flores Zamora

CI: 0102171642

Cuenca, Ecuador

22/octubre/2021



Resumen:

El proceso que se lleva a cabo en la planta de deshidratación de lodos de Ucubamba es fundamental, pues evita la contaminación de ecosistemas que podrían verse afectados por un mal manejo de estos. La deshidratación contempla una reducción del volumen y contenido de agua que componen los lodos, para que los lodos puedan ser deshidratados la planta los acondiciona con floculantes de tipo catiónico.

El objetivo del presente trabajo fue encontrar el floculante que permita obtener un contenido de humedad en torta con un porcentaje inferior al 70%. De los 12 polímeros considerados, se preseleccionaron 4, para ello se analizó las dosis y la velocidad de mezcla en un equipo de jarras.

Una vez concluida la etapa experimental se desarrolló una hoja de cálculo que permitió conocer y controlar parámetros claves como: caudales, concentraciones y velocidades de agitación de los equipos que se usan en el proceso en planta, se probó las distintas configuraciones, obteniéndose como mejores resultados dos floculantes que cumplen con el propósito previsto.

PALABRAS CLAVE: Floculante. Polímero. Dosis. Concentración. Velocidad de mezcla. Prueba de jarra.



Abstract:

The process carried out in the Ucubamba sludge dehydration plant is fundamental, since it avoids the contamination of ecosystems that could be affected by their mismanagement. Dehydration contemplates a reduction in the volume and content of water that make up the sludge, so that the sludge can be dehydrated, the plant conditions it with cationic type flocculants.

The objective of this work was to find the flocculant that allows obtaining a moisture content in cake with a percentage lower than 70%. Of the 12 polymers considered, 4 were preselected, for which the doses and mixing speed were analyzed in a jar equipment.

Once the experimental stage was concluded, a spreadsheet was developed that allowed to know and control key parameters such as: flow rates, concentrations and stirring speeds of the equipment used in the plant process, the different configurations were tested, obtaining the best results two flocculants that serve their intended purpose.

KEY WORDS: Flocculating. Polymer dose. Concentration. Mixing speed. Jar test



ÍNDICE GENERAL

OBJETIVOS	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
CAPÍTULO I.....	15
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Antecedentes	15
1.2. Planteamiento del problema.....	16
1.3. Justificación	16
CAPÍTULO II	17
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Tratamiento de Aguas Residuales	17
2.1.1. Introducción	17
2.1.2. Aguas residuales.....	17
2.1.3. Constituyentes de las aguas residuales	18
2.1.4. Clasificación del sistema de tratamiento de aguas residuales	19
2.2. Lodos residuales	23
2.3. Tratamiento de lodos	23
2.3.1. Pre tratamiento de lodos	26
2.3.2. Espesamiento de lodos.....	27
2.3.3. Estabilización de lodos.....	29
2.3.4. Acondicionamiento de lodos	30
2.3.5. Desinfección de lodos	33
2.3.6. Deshidratación de lodos.....	34
2.3.7. Secado de lodos	36
2.3.8. Reducción térmica de lodos	36
2.3.9. Evacuación o disposición final de lodos	37
2.4. Pruebas de jarras.....	37
2.3.10. Tamaño del floculo.....	39
2.5. Directrices para la gestión de biosólidos actual	40
CAPÍTULO III	42
3. METODOLOGÍA	42
3.1. Diagrama del flujo de la metodología del proceso de investigación.....	42
3.2. Revisión bibliográfica y Reconocimiento	43
3.3. Diseño experimental	44
3.4. Recolección datos operaciones.....	45



3.5. Experimentación	45
3.1.1. Extracción y toma de muestras	46
3.1.2. Preselección	47
3.1.3. Procedimiento para la selección de los floculantes	49
3.6. Implementación en planta	52
CAPÍTULO IV	57
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
4.1. Reconocimiento de la planta	57
4.2. Datos operacionales	62
4.3. Desarrollo de la parte experimental	65
4.4. Implementación en planta	83
CAPÍTULO V	90
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1. Conclusiones	90
5.2. Recomendaciones	90
CAPÍTULO VI	91
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Naturaleza de las aguas residuales.....	18
Figura 2: Tecnologías aplicadas en el tratamiento de Aguas Residuales.	19
Figura 3: Diagrama de flujo proceso de investigación	34
Figura 4: Vista panorámica de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba.....	43
Figura 5: a) Laguna Facultativa #1, b) 2 tanques sedimentadores y 1 tanque de almacenamiento de lodos espesados, c) Silo de 60m ³ de capacidad en proceso de descarga, d) Funcionamiento de filtros banda 2 y 3 dentro de la planta de deshidratación de lodos, e) Laboratorio principal de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba.....	44
Figura 6: Diagrama del proceso de deshidratación de lodos de la PTAR de Ucubamba.	45
Figura 7: Muestras de floculantes que se nos fueron entregados.....	46
Figura 8: Toma de muestra de lodos de la laguna facultativa #1	46
Figura 9: Agitación del tanque de lodos previa experimentación	47
Figura 10: Balanza digital Mettler Toledo Monobloc modelo AB204-S.....	48
Figura 11: Floculantes en solución listos para su uso.....	48
Figura 12: Equipo de prueba de jarras en pleno funcionamiento	49



Figura 13: Muestras de sobrenadantes y sus respectivas disoluciones previo a medición de turbiedad50

Figura 14: Turbidímetro marca HACH junto a sus patrones para establecer la curva de calibración51

Figura 15: Equipo de filtración y balanza52

Figura 16: Saco de 25kg de floculante utilizado52

Figura 17: Punto de convergencia de los caudales de lodos y floculante diluido55

Figura 18: Display del analizador de humedad marca Mettler Toledo55

Figura 19: Planta de deshidratación de lodos de Ucubamba57

Figura 20: Diagrama de procesos de la planta de deshidratación de lodos de Ucubamba57

Figura 21: Esquema del funcionamiento en línea en la deshidratación de lodos de la planta de Ucubamba58

Figura 22: Draga flotante58

Figura 23: Tablero de control de la draga flotante59

Figura 24: Línea de succión en el perímetro de la laguna facultativa60

Figura 25: Espesadores conteniendo lodos y vacíos60

Figura 26: Tanque de almacenamiento de lodos espesados61

Figura 27: Tablero de control del proceso de deshidratación de lodos62

Figura 28: Resultados obtenidos con el floculante FLOPAM 830 a diferentes concentraciones68

Figura 29: Resultados obtenidos con el floculante ANIÓNICO a diferentes concentraciones69

Figura 30: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante AKA 840073

Figura 31: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante FLOPAM 904175

Figura 32: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante FLOPAM 83077

Figura 33: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante PRAESTOL79

Figura 34: Peso de agua drenado por cada floculante analizado81

Figura 35: Comparación de la dimensión del flóculo82

Figura 36: Menú principal del programa para ajustar caudales84

Figura 37: Ejemplo para la configuración de caudales de lodo y floculante84

Figura 38: Ejemplo del cálculo de las concentraciones en los caudales de la mezcla lodo/polímero y agua de dilución84



Figura 39: Ejemplo para conocer la concentración a la cual se está preparando la dilución en el tanque preparador de floculante líquido85

Figura 40: Floculación con FLOPAM a distintas concentraciones86

Figura 41: Floculación con AKA 8400 y % de humedad en el lodo resultante.87

Figura 42: Floculación con PRAESTOL.....88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Componentes inorgánicos presentes en las aguas residuales..... 19

Tabla 2: Principales métodos empleados para el tratamiento y evacuación del fango.24

Tabla 3: Procedimientos de espesado típicos27

Tabla 4: Tecnologías de Deshidratación34

Tabla 5: Índice de Willcomb.40

Tabla 6: Valores de caudales de lodo por cada paso en el potenciómetro.63

Tabla 7: Valores de caudales de floculante por cada paso en el potenciómetro.....63

Tabla 8: Humedades de las tortas obtenidas mediante análisis de laboratorio.....64

Tabla 9: Tabla de resultados de la preselección de floculantes.....65

Tabla 10: Promedio del porcentaje de humedades por cada floculante ensayado70

Tabla 11: Promedio de turbiedades iniciales por cada floculante ensayado70

Tabla 12: Resultados en la selección del mejor floculante.....71

Tabla 13: Tabla de resultados en la selección del mejor floculante en base a su % de remoción de turbiedad.....80

Tabla 14: Tabla de resultados en la selección del mejor floculante en base a su drenabilidad81



Clausulas legales

Cláusula de Propiedad Intelectual

Marco Adrián Peláez Vera, autor/a del trabajo de titulación "Análisis del polielectrolito óptimo en el proceso de acondicionamiento de lodos biológicos previo a la deshidratación con filtros banda en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, Ecuador

22/octubre/2021

MARCO ADRIAN PELAEZ VERA

C.I: 0104982285



Clausulas legales

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Marco Adrián Peláez Vera en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis del polielectrolito óptimo en el proceso de acondicionamiento de lodos biológicos previo a la deshidratación con filtros banda en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Ecuador

22/octubre/2021

MARCO ADRIAN PELAEZ VERA

C.I: 0104982285



AGRADECIMIENTOS

A ETAPA E.P por permitirnos la apertura dentro de sus instalaciones, así como también al Ing. Luis Felipe Díaz, por su tiempo y paciencia para concluir este trabajo y no nos podríamos olvidar de los señores Christian, Mauro y su equipo, quienes prestaron su tiempo y conocimiento.

A mis padres Manuel y Gloria quienes con infinitas lecciones han hecho de mí un hombre íntegro, crítico y sensible ante las adversidades que nos presenta el mundo, también dedico un pensamiento a Jairo y Paz por su contribución para forjarme como hombre disciplinado.

A la Ing. Maritza Flores por ser la guía en este trayecto, quien con su tiempo y paciencia ha sabido guiarnos hasta la culminación de esta etapa.

Un pequeño guiño a todos los que me rodean y principalmente a ti, Daniela Melissa, por todos los valores que me transmitiste. Estos me permitieron hacer realidad este viejo deseo de la infancia y para concluir, hoy, mi vida de estudiante. Eterna gratitud.

Marco



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme aliento en los momentos más difíciles porque sin su ayuda nada hubiese sido posible.

Un especial agradecimiento a nuestra tutora Ingeniera Maritza Flores, que nos supo guiar en cada una de las etapas que conllevó el desarrollo de este trabajo.

También agradezco a ETAPA EP, por brindarnos todo su apoyo en el trabajo de investigación que se llevó acabo dándonos todos los recursos necesarios para ello.

De igual manera quiero agradecer a mi compañero por todo su apoyo y trabajo.

Por último, quiero gradecer a mi familia en especial a mi mamá por su apoyo incondicional como también a mis hermanas que han sido un apoyo de vital importancia en esta etapa de mi vida.

Muchas gracias a todos.

Cristina



DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis personas de 5ta dimensión Geovanna y Paz, quienes estoy seguro me observan con cariño.

A mis padres por tanta paciencia durante mi periodo universitario.

A mi hermano Ricardo, para que veas en mí los tropiezos que se pueden evitar durante ese recorrido intelectual llamado Universidad.

Marco



DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi mamá por su cariño, paciencia, apoyo, consejos y, sobre todo, valor para seguir adelante.

A mis hermanas, Blanca, Diana y Gissela que han sido pilares fundamentales en mi vida.

Cristina



OBJETIVOS

Objetivo general

- Analizar el polímero óptimo en el proceso de acondicionamiento de lodos biológicos que permita una posterior deshidratación de lodos con una humedad inferior al 70%, en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba.

Objetivos específicos

- Seleccionar las variables que intervienen en el proceso de acondicionamiento de lodos.
- Establecer una metodología de selección de polímero adecuado para el proceso
- Obtener la curva de dosificación de cada polímero a partir de ensayos en la prueba de Jarras
- Establecer una estandarización del proceso de acondicionamiento de lodos



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Uno de los recursos no renovables más preciados hoy en día es el agua por ello a nivel mundial es de suma importancia los tratamientos de la misma con la finalidad de hacerla apta para el consumo humano.

Por otro lado, se presenta la problemática del manejo de las aguas residuales tanto domésticas como industriales. Se conoce que en países latinoamericanos y caribeños se centran más en los tratamientos de aguas residuales (CONAGUA, 2015). Es decir; su enfoque está dirigido mayormente a los tratamientos físicos, químicos y biológicos que existen con la finalidad de eliminar los diferentes contaminantes presentes en las aguas residuales. Debido a esto, las inversiones se dirigen en gran parte al abastecimiento de agua potable, drenaje y en el mismo tratamiento de aguas residuales. Como resultado se minimiza la importancia del tratamiento, manejo y disposición de lodos residuales, los mismos que provienen tanto de plantas de potabilización de aguas como de plantas de tratamiento de aguas residuales. El poco interés que se presta al manejo de lodos se evidencia en la falta de normativas en diferentes países de Latinoamérica y el Caribe.

En Ecuador no se cuentan con estudios suficientes para determinar con exactitud el impacto ambiental que tienen los lodos residuales que en muchos de los casos son depositados en cauces de ríos y en el mejor de los casos en rellenos sanitarios. Se desconoce la cantidad exacta de lodos generados en las diferentes plantas de tratamientos a nivel nacional; no obstante, la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba ubicada al Noreste de la ciudad de Cuenca, tiene como objetivo tratar el 95% de las aguas residuales generadas en la ciudad. (ETAPA EP).

Esta planta tiene una extracción anual de 18250 toneladas de lodos en la primera fase, luego pasa a una segunda fase de extracción de 2000 toneladas aproximadamente de lodos. (Durazno, 2009).

La forma en la que la planta disminuye el contenido de humedad en los lodos, es mediante una deshidratación mecánica en filtros banda, esto logra que el grado de complejidad que representaría el transporte de cierto volumen de lodos se torne mucho más fácil al disminuir su contenido de agua, en consecuencia, el acondicionamiento de los lodos es un etapa previa que debe analizarse con cuidado, pues tomarlo a la ligera tornaría difícil los procesos subsecuentes dando como resultado un porcentaje de



deshidratación en los lodos superior al 70% lo que conllevaría un aumento en el costo del transporte y disposición final en el relleno de sanitario de Pichacay.

1.2. Planteamiento del problema

En el presente trabajo se realizará la determinación del floculante que permita obtener un contenido de humedad menor al 70% mediante el previo acondicionamiento de lodos dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba esto con la finalidad de reemplazar el floculante usado previamente en el proceso mencionado, para ello se identificará los factores y características que se engloban en el mismo.

Se plantea encontrar la dosis óptima en función de los caudales de entrada de lodos, y se tomará como válido, el floculante, que presentase las características necesarias para alcanzar un porcentaje de agua en los lodos menor al 70% esto con la finalidad de reducir su volumen, mejorar los costos de transporte y minimizar la generación de lixiviados una vez dispuestos en el relleno sanitario de Pichacay.

1.3. Justificación

El estudio planteado en el proyecto de titulación será realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba de la ciudad de Cuenca, dentro del complejo de deshidratación de lodos.

En este contexto, se conoció que la planta frecuentaba el uso de un floculante catiónico para su acondicionamiento previa a la deshidratación.

Debido a la pandemia ocasionada por el virus COVID-19 la disponibilidad de este polímero ha supuesto un problema para la planta y por consiguiente una búsqueda de nuevas alternativas para el reemplazo del mismo, por tal razón se propuso realizar un estudio para el reemplazo del floculante.

En primera instancia se propuso analizar todas las fases que se contemplan dentro del proceso general de deshidratación. Como segundo paso es realizar una preselección de floculantes por medio de ensayos en jarras a modo de evidenciar la formación de flóculos. Como tercer paso es la experimentación con floculantes preseleccionados, a diferentes concentraciones y velocidades de agitación y con un tiempo de contacto invariable, los floculantes poseerán diferentes características de tal manera que se podrá realizar una comparación de resultados entre cada uno de ellos. Por penúltimo, obtenidos los resultados en las pruebas de jarras y establecidas las condiciones de trabajo para cada floculante, se experimentará en la planta. Finalmente, se dejará sentado un archivo estandarizado que involucrará varios factores que se engloban en el proceso de deshidratación de lodos, con el objetivo de conseguir una deshidratación menor al 70% y mantener la planta operativa.



CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este estudio es primordial conocer los tratamientos que se dan a las aguas residuales previo a la generación de residuos comúnmente llamados lodos, los mismos que durante su manejo sufrirán tratamientos físicos y químicos antes de su uso o disposición final.

2.1. Tratamiento de Aguas Residuales

2.1.1. *Introducción*

El agua al ser uno de los recursos no renovables más valiosos para la vida, ha tomado una mayor seriedad con respecto al manejo de esta. Hoy en día existen regulaciones a nivel mundial como nacional, uno de los enfoques primordiales es el manejo de aguas residuales (domesticas e industriales) a las cuales buscan darle tratamientos físicos y químicos previo a su descarga, con el fin de no disminuir la calidad del agua de los efluentes en los que estos son descargados.

Los tratamientos dependerán de la composición de las aguas a tratar, modificando así sus condiciones microbiológicas, químicas y físicas.

2.1.2. *Aguas residuales*

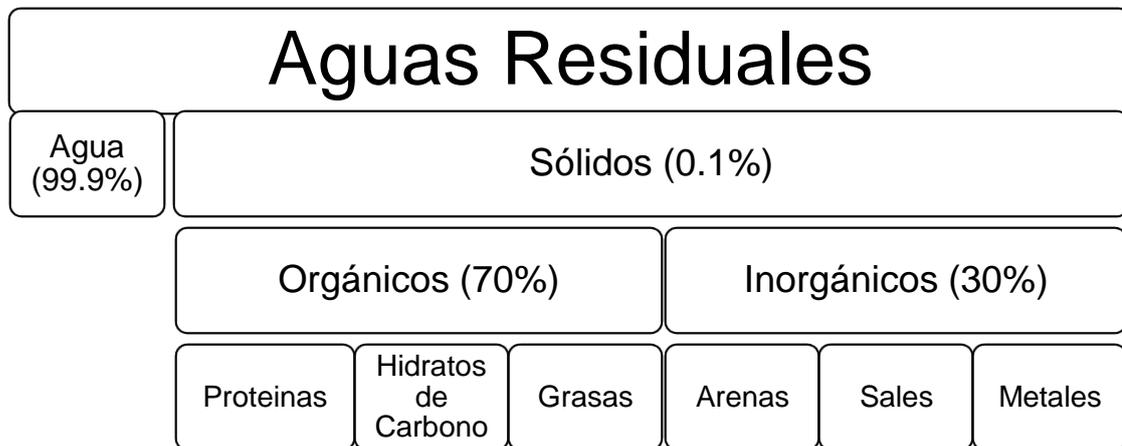
Aguas servidas son el resultado del uso industrial o doméstico, denominadas también, como: aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Las mismas que al ser usadas en procesos de transformación estas constituyen un residuo, no siendo utilizable de manera directa. Las residuales presentan composiciones variadas y suelen ser generadas principalmente por descargas de usos tanto municipales como industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos;

es decir; de cualquier uso como también la mezcla de varias de ellas. (Kadlec y Knight, 1996).

Las aguas residuales al tener composiciones variadas tienen comportamientos desconocidos en los organismos vivos. Los principales inconvenientes de las aguas residuales son los siguientes:

- Malos olores y sabores
- Acción tóxica (letales, subletales, agudos, crónicos, acumulativos)

En cuanto a esto es importante conocer la naturaleza de las aguas residuales.



2.1.3. Constituyentes de las aguas residuales

Figura 1: Naturaleza de las aguas residuales. Fuente (Henry & Heinke, 1999)

Los sólidos presentes pueden ser orgánicos e inorgánicos. En los compuestos orgánicos podemos citar los hidrocarburos aromáticos policíclicos que pueden ser cancerígenos, también podemos tener fenoles, compuestos organometálicos. En los compuestos inorgánicos podemos tener amonio, cianuros, fluoruros, sulfuros, sulfitos y nitritos. Los componentes inorgánicos se resumen en la siguiente tabla. (Henry & Heinke, 1999)



Tabla 1: Estructuras inorgánicas presentes en las aguas residuales

Componentes	Descripción
Cloruros y sulfatos	Presentes normalmente en agua y en residuos humanos
Nitrógeno y fósforo	En sus diversas formas (orgánicas e inorgánicas) en residuos de humanos, con fósforo adicional de los detergentes
Carbonatos y Bicarbonatos	Normalmente presentes en el agua y en los residuos como sales de calcio y de magnesio
Sustancias tóxicas	Arsénico, cianuro y metales pesados como Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn, presentes en los residuos industriales.

Fuente: (Henry & Heinke, 1999)

Una vez conocida la composición de las aguas residuales se puede determinar los tratamientos físicos, químicos, biológicos que se aplicarán con el objetivo de producir u obtener un efluente reutilizable en el ambiente como también un residuo semisólido (lodos) que serán adecuados para su uso posterior o disposición final. (Menendez & Perez, 2007)

2.1.4. Clasificación del sistema de tratamiento de aguas residuales

En el tratamiento de aguas residuales se aplica diferentes tecnologías que van a ir combinadas para formar un proceso de tratamiento de aguas residuales.

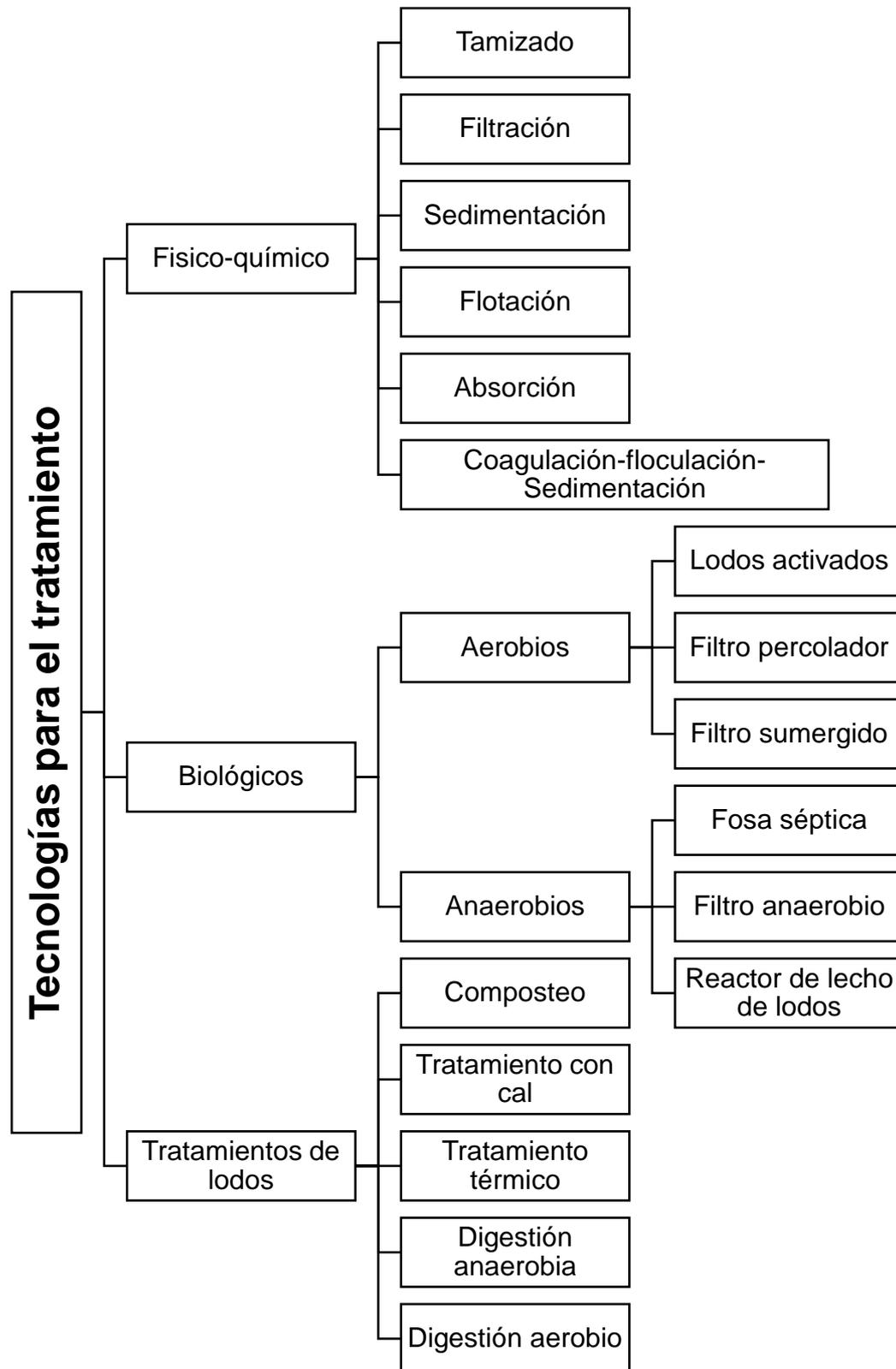


Figura 2: Tecnologías aplicadas en el tratamiento de Aguas Residuales. (Espinoza & Zumba, 2018)



Una planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra formada por un sistema de niveles de tratamientos, los cuales son:

❖ Tratamiento preliminar o pretratamiento

Destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables evitando problemas operacionales o de mantenimiento, y en algunos casos conlleva un proceso de preaireación. Por lo general se utiliza escribas o rejillas para separar los residuos y en algunos casos trituradores con el fin de reducir el tamaño de los residuos. (Espinoza & Zumba, 2018)

En esta etapa se llevará a cabo tres operaciones, que son: cribado, desarenado, homogeneización. (Ramalho, 1996).

❖ Tratamiento primario

Esta etapa se puede alcanzar una remoción de sólidos suspendidos del 60% y un 30% en la DBO. (Espinoza & Zumba, 2018)

La remoción se logra mediante sedimentación que divide los componentes del agua en dos fases por gravedad. Después mediante tamizado se elimina materiales flotantes. (Bioingeniería de Aguas Residuales, 2005)

❖ Tratamiento secundario

Este tiene como objetivo principal reducir la materia orgánica, basándose en un proceso biológico donde microorganismos consuman la materia orgánica por medio de coagulación. (Bermeo, 2016)

Los procesos biológicos pueden ser anaerobios y aerobios, siendo su principal objetivo reducir el fósforo y nitrógeno, esto se explica a continuación. (Espinoza & Zumba, 2018)



Digestión anaerobia: El principio de este proceso se basa en la degradación de materia orgánica presente en el lodo en ausencia de oxígeno. Se trabaja con lodos primarios y secundarios, los cuales se convierten en dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Teniendo como resultado lodos estabilizados con baja carga orgánica como también baja cantidad de microorganismos patógenos vivos. (Tratamiento de Lodos, s.f).

Digestión aerobia: Este método es empleado comúnmente en plantas con capacidad diaria sea menor a 20.000 m³. (WEF, 2010)

A comparación del método anaerobio este presenta un menor gasto de construcción, pero su costo de operación es muy elevado, esto se debe al suministro continuo de oxígeno que se necesita para su funcionamiento. (Limón, 2013)

Cabe mencionar que el lodo resultante tiene pobres características para ser aplicado posteriormente a deshidratación mecánica. (Tratamiento de Lodos, s.f)

El método se basa en el agotamiento de substrato disponible, por lo que los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma obteniendo de esta manera energía necesaria para las reacciones para el mantenimiento celular. (Tratamiento de Lodos, s.f)

Cabe destacar que este proceso es el más empleado y a su vez uno de los más costosos (construcción), pues este requiere un reactor que trabaje a las condiciones adecuadas para calentar los lodos, pero sin que estos se desestabilicen por sus altas concentraciones de amonio. (Limón, 2013)

❖ Tratamiento terciario o avanzado

Está dirigido a la reducción final de la DBO; metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos. El tratamiento terciario se emplea a menudo con el propósito de mejorar aún más la calidad microbiana de procesos de tratamiento secundario. (López Vázquez et al., 2017).



2.2. Lodos residuales

Se entiende como lodos residuales aquellos lodos producidos en los tratamientos biológicos de aguas residuales pueden provenir de los sedimentadores primarios y secundarios como también de los tratamientos terciarios. Estos lodos están constituidos fundamentalmente de materia orgánica. (Menéndez & Pérez, 2007)

En los tratamientos físico-químicos como la coagulación, los lodos que se producen son eminentemente de naturaleza inorgánica. Uno u otro lodo posee en su composición agua en un alto porcentaje dificultando su manejo y disposición. Según la naturaleza de los lodos; es decir; orgánico o inorgánico será la que defina el tratamiento al que deben ser sometidos antes de su disposición final. (Menéndez & Pérez, 2007)

2.3. Tratamiento de lodos

La finalidad del tratamiento de lodos provenientes de procesos de tratamientos de potabilización de agua, es la remoción del agua presente reduciendo así el volumen y posteriormente ser tratados o dispuestos finalmente. (Gutiérrez, Ramírez, & Rivas, 2014)

La aplicación de tecnología como la deshidratación y espesamientos de lodos reducen costos tanto de manejo como transporte de los mismos, de igual manera la adición de polímeros sintéticos ha sido probada con eficiencia para el mismo fin aumentando así la velocidad de sedimentación y la densidad de los flóculos. (Cancino & Vargas, 2015)

Comúnmente las plantas de tratamiento de aguas cuentan con tres fases para el tratamiento de lodos que consta de espesamiento, deshidratación y disposición final, los mismos dependen esencialmente del contenido de sólidos presentes en la matriz de lodos. (Gutiérrez, Ramírez, & Rivas, 2014)



Tabla 2: Principales métodos empleados para el tratamiento y evacuación del fango.

Operación unitaria, proceso unitario, o método de tratamiento		Función
Operaciones de	Dilaceración	Reducción de tamaño
	Desarenado	Eliminación de arenas
	Mezclado	Homogeneización
	Almacenamiento	Almacenamiento
Espesamiento	Por gravedad	Aumentar contenido de sólidos
	Por flotación	
	Por centrifugación	
	Por gravedad en filtros banda	
	En tambor rotativo	
Estabilización	Estabilización con cal	Eliminación de patógenos y olores, recuperación de productos
	Tratamiento térmico	
	Digestión anaerobia	
	Digestión aerobia Compostaje	
Acondicionamiento	Acondicionamiento químico	Adecuación del lodo
	Tratamiento térmico	



Desinfección	<p>Pasteurización</p> <p>Almacenamiento a largo plazo</p>	<p>Desinfección</p>
Deshidratación	<p>Filtro de vacío</p> <p>Centrífuga</p> <p>Filtro banda</p> <p>Filtro prensa</p> <p>Eras de secado</p> <p>Lagunaje</p>	<p>Reducción de volumen, almacenamiento</p>
Secado	<p>Instantáneo</p> <p>Por pulverización</p> <p>En horno rotativo</p> <p>En horno de pisos múltiples</p> <p>Evaporación de efecto múltiple</p>	<p>Reducción de peso, reducción de volumen.</p>
Reducción térmica	<p>Horno de pisos múltiples</p> <p>Horno de lecho fluidificado</p> <p>Oxidación por vía húmeda</p> <p>Reactor vertical de pozo profundo</p>	<p>Reducción de volumen, recuperación de energía, eliminación de patógenos y olores.</p>



Evacuación final	Aplicación al terreno Distribución y comercialización Fijación química A vertedero Lagunaje	Evacuación final, usos beneficios, reducción de volumen
-------------------------	---	--

Fuente: (Eddy, 1995)

2.3.1. Pre tratamiento de lodos

La finalidad de esta etapa es conseguir un lodo homogéneo/constante para la alimentación de las etapas consiguientes. (Guilmain, 1990)

Algunas de las operaciones de pretratamiento pueden ser:

- Dilaceración: en este proceso se corta o desmenuza los sólidos de mayor tamaño en sólidos más pequeños para impedir obstrucciones en los equipos. (CONAGUA, 2015)
- Desarenado: en este proceso por medio de ciclones se busca separar la arena de los lodos por medio de fuerzas centrífugas. (CONAGUA, 2015)
- Mezclado: por medio de este proceso se espera obtener lodos uniformes en la alimentación de las siguientes etapas. (Guilmain, 1990)
- Almacenamiento: se aplica este proceso con la finalidad de evitar oscilaciones en la producción de lodos. (Guilmain, 1990)



2.3.2. *Espesamiento de lodos*

Este proceso tiene como objetivo el incrementar el contenido de sólidos por unidad de volumen, logrando así remover parte del agua. Otro objetivo de este proceso es reducir los costos de operación en los sistemas de tratamiento de lodos. (Amador - Díaz & Veliz Lorenzo & Bataller - Venta, 2015)

Con el espesamiento de lodo se consigue disminuir el volumen del lodo hasta el 35% de la inicial, siendo de gran beneficio para tratamientos posteriores como acondicionamiento, deshidratación., necesitando menor espacio. (CONAGUA, 2015)

Los métodos más empleados en el espesamiento de lodo, son los siguientes:

- Espesamiento por gravedad
- Espesamiento por flotación
- Espesamiento por centrifugación (Amador - Díaz & Veliz - Lorenzo & Bataller - Venta, 2015)

Tabla 3: Procedimientos de espesado típicos

	Tipo de rango	Frecuencia de uso y éxito obtenido
Gravedad	Primario crudo	Utilizado a menudo, excelentes resultados
	Primario crudo y fango activado en exceso	Utilizado a menudo, especialmente en plantas pequeñas; resultados satisfactorios con concentraciones de fango variable entre el 4 y 6%. En



		plantas de grandes dimensiones, las ventajas son mínimas.
	Fango activado en exceso	Utilizado en pocas ocasiones; pobres concentraciones de sólidos. (2-3%)
Flotación por aire disuelto	Primario crudo y fango activado en exceso	Uso limitado; resultados similares a los de los espesadores por gravedad
	Fango activado en exceso	Uso común; buenos resultados (concentraciones de fango variables entre el 3,5 y 5%)
Centrífuga de cesta	Fango activado en exceso	Uso limitado; resultados excelentes (concentraciones de fango variables entre el 8 y 10%)
Centrífuga de camisa maciza	Fango activado en exceso	En aumento; buenos resultados (concentraciones de fango variables entre el 3 y 6%)
Filtro de banda por gravedad	Fango activado en exceso	En aumento; buenos resultados (concentraciones de fango variables entre el 3 y 6%)



Espesador de tambor rotativo	Fango activado en exceso	Uso limitado; resultados excelentes (concentraciones de fango variables entre el 5 y 9%)
-------------------------------------	--------------------------	--

Fuente: (Eddy, 1995)

De los antes mencionados el espesamiento por gravedad en tanques fijos es el comúnmente empleado. Dando excelentes resultados para el tratamiento de lodo primario crudo. (Pérez, 2016)

La separación del agua de los lodos se efectúa bajo la influencia de la gravedad, formándose una fase superior líquida y otra inferior sólida. (CONAGUA, 2015)

2.3.3. Estabilización de lodos

Los lodos residuales deben pasar por un proceso de espesado, estabilización y/o desinfección previa a su disposición final, por ello es importante que una vez espesados estos deben pasar a una etapa de estabilización con la finalidad de disminuir la presencia de patógenos, eliminar el potencial de putrefacción como también eliminar o inhibir olores de los mismos. El tipo de tratamiento se selecciona en función de la calidad, cantidad y la disposición final de los lodos a tratar. (Pérez, 2016)

Entre algunos de los procesos de estabilización tenemos los siguientes:

- **Digestión anaerobia:** la finalidad de este proceso es el evitar la descomposición futura en la disposición final de los lodos. Comúnmente comprende dos etapas; la primera por medio de microorganismos saprofíticos facultativos que llegan a transformar ácidos volátiles, y la segunda etapa por medio de bacterias anaerobias



que convierte biológicamente estos ácidos volátiles en metano y dióxido de carbono. (Trejos & Agudelo, 2012)

- Digestión aerobia: en este proceso los microorganismos comenzarán a consumir su propio protoplasma tan pronto se haya agotado el alimento (sustrato) así obteniendo energía para las reacciones que conllevan el mantenimiento celular. (Pérez, 2016)
- Tratamiento químico: en este proceso los lodos son sometidos a temperaturas de hasta 260°C y presiones de hasta 2760 kN/m² por periodos cortos de tiempo. Este tratamiento puede aplicarse como proceso de estabilización y/o acondicionamiento; esto se debe a que a estas condiciones de trabajo se logra eliminar el agua ligada a los sólidos, coagulando e hidrolizando la materia orgánica presente. Este no es muy aplicado debido a su alto costo de implementación. (Morales, sf)

2.3.4. *Acondicionamiento de lodos*

El lodo residual es frecuentemente secado para su disposición final, pero por su consistencia y composición este proceso suele ser difícil de realizar, por ello se emplea un acondicionamiento al lodo siendo este un proceso químico previo a tratamientos físicos (como la filtración, secado). (Amador - Díaz & Veliz - Lorenzo & Bataller - Venta, 2015)

El acondicionamiento de lodo se emplea con el objetivo específico de mejorar sus características de deshidratación. En este proceso se coagulan los sólidos permitiendo la liberación del agua absorbida mejorando la eficiencia del proceso de deshidratación. (Pérez, 2016)

Cabe mencionar que existen dos métodos comúnmente empleados para el acondicionamiento de lodos, que son: método químico de adición de reactivos y tratamiento térmico, este último también es empleado como método de estabilización. (Bermeo & Idrovo, 2014)

El agregado de aditivos químicos favorece la eliminación de coloides y material más disperso. (Pérez, 2016)



Los productos químicos más empleados sales de aluminio y hierro, cal, polímeros orgánicos. Estos últimos presentan mayores ventajas de eficiencia, frecuentemente más económicos como también facilidad de dosificación.

- Dosificación: Esta varía notablemente entre los diferentes lodos, en la concentración de sólidos y el tipo de lodo. Comúnmente los lodos digeridos demandan considerablemente mayor cantidad de químicos en comparación a lodos crudos. La dosis del activo químico comúnmente se determina en laboratorio mediante ensayos. (Amador - Díaz & Veliz - Lorenzo & Bataller - Venta, 2015)
- Mezclado del lodo: Esta etapa es esencial para un correcto acondicionamiento, el mezclado íntimo del lodo y del aditivo químico. Es de suma importancia que el tiempo de detención debe mantenerse al mínimo; es decir; que el lodo debe ingresar al filtro tan pronto como sea posible una vez acondicionado.

(Amador - Díaz & Veliz - Lorenzo & Bataller - Venta, 2015)

❖ Polímeros

Estos son monómeros de alto peso molecular o subunidades que se repiten muchas veces en cadenas, de tal manera que forman varias estructuras químicas ramificadas que poseen numerosos "sitios activos", en los cuales se adhieren las partículas. (Moretón, 2017)

La dosificación del polímero es un punto crítico, de este dependerá la floculación, en el caso de dosis excesivas de polímeros se puede dar una dispersión de partículas. Una de las ventajas de la adición de polímeros es la formación de flóculos menos voluminosos, en consecuencia, al ser más denso su velocidad de sedimentación es mayor y más fácil su desecado. (CIDTA, 2014)

Los polímeros pueden ser empleados secos o líquidos, también como emulsión.

- Los polímeros secos se pueden aplicar como polvo, escamas o gránulos, siendo estos, difícil de disolver, por ello se debe realizar primero una solución mezclándose con agua de buena calidad. Esta mezcla se agrega lentamente en



tiempos determinados comúnmente recomendados por los fabricantes. (Borras, 2011)

- Los polímeros líquidos deben ser bombeados desde tanques de almacenamiento hacia los tanques de mezcla. (Borras, 2011)

Envejecimiento del polímero: es el tiempo que le toma al polímero de disolverse y activarse. (CIDTA, 2014)

Según su origen podemos tener: naturales o sintéticos, y en minerales. Adicionalmente se clasifican por su carga eléctrica siendo estos aniónicos, catiónicos y neutros.

❖ Clasificación según su origen

- Naturales: Estos son polímeros obtenidos de plantas o animales los mismos que por medio de pruebas han dado resultados positivos en el proceso de floculación en tratamiento de agua residual y potable como ayudantes.
- Sintéticos: Estos están formados por la polimerización de monómeros (ácido acrílico, acrilamida, cloruro de aciloxi-etil-trimetil-amonio) aproximadamente un 90% de los polímeros sintéticos en el mercado están formados por estos monómeros. (Almeida & Borja, 2015)

Por su alto peso molecular son adecuados para atraer partículas del medio debido a que cuentan con carga eléctrica o grupos ionizables.

- Minerales: También podemos encontrar polímeros minerales como la sílice activada, también arcillas, carbón activado o carbonato cálcico. (Almeida & Borja, 2015)

❖ Carga eléctrica de los polielectrolitos

- Polielectrolitos catiónicos: estos tienen una fuerte carga positiva esto se da por la presencia de grupos de amonio cuaternario.
- Polielectrolitos aniónicos: estos generalmente son acrilamida y ácido acrílico o polisacáridos sulfatados.
- Polielectrolitos no iónicos (neutros): estos son gomas, gelatinas o derivados de celulosa. (Almeida & Borja, 2015)

❖ Beneficios del uso



El empleo de polímeros en tratamiento de agua presenta una mejora en los procesos de coagulación, floculación o ayudante de floculación, entre los beneficios de su uso tenemos:

- Uso de dosis menores de floculante
 - Flóculos de mayor tamaño y peso facilitando la sedimentación´
 - Polímeros utilizados como acondicionadores de lodos, ayuda a reducir su volumen
 - Pequeñas dosis de polímero pueden reemplazar grandes cantidades de coagulante
 - Reducen la cantidad de sólidos que llegan a los filtros reduciendo su frecuencia de lavado (Martínez, 2015)
- ❖ Desventajas del uso

Las desventajas que pueden presentar están relacionadas con el manejo y operación de los polímeros tanto en los sistemas de dosificación como también de mezclado.

- Se requiere contenedores especiales debido a su pH
- Algunos polímeros deben ser mezclados con agua caliente por lo tanto se debe contar con calentadores especiales
- El agua con el que se dosifique no debe tener alto contenido de cloro pues puede degradar al polímero (Martínez, 2015)

En la determinación del punto óptimo de dosificación es útil el ensayo en pruebas de jarras, logrando comparar resultados. (Moura & Sandoval, 2012)

2.3.5. *Desinfección de lodos*

Este es un proceso adicional que se emplea a los lodos posterior a un proceso de estabilización y/o acondicionamiento. Los métodos que pueden ser empleados son: pasteurización y almacenamiento a largo plazo, siendo esta última la más empleada. (CONAGUA, 2015)



2.3.6. Deshidratación de lodos

La deshidratación es empleada principalmente con el objetivo de reducir costos de inversión y de operación que implica el manejo de lodos. (CONAGUA, 2015)

Con este método se logra reducir hasta un 20% el volumen; es decir, incrementa la concentración de sólidos en el lodo. (Pérez, 2016)

Los métodos de deshidratación pueden dividirse en dos grupos, que son:

- Método basado en la separación del agua mediante una membrana aislante permeable trabajando con presión externa (filtro prensa de banda, de placas, filtros al vacío). (CONAGUA, 2015)
- Método basado en la separación mediante gravedad (centrífugas)

La elección del equipo de deshidratación a emplear se determina por el tipo de lodo, características y espacio disponible. (CONAGUA, 2015)

Tabla 4: Tecnologías de Deshidratación

	Mecanismo	Tecnología
DESHIDRATACIÓN	Naturales	Espesadores Lechos de secado
	Mecánicas o Artificiales (aumento de gravedad o presión)	Centrífugas Filtros banda Filtros prensa



		Filtros de vacío
--	--	------------------

Fuente: (Bermeo & Idrovo, 2014)

Algunos de los equipos que pueden ser usados en este proceso, son los siguientes:

❖ Lechos de secado

Este filtro está formado por compartimientos rectangulares poco profundos que están provistos de fondos porosos, los lodos son colocados en estos compartimientos donde son expuestos a la luz solar y viento logrando su deshidratación. Cabe recalcar que este es un proceso natural que no necesita gran inversión económica, de simple funcionamiento, pero es un proceso lento. (Castellanos-Rozo & Merchán & Galvis & Manjarres, 2018)

❖ Centrifugación

Se puede emplear dos tipos de centrífugas que son: centrífuga de tazón sólido y centrífuga de alto torque. Estos equipos tienen un funcionamiento similar a los espesadores, donde la centrífuga gira a gran velocidad generando así la separación de fases. (CONAGUA, 2015)

❖ Filtro prensa de bandas

Este filtro suele contar con dos o tres bandas en movimiento y una serie de rodillos. En general para trabajar con esos equipos se requiere un acondicionamiento previo del lodo.

El agua se retira mediante una combinación de drenado por gravedad y compresión. Después, la torta del lodo que se forma se descarga por medio de una banda transportadora a una tolva. (CONAGUA, 2015)



2.3.7. *Secado de lodos*

Este método consiste en calentar al lodo a bajas presiones durante cortos periodos de tiempo, siendo posible reducir su peso y eliminar organismos patógenos. Los métodos más empleados suelen ser mediante hornos, incineración y también exposición al sol. (Amador - Díaz & Veliz - Lorenzo & Bataller - Venta, 2015)

En este tratamiento existe una coagulación de los sólidos, rotura en la estructura gel y reduce la afinidad del agua en los sólidos del lodo. Para aplicar este tratamiento el lodo debe tener un 75% de humedad, dándose las siguientes etapas:

- Elevación de la temperatura a 100°C
- Evaporación del agua
- Elevación de la temperatura del vapor y gas
- Elevación de la temperatura de sólidos secos hasta el punto de ignición

(Pérez, 2016)

2.3.8. *Reducción térmica de lodos*

Este es un proceso que puede ser aplicado directamente en los lodos crudos o como proceso complementario a la deshidratación de lodos. Considerando que para la implementación de esta tecnología el coste es alto por su consumo energético el proceso previo de deshidratación debe ser óptimo para garantizar los resultados esperados. (Ministerio de Medio Ambiente, 2013)

Comúnmente se emplean túneles térmicos que pueden ser alimentados por bombas de calor como también por aprovechamiento de sistemas de cogeneración dentro de la planta. Por medio de esta tecnología se puede reducir hasta un 65% aproximadamente de volumen de lodos. (Ministerio de Medio Ambiente, 2013)

Algunas ventajas que presenta esta tecnología son:

- Máxima reducción de volumen



- Eliminación de compuestos tóxicos y patógenos

2.3.9. Evacuación o disposición final de lodos

En la actualidad la disposición final de los lodos en países desarrollados el 54% se reúsa en la aplicación al suelo (composta), el 21% es incinerado, 15% se deposita en rellenos sanitarios y solamente un 10% se utiliza en otros métodos de disposición. (CONAGUA, 2015)

❖ Utilización de los lodos

En la actualidad se busca varias alternativas para la aplicación de lodos residuales tratados para el aprovechamiento de este residuo. Se han llevado a cabo varios estudios donde se ha determinado su viabilidad en la aplicación de: fabricación de ladrillos, compostaje, fabricación de árido ligero, fabricación de cemento, fabricación de morteros, fabricación hormigón. (Ministerio de Medio Ambiente, 2013)

En el caso de aplicar secado o incineración de lodos donde obtendremos como residuo cenizas, estas pueden ser utilizados en la fabricación de ladrillos, fabricación de morteros, fabricación de hormigón, fabricación de aglomerantes, fabricación de lana de roca (aislamiento térmico). (Ministerio de Medio Ambiente, 2013)

2.4. Pruebas de jarras

La prueba de jarras es un ensayo empleado a nivel de laboratorio para determinar las condiciones óptimas de trabajo en el tratamiento de aguas y/o lodos residuales. En el mismo se simula los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, permitiendo realizar variaciones en las dosis de polímero como en la velocidad de agitación y tiempo. (Izquierdo, 2015)

El principal objetivo del uso de este ensayo es determinar la dosis ideal para el proceso. (Fúquene & Yate, 2018)

❖ Equipo de Jarras



En el mercado existe una extensa variedad de equipos para dicho ensayo, pero con el mismo principio que consta de una serie de jarras que serán utilizadas al mismo tiempo donde varía en las dosis de polímero/floculante en cada jarra. Permitiendo la reducción de materia orgánica y coloides en suspensión. (Izquierdo, 2015)

En el ensayo existen factores tanto químicos como hidráulicos que influyen en el mismo, siendo estos:

- Concentración de coagulante
- Grado de agitación
- Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
- Temperatura
- pH
- Tiempo de sedimentación

(Izquierdo, 2015)

El equipo de mezcla típica consiste en una serie de agitadores montados mecánicamente con la finalidad de operar a la misma velocidad que puede ir de 100 a 400 rpm. Las jarras comúnmente son de material acrílico transparente con forma rectangular o cilíndrica, con una capacidad de uno a dos litros. (Fúquene & Yate, 2018)

❖ Condiciones prueba de jarras

Teniendo en cuenta que la prueba de jarras es un proceso de simulación se debe realizar bajo las mismas condiciones operacionales que en planta (proceso industrial) como pueden ser; gradiente hidráulico, tiempo de mezcla, punto de adición de polímero y tiempo de dosificación del mismo. (Izquierdo, 2015)

- Mezcla lenta

El tiempo no excederá de 15 minutos ya que podría crear un calentamiento de la muestra provocando una buena floculación, pero mala sedimentación. Se trabaja tiempos de 3 a 15 minutos con velocidad de 20 a 40 rpm. (Fúquene & Yate, 2018)



- Mezcla rápida

El tiempo recomendado es de un minuto a 300 rpm. La finalidad de la mezcla rápida es generar turbulencia para poner en contacto los reactivos con la muestra, logrando neutralizar y desestabilizar las cargas facilitando la aglomeración en menos tiempo. (Fúquene & Yate, 2018)

❖ Criterios de evaluación

En la evaluación de resultados en el ensayo de prueba de jarras no existen patrones universales ni criterios convencionales, debido a esto se trata más de un criterio del analista, operario de planta, fabricante de equipo, etc. Por ello, se siguen algunos lineamientos para la evaluación como son:

- Calidad del sobrenadante
- Características del flóculo
- Velocidad de sedimentación

(Izquierdo, 2015)

Estos parámetros son aplicados en una evaluación visual cualitativa de la formación y tamaño de flóculos. (Izquierdo, 2015)

2.3.10. Tamaño del flóculo

Esta evaluación es netamente visual, indicando un tamaño aproximado del flóculo formado. La evolución consiste en observar el desarrollo de formación del flóculo en cada celda, eligiendo aquella que produzca un flóculo de mayor tamaño, mayor velocidad de asentamiento y aquel que deje ver un agua más cristalina entre los flóculos formados. (Vásconez, 2013)

Para esta evaluación se puede emplear el índice de Willcomb donde basa en una descripción cualitativa de tamaño, velocidad de sedimentación, característica de



sobrenadante., es de suma importancia recalcar que esta determinación es subjetiva y dependerá exclusivamente del criterio del observador. (De Moura & Sandoval, 2012)

Tabla 5: Índice de Willcomb.

Número del Índice	Descripción	Observación
0	No visible	Ningún signo de aglutinación
2	Visible	Floc muy pequeño, casi imperceptible
4	Disperso	Floc bueno, sedimenta muy lentamente
6	Claro	Floc bueno, precipita con lentitud
8	Bueno	Floc bueno, que se deposita fácil pero no total
10	Excelente	Floc muy bueno, que se deposita total

Fuente: (De Moura & Sandoval, 2012)

2.5. Directrices para la gestión de biosólidos actual

La normativa actual que rige en la ciudad de Cuenca establecida por la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, (ETAPA EP, 2019), establece que los lodos de las plantas de tratamiento de



aguas residuales no deben presentar riesgo para la salud de la población como tampoco para el medio ambiente para ello definen los siguientes aspectos a controlar:

1. Detalle de los procesos en los que se genera lodos, caracterización y cuantificación de estos.
2. Diseño de planta (unidades y equipamiento) para el transporte, tratamiento y disposición final de los lodos generados durante la vida útil de la planta de tratamiento de agua.
3. Identificación y control de parámetros críticos operacionales en el manejo de lodos.
4. Desarrollo de un plan de contingencia ante fallas que pueda presentar el sistema o equipos de manejo de lodos.

Para la disposición final de los lodos residuales en rellenos sanitarios establece que la disposición diaria de los lodos no debe ser superior al 6% del total de residuos dispuestos diariamente en el relleno sanitario. La humedad de los lodos no debe superar el 70% de humedad. (ETAPA EP, 2019)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación que se realizó está fundamentado básicamente en cinco puntos claves los mismos que son:

- 1) Revisión bibliográfica general y específica del proceso de depuración de una Planta de tratamiento de aguas residuales, y del proceso de deshidratación de lodos respectivamente. En este punto se estudió las variables determinantes que componen el proceso de deshidratación y características clave de los floculantes. También se reconoció la planta de tratamiento de aguas residuales
- 2) Se estableció el diseño experimental según los parámetros más importantes del proceso de deshidratación de lodos y se puedan controlar dentro de la planta.
- 3) Recolección datos operacionales de la planta de deshidratación de lodos.
- 4) Experimentación, esta fase se dividió en 2, por un lado, se realizó una preselección de 4 floculantes de los 12 suministrados, para ello se consideró el índice de Willcomb como variable determinante, mediante pruebas de jarras se experimentó con los 4 floculantes seleccionados siguiendo el diseño experimental establecido.
- 5) Implementación de las nuevas características operativas determinadas para los floculantes.

3.1. Diagrama del flujo de la metodología del proceso de investigación

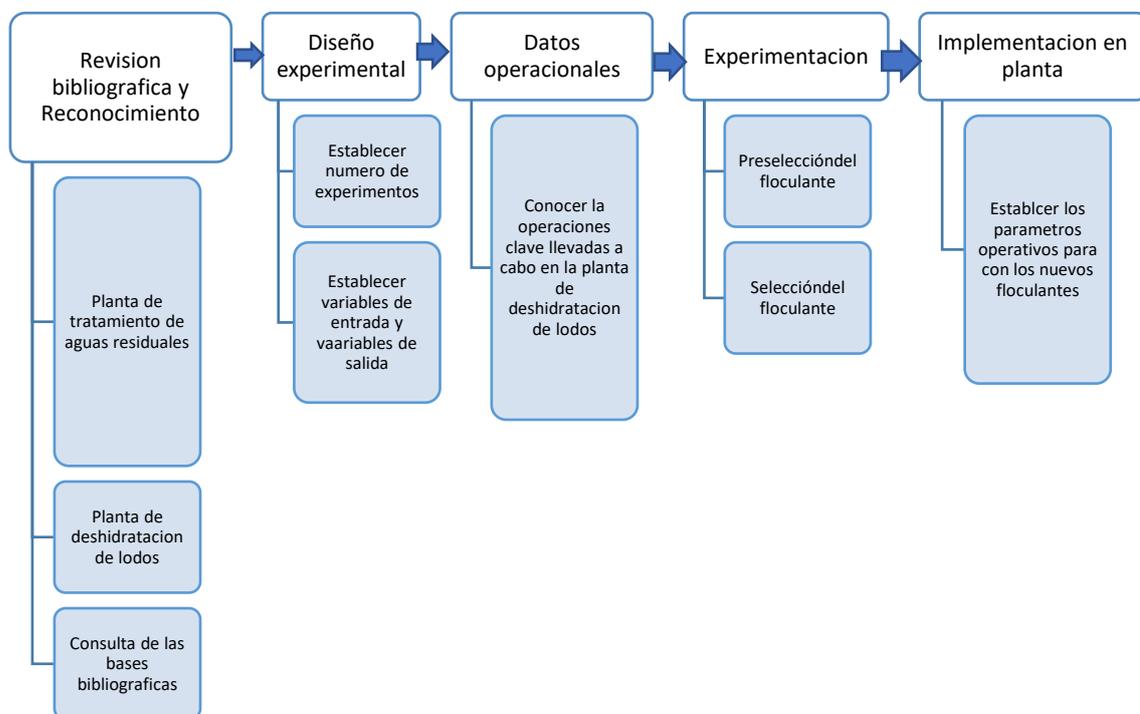


Figura 3: Diagrama de flujo proceso de investigación.

Fuente: Autores

3.2. Revisión bibliográfica y Reconocimiento

La primera parte comprendió una revisión bibliográfica general del proceso en una planta de tratamiento de aguas residuales y una revisión bibliográfica minuciosa del proceso de deshidratación de lodos, en esta etapa la empresa proporcionó: manuales, fichas técnicas, material audiovisual y registros históricos operacionales de la planta. En la segunda parte se efectuó un reconocimiento general del proceso llevado a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba, centrando nuestra atención específicamente en el diagnóstico de la planta de deshidratación de lodos.



Figura 4: Vista panorámica de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba.

Fuente: ETAPA E.P





Figura 5: a) Laguna Facultativa #1, b) 2 tanques sedimentadores y 1 tanque de almacenamiento de lodos espesados, c) Silo de 60m³ de capacidad en proceso de descarga, d) Funcionamiento de filtros banda 2 y 3 dentro de la planta de deshidratación de lodos, e) Laboratorio principal de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba.

Fuente: Autores

3.3. Diseño experimental

Para el desarrollo del trabajo en la prueba de jarras se consideró un diseño factorial, ya que es el que mejor se ajustaba a los propósitos inicialmente planteados.

Datos para el diseño experimental:

- Variable dependiente: Turbiedad (antes y después)
- Variables independientes: Cantidad de floculantes (**4**), Cantidad de dosis del floculante (**3**), Cantidad de velocidades de agitación de la mezcla en RPM (**3**)
- Variables constantes: tipo de efluente, cantidad del efluente, temperatura, tiempo de mezcla y de sedimentación.

Diseño factorial: $4 \times 3 \times 3 = 36$ experimentos, con réplica 72 experimentos.

3.4. Recolección datos operaciones



Figura 6: Diagrama del proceso de deshidratación de lodos de la PTAR de Ucubamba.

Fuente: ETAPA EP.

En la recolección de datos operacionales se siguió el diagrama de flujo de la planta, es decir, se obtuvo los datos operacionales más relevantes dentro de cada etapa del proceso de deshidratación de lodos, entre ellos los que más destacaron fueron:

- Porcentaje promedio de sólidos presentes en el lodo
- pH de los lodos
- Tiempo de retención en el tanque de lodos espesados [horas]
- Caudal de entrada de lodos [l/h]
- Caudal de entrada de floculante diluido [l/h]
- Velocidad del aspa del tanque floculador [RPM]
- Velocidad de desplazamiento de la correa del filtro banda [cm/s]
- Caudal de entrada de agua para la preparación de la solución de floculante [l/min]
- Razón de caída de polvo de floculante para la preparación de solución floculante [g/min]
- Concentración de la solución de floculante [ppm]
- Datos técnicos de motorreductores [velocidad nominal, relación de reducción]
- Calibración de variadores de frecuencia

3.5. Experimentación

La empresa proporcionó 12 marcas diferentes de floculantes, es por ello que se los organizó en función de los parámetros más relevantes en el proceso de deshidratación

de lodos, esto con el propósito de comprender similitudes y diferencias entre cada uno de ellos.



Figura 7: Muestras de floculantes que se nos fueron entregados.

Fuente: Autores

Entre las características consideradas, se tienen:

- Tipo de floculante (aniónico, catiónico, no iónico)
- Carga del floculante
- Marca
- Viscosidad

3.1.1. Extracción y toma de muestras

La extracción de muestras se efectuó de manera manual en la Laguna Facultativa 1 durante aproximadamente un día, habiéndose extraído un total de 55 galones. El procedimiento empleado (figura 8) consistió en:

- a. Verificación de cantidad de sólidos en el lodo
- b. Calibración de la barrenadora para la extracción a la máxima profundidad permitida
- c. Llenado del tanque de lodos de 55 galones de capacidad y transporte a la zona de pruebas(planta)



Figura 8: Toma de muestra de lodos de la laguna facultativa #1.

Fuente: Autores

Para la toma de muestras, se agitaba con una pala por un periodo de 10 minutos el tanque de 55 galones y se llenaba un balde de 20L, previo al llenado de las jarras, este tanque era agitado por un periodo de 3 minutos de manera que se evite la sedimentación del lodo.



Figura 9: Agitación del tanque de lodos previa experimentación.

Fuente: Autores

3.1.2. Preselección

❖ Preparación de la solución de floculante

Los floculantes en polvo se pesaron en una balanza digital (figura 10) marca Mettler Toledo Monobloc modelo AB204-S y de capacidad de medición de (0.01 – 220.00) g con una precisión de ± 0.01 g.

Todos los floculantes fueron preparados a una concentración al 0.5%, para ello se añadió 2500mg de floculante granulado y luego aforándolo hasta 500ml de agua potable, teniéndose en total 12 diluciones listas para ser usadas (figura 11). Se prepararon las disoluciones a estas concentraciones, ya que son valores referenciales de concentración recomendados por las diferentes casas fabricantes en sus fichas técnicas.



Figura 10: Balanza digital Mettler Toledo Monobloc modelo AB204-S.

Fuente: Autores



Figura 11: Flocculantes en solución listos para su uso.

Fuente: Autores

❖ Prueba de Jarras

A manera de reproducir el proceso de espesamiento del lodo generado en la planta se empleó el equipo de “Pruebas de Jarras” para luego clasificar el floc formado según el índice del Willcomb.

Para dicho experimento, se cuenta con el siguiente equipo y materiales (figura 12):

- ✓ 1 equipo de jarras
- ✓ 3 vasos de policarbonato BKER2 de capacidad de 2000ml
- ✓ 6 agitadores
- ✓ Lámpara iluminadora (para las 6 jarras)

- ✓ Display y potenciómetro acoplado al equipo para regular la velocidad en RPM



Figura 12: Equipo de prueba de jarras en pleno funcionamiento.

Fuente: Autores

Para la experimentación en las jarras y reproducir el proceso de espesado de lodos, se realizaron los siguientes pasos:

- Se realizó una apreciación cualitativa, se tomó en cuenta: apariencia física, porcentaje de sólidos, color, fluidez.
- Se tomaron 1000ml de muestra de lodo por cada jarra.
- Antes de encender el equipo de jarras, se adicionó al mismo tiempo a cada una de las jarras, las cantidades respectivas (20ml, 40ml y 60ml) de solución madre de floculante con una jeringa.
- Se agitó por un tiempo de 1 minuto a 290RPM.
- Se dejó sedimentar por 3 minutos para observar la formación de flóculos y la interfase agua-lodo.
- Se tomaron datos de la apariencia de los flóculos.
- Se compara el tamaño del floc según la tabla del índice de Willcomb

3.1.3. Procedimiento para la selección de los floculantes

❖ Preparación de solución de floculante

Se siguió el mismo procedimiento descrito con anterioridad con la diferencia que esta vez se prepararon solo 4 floculantes previamente seleccionados.

❖ Prueba de Jarras

Se siguió el mismo procedimiento descrito con anterioridad, exceptuando el tiempo de sedimentación que fue de 0.5 minutos.

❖ Determinación de la turbidez

- Preparación de las muestras para medir turbidez

Se tomó el contenido del sobrenadante de cada prueba realizada con el floculante y se trabajó por duplicado.

Si la turbiedad de la muestra excedía del rango de medición se realizaban diluciones a relación 1:100 o 1:50, es decir se tomaba 1ml de muestra de lodo y se aforaba en agua destilada hasta los 100ml, posterior a ello se extrajo 50ml de la solución final y se colocaba en el frasco de muestras del turbidímetro.

Para analizar la muestra de lodo crudo fue necesaria una dilución 1:500 en todos los casos.

Se tuvieron 3 muestras del sobrenadante a cada una de las concentraciones (100, 200 y 300) ppm más la muestra del lodo crudo.



Figura 13: Muestras de sobrenadantes y sus respectivas disoluciones previo a la medición de turbiedad.

Fuente: Autores

❖ Uso del equipo

Los valores de este parámetro se obtuvieron mediante un medidor de turbidez marca HACH de (0.01 – 8000) NTU con una precisión de ± 0.01 . Para la medición de la turbidez, es necesario realizar la curva de calibración del equipo mediante la lectura de los estándares, una vez que la curva estaba lista, se procedía a colocar cada patrón dentro del equipo, tapándolo y registrado el valor de la turbidez.



Figura 14: Turbidímetro marca HACH junto a sus patrones para establecer la curva de calibración.

Fuente: Autores

- Determinación del porcentaje de remoción de sólidos

Para la determinación de remoción de sólidos que logra el floculante en el efluente tratado se realizó una comparación entre la turbidez del sobrenadante sin adición de floculante (blanco) y la turbidez del sobrenadante tratada con los diversos floculantes en estudio a diferentes concentraciones. La siguiente ecuación muestra a expresión matemática para la determinación de este parámetro:

$$\%Rs = \frac{TN - TD}{TN} * 100$$

(Leiva et al., 1997)

Donde:

%Rs: Porcentaje de remoción de sólidos

TN: Turbidez del agua natural sin adición de floculante (NTU)

TD: Turbidez del agua con adición de floculante (NTU)

❖ Pruebas de filtrado

Las pruebas de filtrado ayudan a conocer la velocidad de remoción de partículas suspendidas a través de un medio filtrante, varias características van a estar relacionadas como: tamaño de las partículas suspendidas, resistencia de las partículas suspendidas, características del líquido a filtrar, etc.

Una vez realizado el ensayo, se puede obtener una curva de filtrado que nos ayudara a cuantificar la pérdida de agua en función del tiempo; es decir; saber si el floculante usado contribuye a un rápido drenado del agua contenida en la mezcla lodo-polímero.

Para evaluar el proceso de filtración de la mezcla lodo-floculante se realizó 4 pruebas de filtración, evaluándose el tiempo de filtrado en cada una de ellas.

En esta etapa fue necesaria la construcción de un filtro, elaborado con el material filtrante del cual se componen los filtros banda. El peso del agua filtrada fue medida en una balanza y el tiempo cronometrado con un celular.



Figura 15: Equipo de filtración y balanza.

Fuente: Autores

A partir de las mezclas en jarras se siguió el siguiente proceso para realizar las pruebas de filtrado para cada floculante:

- a) Se colocó el contenido de la jarra en el filtro y se tomó el tiempo
- b) Se esperó 60s y se anotó el peso mostrado por la balanza

3.6. Implementación en planta

Una vez seleccionados los 4 mejores floculantes, se contactó con los distintos proveedores, pudiendo conseguir 3 de los 4 floculantes, los cuales fueron entregados en sacos de 25kg.



Figura 16: Saco de 25kg de floculante utilizado.

Fuente: Autores

- ❖ Obtención de la velocidad de agitación del tanque floculador para ajuste



Conociendo datos previos de las placas del motor y motorreductor, se extrajeron 3 datos importantes que son: la velocidad nominal síncrona del motor, relación de cambio del reductor y número de pares de polos y se aplicaron las siguientes fórmulas:

$$Velocidad\ sincrona\ (teorica)[RPM] = \frac{60 * f}{\# \text{ pares de polos}}$$

(Harper, 2001)

$$Deslizamiento = \frac{V.Sincrona - V.Nominal}{V.Sincrona}$$

(Dawes, 1966)

$$Velocidad\ asincrona\ [RPM] = \frac{60 * f}{\# \text{ pares de polos}} * (1 - Deslizamiento)$$

(Harper, 2001)

$$Velocidad\ de\ agitacion\ (reducida)[RPM] = \frac{V.Sincrona\ Real}{Relacion\ de\ cambio\ del\ reductor}$$

(Pulido, 2000)

❖ Obtención de la velocidad de avance de la banda filtrante para ajuste

Se extrajeron los mismos datos que en el punto anterior, para calcular:

$$Velocidad\ sincrona\ (teorica)[RPM] = \frac{60 * f}{\# \text{ pares de polos}}$$

$$Deslizamiento = \frac{V.Sincrona - V.Nominal}{V.Sincrona}$$

(Dawes, 1966)

$$Velocidad\ asincrona\ [RPM] = \frac{60 * f}{\# \text{ pares de polos}} * (1 - Deslizamiento)$$

(Harper, 2001)

$$Velocidad\ angular\ del\ rodillo\ (reducida)\ [RPM] = \frac{V.Sincrona\ Real}{Relacion\ de\ cambio\ del\ reductor}$$

(Pulido, 2000)

$$Avance\ correa\ [cm/s] = \frac{V.giro\ rodillo * 2 * \pi}{60} * \frac{Diametro}{2}$$

(Sullivan, 1997)

❖ Obtención de los caudales másico y volumétrico de floculante y agua respectivamente

Partiendo de volúmenes conocidos de tanques de plástico, se realizaron 10 ensayos de aforo para conocer el caudal de entrada de agua al tanque de dilución de floculante cronometrándose por 10 segundos, el caudal de agua y la razón de caída de floculante en polvo en el tanque, este último dependía de la calibración del reloj del motorreductor.



❖ Ajuste de la concentración del floculante en el tanque madre

Para conocer la concentración de preparación en el tanque madre, se necesitó conocer el caudal volumétrico de agua y caudal másico de floculante granular, una vez encontrados, se procede a realizar el cálculo:

$$C(g/l) = \frac{\frac{g}{\text{min}} [\text{floculante en polvo}]}{\frac{l}{\text{min}} [\text{agua}]}$$

(Brown et al., 2004)

Esta fórmula permite calcular la cantidad de floculante granular a ser dosificado para llegar a una concentración deseada.

Para ajustar la concentración de preparación en el tanque fue necesario calibrar el variador de frecuencia mecánico que controla el motorreductor que a su vez controla el caudal másico de floculante granular.

❖ Determinación de caudales volumétricos óptimos de floculante y agua de dilución, frente a un caudal de lodo

Para conocer el caudal volumétrico de floculante a agregar en la mezcla se partió de la fórmula:

$$C_D * V_D = C_M * V_M$$

(Holum & Denison, 1978)

Donde:

C_D : es la concentración deseada de floculante luego de mezclarse con el agua de dilución

V_D = El caudal necesario de floculante diluido o no

C_M =La concentración deseada en la mezcla floculante/lodo

V_M =El caudal de entrada al tanque floculador, es decir el caudal de lodo más el caudal de floculante diluido.

Para conocer el caudal volumétrico de floculante madre a mezclarse con el caudal de agua de dilución se partió de la fórmula:

$$C_i * V_i = C_D * V_D$$

(Holum & Denison, 1978)

Donde:

C_i : es la concentración del floculante en el tanque madre

V_i : es el caudal necesario de floculante madre que se mezcla con el agua de dilución

C_D : Es la concentración referida a la mezcla de floculante diluido

V_D : Es el caudal de floculante diluido, es decir es el caudal de floculante madre más el agua de dilución.



Figura 17: Punto de convergencia de los caudales de lodos y floculante diluido.

Fuente: Autores

❖ **Determinación del porcentaje de humedad**

Una vez realizado el proceso de filtrado de la mezcla lodo-floculante y haberla hecho pasar por el filtro banda, la torta húmeda es colocada en un equipo analizador de humedad (figura 18, marca Mettler Toledo modelo HB43-S y de capacidad de medición de (0,5-54,00) g con una precisión de $\pm 0,1$ g) de capacidad de medición de (50-200) °C con una apreciación de 1°C) a una temperatura constante de (105 ± 1) °C hasta que el equipo de una lectura de humedad constante.



Figura 18: Display del analizador de humedad marca Mettler Toledo.



Fuente: Autores

El modelo matemático que describe dicho proceso es el siguiente:

$$\%H_e = \frac{T_H - T_s}{T_H} * 100$$

(Leiva et al., 1997)

Donde:

$\%H_e$: Porcentaje de humedad evaporado

T_H : Torta húmeda (g)

T_s : Torta seca (g)

De la ecuación anterior se obtuvo el valor de humedad evaporada en cada una de las muestras de tortas obtenidas; para la obtención de la cantidad de agua en los lodos para cuantificar la deshidratación de dicho lodo, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\%H = 100 - H_e$$

(Leiva et al., 1997)

Donde:

$\%H$: Porcentaje de humedad

Una vez procesado los resultados obtenidos por cada floculante, se realizaron gráficos y tablas comparativas, un análisis cualitativo y cuantitativo de cada alternativa y una comparación de cada uno con respecto al empleado actualmente, para así obtener los resultados.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.Reconocimiento de la planta



Figura 19: Planta de deshidratación de lodos de Ucubamba.

Fuente: (Durazno Orellana & Díaz Torres, 2009)

❖ Diagrama de los procesos.

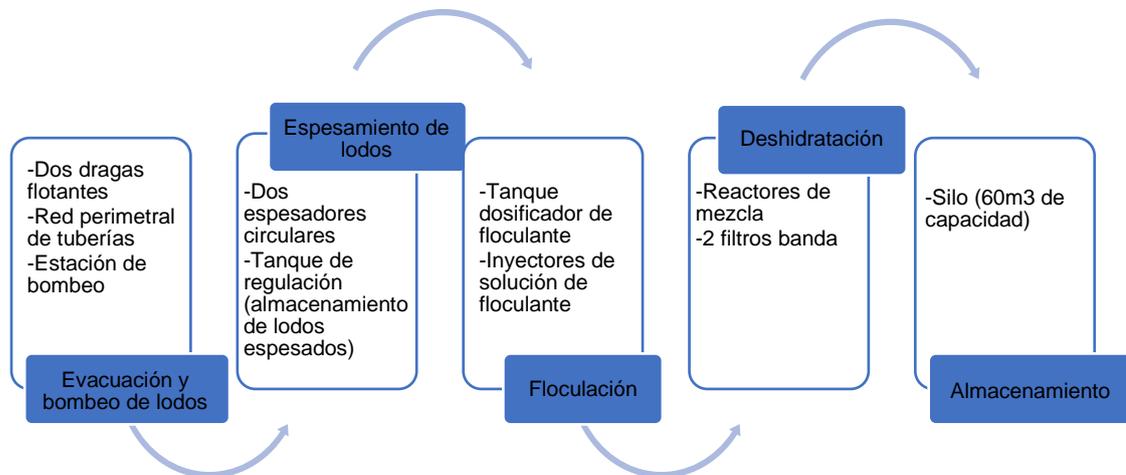


Figura 20: Diagrama de procesos de la planta de deshidratación de lodos de Ucubamba. Fuente: Autores

❖ Proceso esquemático de deshidratación de lodos

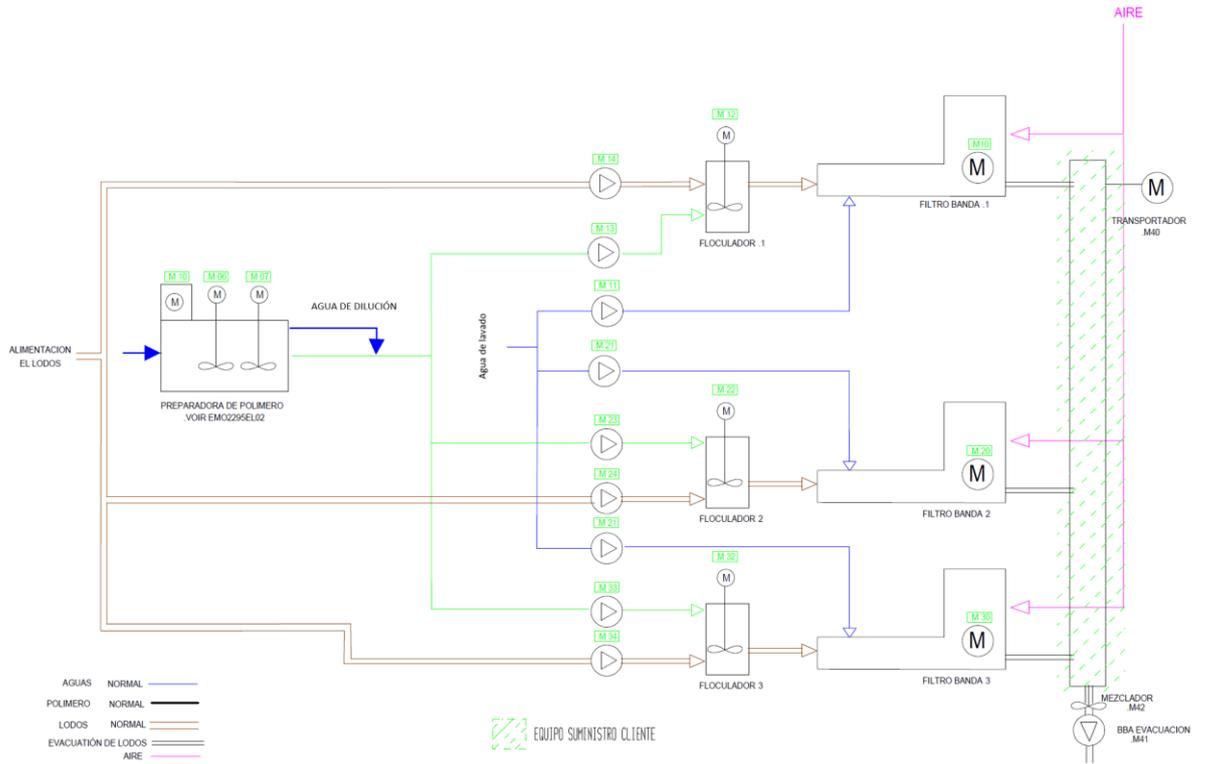


Figura 21: Esquema del funcionamiento en línea en la deshidratación de lodos de la planta de Ucubamba.

Fuente: Manual planta

❖ Sistema de dragas

La planta cuenta con dos dragas flotantes las cuales recogen y envían los lodos hacia las periferias de la laguna. Estas dragas conforman un sistema de barrido de fondo de las lagunas, las mismas cuentan con una cabeza barrenadora y un doble tornillo sin fin. Una vez dragados los lodos estos son impulsados por una manguera de 180mm de diámetro y 180m de largo.



Figura 22: Draga flotante.

Fuente: (Durazno Orellana & Díaz Torres, 2009)

El sistema de dragas puede operar de manera automática o manual por medio de un panel de control ubicado en la orilla de las lagunas. Las dragas van a estar situadas a 1,55m de profundidad aproximadamente, donde la cantidad de lodo dragado es de 2,50 gal/min el mismo que puede variar a consecuencia de la sedimentación en forma de montículos en el fondo de la laguna., y una densidad de 2,10 relación masa/volumen.



Figura 23: Tablero de control de la draga flotante.

Fuente: Autores

❖ Sistema de bombeo de lodos

El sistema de bombeo cuenta con una red de conducción/recolección de lodo. Las mismas que van desde el borde de las lagunas hasta el sistema principal de bombeo, esta red cuenta con una longitud de aproximadamente 2160m. Se conoce que el caudal medio de la red recolectora suele ser de 40 m³/h por cada draga y con una concentración de sólidos que varía del 3% hasta 7%.

La estación principal de bombeo cuenta con 3 bombas con capacidad de 48m³/h y a su vez la estación secundaria de bombeo dispone de 2 bombas sumergibles de una capacidad de 40m³ por hora.



Figura 24: Línea de succión en el perímetro de la laguna facultativa.

Fuente: (Durazno Orellana & Díaz Torres, 2009)

❖ Espesado por gravedad

La planta cuenta con dos espesadores de gravedad circulares de un diámetro de 11m provistos de un sistema mecánico giratorio, el cual facilita el arrastre y recolección de los lodos depositados en las paredes cónicas de los espesadores.



Figura 25: Espesadores conteniendo lodos y vacíos.

Fuente: Autores

❖ Tanque almacenamiento de lodos

El tanque de almacenamiento tiene una capacidad de 60m³ donde los lodos son conducidos una vez han salido de los espesadores, este tanque está provisto de un medidor ultrasónico de nivel como también de dos agitadores sumergibles este último con la finalidad de tener un lodo homogéneo al momento de ingresar a la planta.



Figura 26: Tanque de almacenamiento de lodos espesados.

Fuente: Autores

❖ Tanque preparador de floculante líquido

El tanque cuenta con una tolva por la cual ingresa el floculante granulado, luego este pasa por un tornillo sin fin el mismo que rotara en función de la concentración que se desee obtener, se puede aumentar o disminuir su velocidad de giro ajustando el respectivo motorreductor. El floculante una vez que sale del tornillo ingresa al tanque a la par de un caudal de agua. Con la ayuda de mezcladores del tipo paletas se forma la solución del floculante. La concentración de esta solución depende principalmente de ingreso de agua y de floculante granulado.

La capacidad del tanque es de 30m^3 , cabe mencionar que dentro del tanque existen dos placas deflectoras las cuales dividen el tanque en tres compartimentos, las paletas del primer compartimento giran a alta velocidad, las paletas del segundo compartimento giran a velocidad media y las paletas del tercer compartimento giran a baja velocidad, esto con el objetivo de evitar la formación de “bolas de floculante” que podrían obstruir las tuberías.

❖ Tanque de mezcla lodo-floculante

Al tanque de mezcla de 55 galones de capacidad llega una premezcla (mezcla por turbulencia) lodo-floculante que se da por la convergencia de dos caudales; caudal de lodo y caudal de floculante, ya dentro del tanque la premezcla entra en contacto con paletas de mezcla que aseguran la formación del floc.

La velocidad de rotación de las paletas, caudales de entrada tanto del lodo y floculante son ajustados en el panel de control.

❖ Filtro banda

La mezcla obtenida en el tanque es depositada en el filtro banda, este cuenta con un ancho de banda de 3 metros. Las bandas cuentan con características y suficientes para

trabajar con diferentes mezclas de lodos, aunque el material del cual están compuestos es desconocido. El filtro a su vez cuenta con un sistema de lavado continuo (agua a presión) que evita la saturación de las telas filtrantes. La planta está provista de 3 filtros banda con la misma capacidad de trabajo, aunque solo dos son operativos. La velocidad de banda se establecerá dependiendo de la calidad del floc que se estén dando.

❖ Almacenamiento – Silo

La torta obtenida a la salida de los filtros se descarga en una banda y esta a su vez deposita los lodos deshidratados en una tolva. En esta tolva mediante una bomba helicoidal impulsa los lodos por tuberías hasta ser descargados en un silo que se encuentra en la parte externa de la planta, este silo tiene una capacidad de almacenamiento de 60 metros cúbicos. La descarga del silo se realiza directamente en volquetas para su disposición final en el relleno sanitario de Pichacay.

4.2. Datos operacionales

Los datos operacionales más importantes fueron recabados en condiciones estándares de trabajo, cabe recalcar que otros parámetros como: caudal de lodo, caudal de floculante, velocidad de desplazamiento de banda y velocidad de agitación del tanque de mezcla floculante-lodo, son controlados mediante variadores de frecuencia en el panel de control, por ello los valores presentados son estrictamente dependientes de la posición en la cual el operador lo ajusto.



Figura 27: Tablero de control del proceso de deshidratación de lodos.

Fuente: Autores

❖ Porcentaje promedio de sólidos en el lodo

El porcentaje de sólidos en el caudal de lodos está entre el 10 y 14%

❖ Caudal de lodo

Para encontrar el caudal promedio de lodos referente a la posición del potenciómetro se realizó un promedio de las diferentes lecturas numéricas del caudalímetro por un 1 minuto.

Tabla 6: Valores de caudales de lodo por cada paso en el potenciómetro.

Caudal de Lodo		
Posición potenciómetro variador de frecuencia	caudal lodo (l/s)	caudal lodo (l/h)
0	0	0
1	1.04	3744
2	1.32	4752
3	1.61	5796
4	1.91	6876
5	2.27	8172
6	2.65	9540
7	3	10800
8	3.28	11808
9	3.64	13104
10	3.7	13320

Fuente: Autores

La posición del potenciómetro en la que la planta trabaja en condiciones estándar es de entre 2 y 3, la cual corresponde a un caudal de lodos de 1.35 l/s.

❖ Caudal de floculante

Para encontrar el caudal promedio de floculante referente a la posición del potenciómetro se realizó un promedio de las diferentes lecturas numéricas del caudalímetro por un 1 minuto obteniendo los siguientes datos.

Tabla 7: Valores de caudales de floculante por cada paso en el potenciómetro.

Caudal de Floculante		
Posición potenciómetro variador de frecuencia	caudal polímero (l/h)	caudal polímero (l/s)
0	650	0.181
1	900	0.250
2	1050	0.292
3	1200	0.333
4	1350	0.375



5	1500	0.417
6	1700	0.472
7	1950	0.542
8	2000	0.556
9	2200	0.611
10	2400	0.667

Fuente: Autores.

La posición del potenciómetro en la que la planta trabaja en condiciones estándar es de 8, la cual corresponde a un caudal de floculante de 2000 l/h.

❖ Concentración de preparación de floculante

La concentración promedio de la solución que se prepara en el tanque madre es de 1413 ppm.

❖ Concentración en la mezcla

La concentración promedio en la mezcla lodo-floculante es de 305ppm cuando se usa el floculante de planta marca PRAESTOL.

❖ Agua de dilución

No se existe uso de un caudal de agua de dilución.

❖ Velocidad de agitación en el tanque de mezcla

La velocidad de agitación en el tanque de mezcla es de 25 RPM en promedio, aunque este último depende de la posición en la que se encuentre la draga en el tanque de almacenamiento de lodos espesados.

❖ Filtración

La velocidad de desplazamiento de la tela filtrante es en promedio de 5cm/s

❖ Porcentaje de humedad de lodos deshidratados

Se realizó un promedio de la humedad observados en reportes del laboratorio de saneamiento de Ucubamba entre los periodos 2014-2016, se estableció que la planta de deshidratación de Ucubamba obtiene tortas deshidratadas con un porcentaje de humedad del 64.38%.

Tabla 8: Humedades de las tortas obtenidas mediante análisis de laboratorio.

FECHA	LABORATORIO	CÓDIGO	HUMEDAD (%)
14/1/2014	Saneamiento Ucubamba	002/14	64.14
9/1/2014	Saneamiento Ucubamba	002/14	64.14
21/1/2014	Saneamiento Ucubamba	028/14	63.48
30/1/2014	Saneamiento Ucubamba	048/14	61.81
26/6/2014	Saneamiento Ucubamba	320/14	63.79

4/7/2014	Saneamiento Ucubamba	331/14	70.02
17/7/2014	Saneamiento Ucubamba	343/14	62.77
24/7/2014	Saneamiento Ucubamba	355/14	63.75
31/7/2014	Saneamiento Ucubamba	367/14	61.45
5/8/2014	Saneamiento Ucubamba	379/14	65.15
8/8/2014	Saneamiento Ucubamba	383/14	62.72
12/8/2014	Saneamiento Ucubamba	391/14	64.04
14/8/2014	Saneamiento Ucubamba	396/14	60.89
26/8/2014	Saneamiento Ucubamba	416/14	63.92
10/9/2014	Saneamiento Ucubamba	435/14	63.46
18/9/2014	Saneamiento Ucubamba	452/14	62.67
2/10/2014	Saneamiento Ucubamba	476/14	63.23
9/10/2014	Saneamiento Ucubamba	490/14	64.06
30/7/2015	Saneamiento Ucubamba	394/15	80.65
21/12/2016	Saneamiento Ucubamba	563/16	61.3
% Humedad promedio		64.38	

Fuente: Reportes del laboratorio de saneamiento de Ucubamba 2014-2016)

4.3. Desarrollo de la parte experimental

❖ Preselección de floculante

Se contaron con 12 diferentes tipos de polímeros de los cuales se realizaron ensayos a diferentes concentraciones (200, 300, 450 y 600) ppm, evaluándose la calidad del floc formado y clasificándolo según el índice de Willcomb.

Se trabajó de manera similar a la investigación de (Vaxelaire & Olivier, 2006) referente al acondicionamiento de sus lodos con parámetros clave como: tiempo de agitación, tiempo de sedimentación y velocidad de mezcla los cuales en este estudio fueron de 1 minuto, 3 minutos y 290RPM respectivamente.

Tabla 9: Tabla de resultados de la preselección de floculantes

Código Muestra	Nombre Producto	Descripción	Índice de Willcomb	Concentración (ppm)	¿Califica?
2	FLOPAM PL 510 EM	Catiónico, alto peso molecular, alta densidad de carga	4	200	NO
			6	300	NO
			6	450	SI
			8	600	NO

B11	AKA 8400	Catiónico, muy alto peso molecular, muy alta densidad de carga	4	200	SI
			6	300	NO
			6	450	SI
			6	600	NO
4	ADEFLOC- 406	Catiónico, alto peso molecular, baja densidad de carga	4	200	NO
			6	300	SI
			4	450	NO
			6	600	NO
6	FC	Catiónico, alto peso molecular, media densidad de carga	4	200	NO
			2	300	NO
			6	450	NO
			8	600	NO
FA	FA	Aniónico, alto peso molecular, media densidad de carga	0	200	NO
				300	NO
				450	NO
				600	NO
3	FLOPAM 9041	Catiónico, alto peso molecular, baja densidad de carga	6	200	NO
			4	300	SI
			2	450	NO
			2	600	NO
5	SANICA	Catiónico de alto peso molecular	10	200	SI
			8	300	NO
			4	450	
			4	600	
7	FLOPAM 830	Catiónico, alto peso molecular, alta densidad de carga	10	200	SI
			8	300	NO
			6	450	
			6	600	
P	PRAESTOL 650 TR	Catiónico, medio-alto peso molecular, media	2	200	NO
			4	300	SI
			4	450	NO
			2	600	NO

		densidad de carga			
QF0	QUEMIFLOC PWG 1020	Aniónico, bajo peso molecular, baja densidad de carga	0	200	NO
			2	300	
				450	
				600	
QF1	QUEMIFLOC PWG 1021	Aniónico, medio peso molecular, baja densidad de carga	2	200	NO
				300	
				450	
				600	
Y	SQC-8025	Catiónico, alto peso molecular, alta densidad de carga	4	200	NO
				300	
				450	
				600	

Fuente: Autores.

Los floculantes preseleccionados según su código fueron: 2, B11, 4, 3, 5, 7, P. Estos son los que presentaron resultados favorables en la formación de flóculos, la formación de flóculos es de gran importancia en el proceso de deshidratación de los lodos.

Cabe mencionar que en donde el índice de Willcomb es similar en la mayoría de pruebas (4-6), se da porque la carga catiónica específica de cada floculante es igual o muy cercana. La información de la carga catiónica para cada floculante no viene incluida en fichas técnicas.

De los 7 floculantes preseleccionados con anterioridad 4 fueron elegidos siendo estos: B11, 3, 7, P. Esto a razón que además del índice de Willcomb se consideró los floculantes que presentaban resultados semejantes a concentraciones más bajas; es decir; a menores dosis y que favorecía la formación de flóculos, por lo cual al trabajar con dosis más bajas el consumo de floculante será menor y por ende representará un beneficio económico para la planta.

Cabe mencionar que al momento de verter el contenido de las 12 jarras al desagüe se observó que, en 8 de estas, el lodo permanecía pegado, esto se dio en pruebas con un índice de Willcomb ≤ 4 , en el caso 4 floculantes selectos (índice de Willcomb ≥ 6) se observó que en sus jarras los lodos no se adherían. Consideramos la observación cualitativa como favorable, ya que al tener flóculos de cierto tamaño era difícil que se adherían a las paredes de las jarras, esto solo era posible con flóculos coloidales que no lograban sedimentar.

- Ejemplo de la evaluación para un floculante que pasaría la preselección



Figura 28: Resultados obtenidos con el floculante FLOPAM 830 a diferentes concentraciones.

Fuente: Autores

Se observó la calidad del floculo formado cuando se usó el floculante FLOPAM 830. De izquierda a derecha se tuvo las siguientes concentraciones 200ppm, 300ppm, 450ppm, 600ppm. Apreciando la parte extrema izquierda se obtuvo un floc grande, homogéneo y que precipita dejando el agua cristalina, se lo clasifico como excelente (10). En el extremo izquierdo de la figura 28, tenemos por un lado agua turbia, floculos muy pequeños heterogéneos y adherencia por parte de estos a la jarra, clasificándolo con un (2).

En el centro de la imagen tenemos 2 jarras que presentaron características relativamente intermedias entre la mínima y máxima concentración.

- Ejemplo de evaluación para un floculante descartado en la preselección

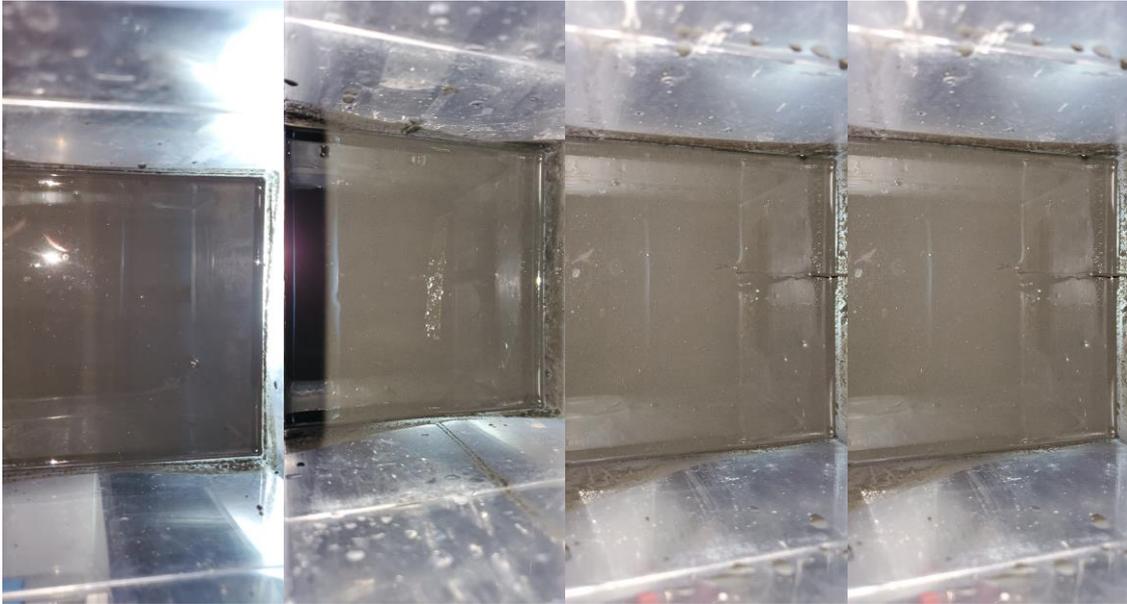


Figura 29: Resultados obtenidos con el floculante ANIÓNICO a diferentes concentraciones.

Fuente: Autores

Se observó la calidad del flóculo formado cuando se usó el floculante (FA). De izquierda a derecha se tiene las siguientes concentraciones 200ppm, 300ppm, 450ppm, 600ppm. Pudimos apreciar en todas las imágenes que se produjeron flóculos coloidales que se clasificaron de acuerdo al índice de Willcomb como 0. Por ende, el floculante quedó descartado.

❖ Selección de floculante

Basándonos en el diseño experimental que se consideró en el capítulo III, se estableció las condiciones óptimas para la experimentación las cuales fueron:

- Ajuste en la velocidad de agitación (no se distinguió velocidad de mezcla lenta/rápida)
- Tiempo de agitación
- Tiempo de sedimentación.

La velocidad de agitación fue seleccionada según 2 criterios:

- Velocidad mínima y máxima de agitación del tanque floculador
- Rango de dosis del ensayo

Estos parámetros fueron contrastados según (Taşdemir, 2012), quien concluye que, “una mezcla rápida asegura que las moléculas floculantes se distribuyan homogéneamente en la suspensión” sumando esto a la información sobre el rango de velocidades de agitación en el tanque floculador (11RPM-46RPM), se establecieron velocidades de agitación que permitieran asegurar la colisión entre partículas de lodo y



floculante, pero cuidando que no sea suficientemente alta como para romper el flóculo. Por ello los valores de la velocidad de agitación fueron de 200, 250, 290 RPM.

En el experimento de (Wang & Dentel, 2010) mencionan que “el grado de floculación disminuye gradualmente a medida que el tiempo de mezcla a alta velocidad aumenta” por ello se estableció un tiempo de mezcla de 1 minuto, suficiente para garantizar la formación del flóculo, tiempos menores a un minuto no aseguran la colisión total cinética de las partículas de lodo con las partículas del floculante. Por otro lado, tiempos mayores a un minuto, provocan, la aglomeración de partículas de floculante que envolverían la partícula de lodo, disminuyendo el grado de deshidratación en la misma.

Además (Taşdemir, 2012) menciona que en su experimento “no hay mucha diferencia entre los valores de turbidez obtenidos en periodos más prolongados de sedimentación”, por ello, fue indistinto establecer un valor de sedimentación corto o prolongado, ya que la turbidez no se ve fuertemente ligada a este parámetro, debido a eso, un tiempo de 30 segundos fue suficiente para la sedimentación.

En cuanto al rango de dosis que se establecieron en la experimentación, es de notar que la concentración trabajada normalmente en la planta fue de 305 ppm, debido a ello se priorizó experimentar con dosis menores a la dosis normal de trabajo, esto con el objetivo de reducir costos de operación, por ello se trabajó con dosis de 100, 200 y 300 ppm.

❖ Promedio humedades de muestras de lodo

Ya que los floculantes fueron ensayados en diferentes semanas, se calculó la humedad del lodo crudo para cada prueba y se realizó un promedio, el cual se detalla en la tabla 10.

Tabla 10: Promedio del porcentaje de humedades por cada floculante ensayado

AKA 8400	FLOPAM 9041	FLOPAM 830	PRAESTOL
88.86%	88.98%	88.94%	88.48%

Fuente: Autores

❖ Promedio Turbiedades iniciales (NTU)

Con los datos entregados por el turbidímetro, se calculó la turbiedad promedio del lodo crudo (turbiedad inicial) para cada floculante en cuestión.

Tabla 11: Promedio de turbiedades iniciales por cada floculante ensayado

AKA 8400	FLOPAM 9041	FLOPAM 830	PRAESTOL
-----------------	--------------------	-------------------	-----------------

57667	53183	51950	53333
-------	-------	-------	-------

Fuente: Autores

❖ Promedio de turbiedades finales

Con los datos entregados por el turbidímetro, se calculó la turbiedad promedio del lodo con su respectiva dosis de floculante para cada experimento en cuestión, así como también se evaluó el porcentaje de remoción de turbiedad haciendo relación su turbiedad inicial con su turbiedad final.

Tabla 12: Resultados en la selección del mejor floculante.

FLOCULANTE	DOSIS FLOCULANTE	VELOCIDAD DE MEZCLA (RPM)	PROMEDIO TURBIEDAD FINAL (NTU)	Porcentaje de remoción de turbiedad (%)
AKA 8400	100	200	35100	39.133
		250	38675	32.934
		290	42750	25.867
	200	200	27	99.953
		250	7.54	99.987
		290	7.375	99.987
	300	200	40.65	99.930
		250	29.95	99.948
		290	36.05	99.937
FLOPAM 9041	100	200	35500	33.249
		250	33300	37.386
		290	43475	18.254
	200	200	2050	96.145
		250	2450	95.393
		290	1885	96.456
	300	200	32.4	99.939
		250	15.8	99.970
		290	31.25	99.941
FLOPAM 830	100	200	21650	58.325
		250	34050	34.456
		290	36175	30.366
	200	200	56.4	99.891
		250	27.35	99.947
		290	20.2	99.961
	300	200	86.35	99.834
		250	35.25	99.932
		290	34.9	99.933
PRAESTOL	100	200	36825	30.953



		250	42925	19.516
		290	46800	12.250
		200	54	99.898
	200	250	103	99.806
		290	290	99.456
		200	21	99.960
	300	250	14	99.974
		290	12	99.978

Fuente: Autores

En los siguientes gráficos se puede observar la influencia de la dosis de floculante usada y la velocidad de mezcla con respecto al porcentaje de remoción de turbiedad, donde las líneas de color rojo, verde y morada representan las tres velocidades empleadas en el ensayo (200 RPM, 250 RPM y 290 RPM), cada vértice corresponde a un valor de dosis/concentración (100ppm, 200ppm y 300ppm) finalmente las líneas azules (unión de cada vértice) representan el porcentaje de remoción de turbiedad (0 – 100%).

En el caso del floculante AKA 8400 (figura 30) tenemos que para una velocidad de mezcla de 200 RPM (línea verde) y una concentración de 100ppm (vértice 100) tenemos un porcentaje de remoción de turbiedad del 40%. También podemos observar que para las dosis de 200ppm y 300ppm no existe una diferencia significativa en el porcentaje de remoción de turbiedad cuando se varía la velocidad de mezcla; es decir; los valores de porcentaje de remoción de turbiedad son muy próximos en las tres velocidades de mezcla.

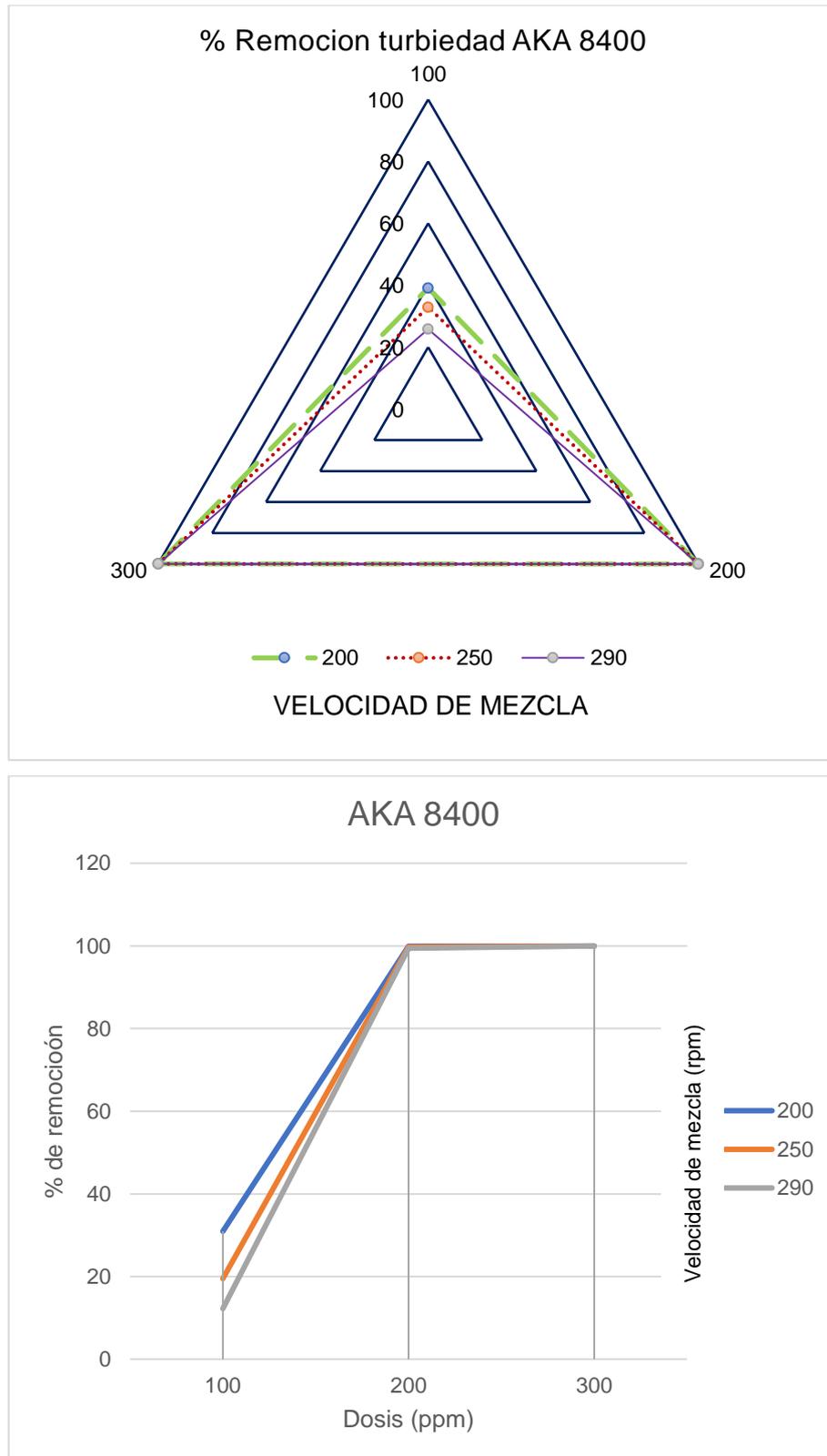


Figura 30: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante AKA 8400

Fuente: Autores



En el caso del floculante FLOPAM 9041 (figura 31) cuando tenemos una concentración de 100ppm se observa una clara variación en el porcentaje de remoción de turbiedad respecto a las diferentes velocidades de mezcla, obteniendo un porcentaje de 38%, 40% y 20% para las velocidades de 200 RPM, 250 RPM Y 290 RPM respectivamente. No siendo así para las concentraciones de 200ppm y 300ppm donde tenemos porcentajes de remoción similares con respecto a las velocidades de mezcla.

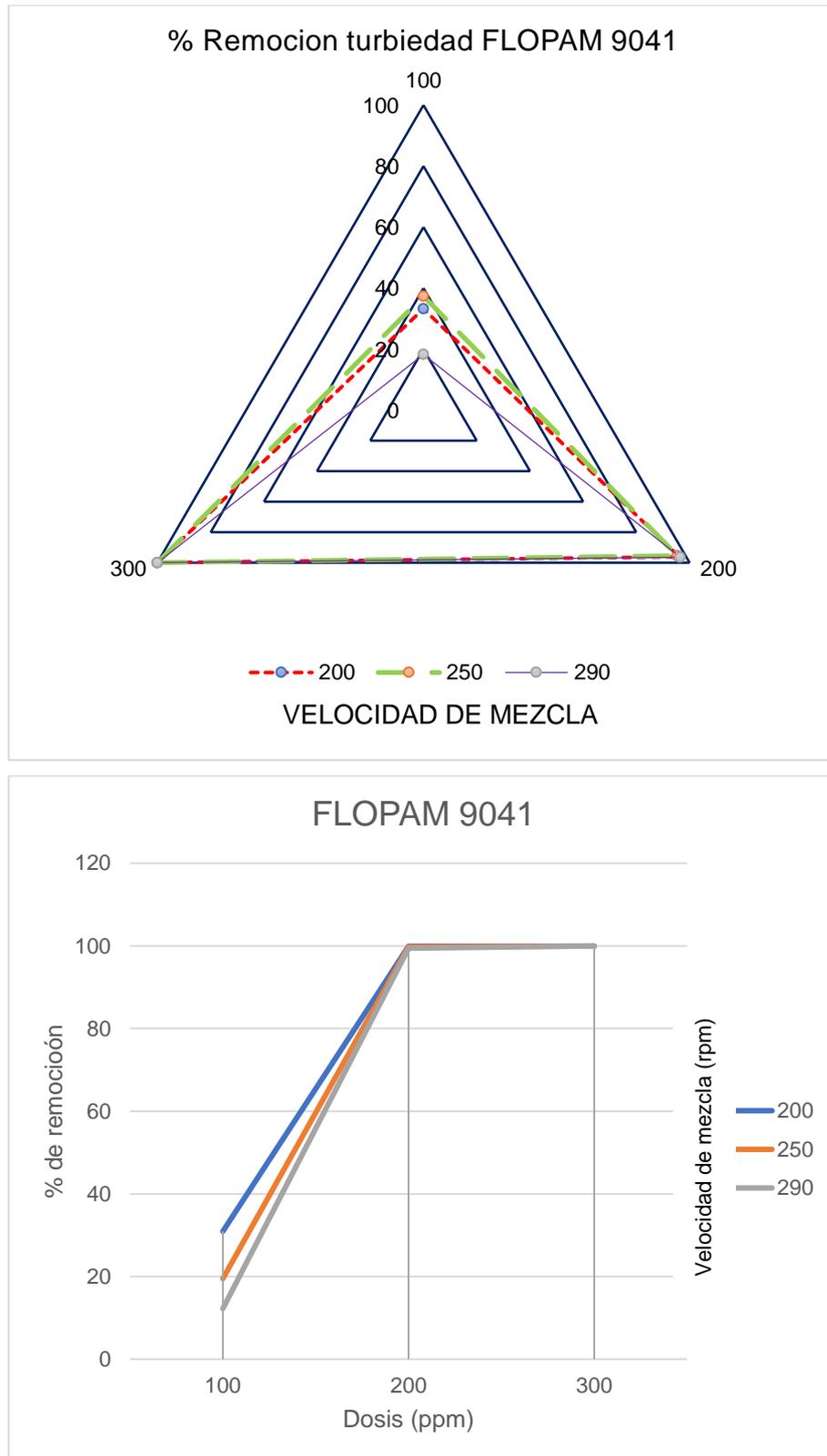


Figura 31: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante FLOPAM 9041

Fuente: Autores



Para el floculante FLOPAM 830 (figura 32) se observa que existe un comportamiento similar al anterior floculante pues existe una variación en el porcentaje de remoción de turbiedad para una concentración de 100ppm con respecto a las velocidades de mezcla donde se obtiene un porcentaje de remoción de turbiedad de 60%, 38% y 36% para las velocidades de 200 RPM, 250 RPM Y 290 RPM respectivamente. Para las concentraciones de 200ppm y 300ppm se observa un comportamiento similar al anterior caso donde la variación de la velocidad no representa una variación significativa en el porcentaje de remoción de turbiedad.

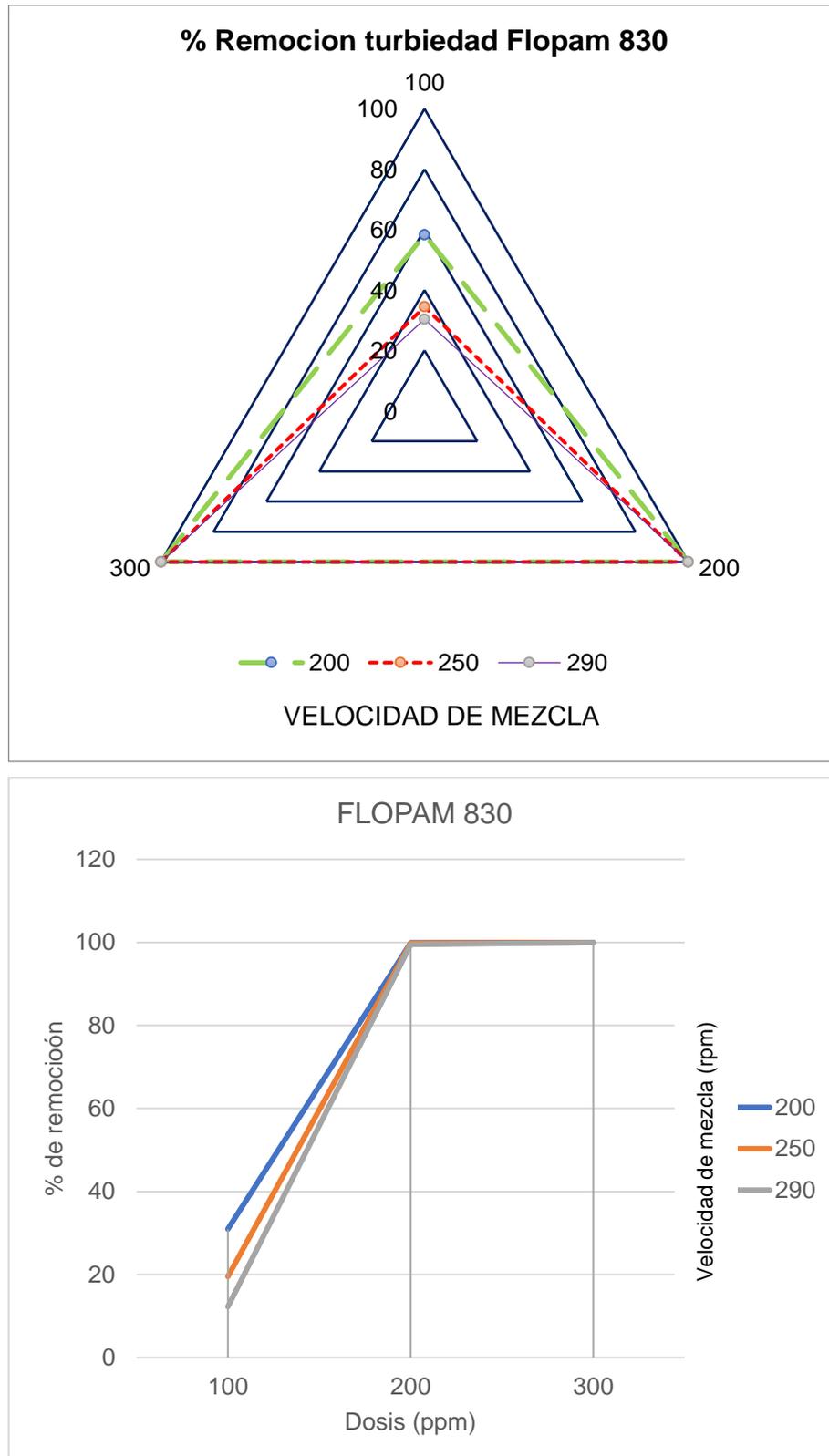


Figura 32: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante FLOPAM 830

Fuente: Autores



Finalmente, para el floculante PRAESTOL (figura 33) se observa que para la concentración más baja (100ppm) se obtiene un porcentaje de remoción de turbiedad de 38%, 20% y >20% para las velocidades de 200 RPM, 250 RPM Y 290 RPM respectivamente. Se observa que para las concentraciones de 200ppm y 300ppm no existe una influencia significativa en el porcentaje de remoción de turbiedad con respecto a la variación de velocidad de mezcla, repitiéndose el comportamiento antes visto en los demás floculantes.

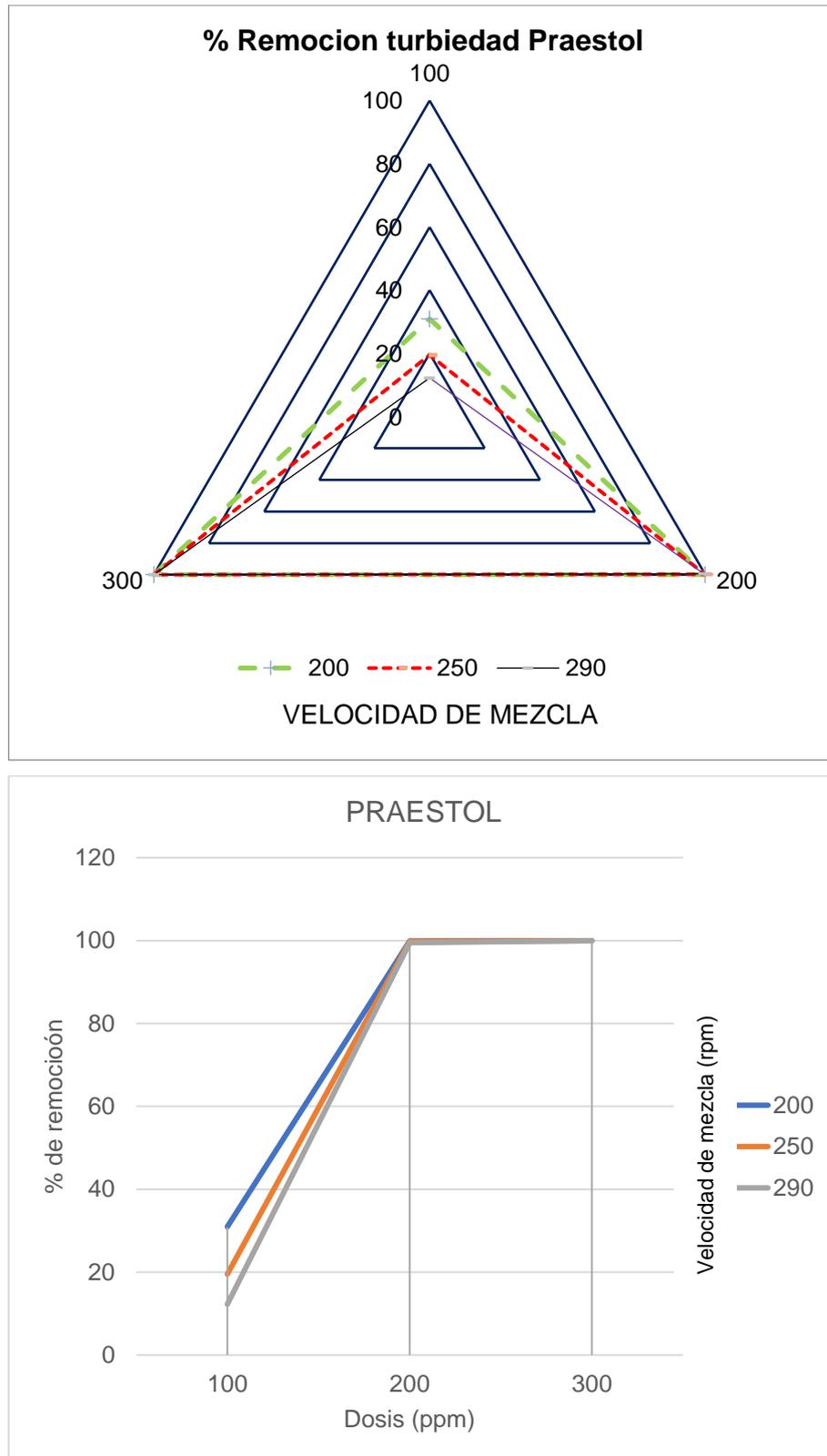


Figura 33: Influencia de la dosis y velocidad de mezcla en el % de remoción de turbiedad para el floculante PRAESTOL

Fuente: Autores



Tabla 13: Tabla de resultados en la selección del mejor floculante en relación a su % de remoción de turbiedad.

FLOCULANTE	MEJOR DOSIS (PPM)	MEJOR VELOCIDAD DE AGITACIÓN (RPM)	TURBIEDAD FINAL (NTU)	% REMOCIÓN DE TURBIEDAD
AKA 8400	200	290	7.38	99.987
FLOPAM 9041	300	200	32.4	99.939
FLOPAM 830	200	290	20.2	99.961
PRAESTOL	300	290	12	99.978

Fuente: Autores

Una vez finalizado los ensayos de la prueba de jarras después de trabajar con tres diferentes concentraciones y velocidades para cada floculante se obtuvieron un total de 72 experimentos incluyendo el duplicado. Finalmente se eligió de cada floculante el ensayo que presento el mayor porcentaje de remoción de turbiedad como se presenta en la tabla 4.8, donde si comparamos los porcentajes de remoción entre los 4 floculantes tuvimos que la mejor remoción de turbiedad se dio con el floculante AKA 8400 con un 99.987% seguido por el floculante PRAESTOL con 99.978%, seguido de FLOPAM 830 con 99.961% y finalmente el floculante FLOPAM 9041 con un porcentaje de remoción de 99.939%.

❖ Prueba de filtrado

Mediante el uso de un equipo de filtración que cuenta con el mismo material filtrante usado por la banda, se experimentó durante un intervalo de 40 segundos pesándose el drenado que pasaba a través del material filtrante para cada uno de los distintos floculantes en cuestión.

Según menciono en su estudio (Ginisty et al., 2012) “un buen índice de drenabilidad se debe en la mayoría de los casos a una rápida cinética de liberación de agua y se modifica principalmente por la naturaleza del polímero (estructura, cationicidad, dosis y tiempo de mezcla).” Debido a esto, relacionamos la drenabilidad con la cinética en la liberación de agua realizada en las pruebas de filtrado, teniendo así valores

equiparables.

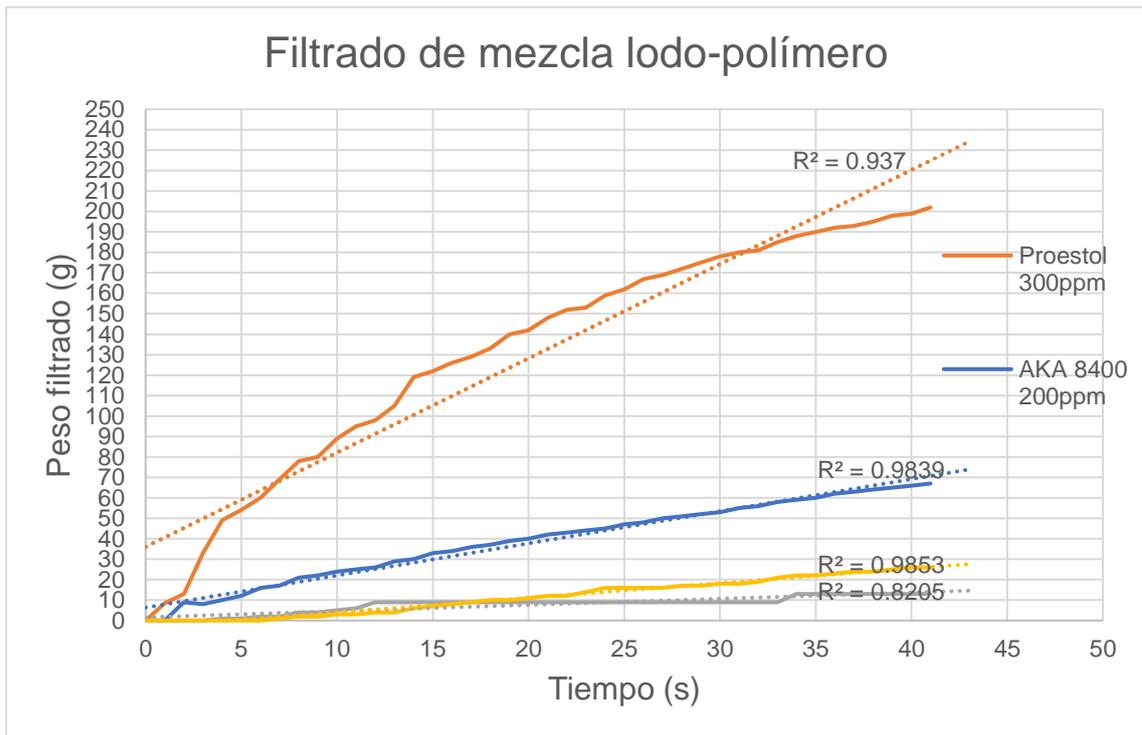


Figura 34: Peso de agua drenado por cada floculante analizado.

Fuente: Autores

Tabla 14: Tabla de resultados en la selección del mejor floculante en base a su drenabilidad

FLOCULANTE	% REMOCIÓN TURBIEDAD	PESO DE FILTRADO (g)	DIMENSIÓN DEL FLÓCULO (mm)	VISCOSIDAD BROOKFIELD (C=1;2.5;5) g/l
AKA 8400	99.987	65	D-10	(150; 340; 660) cps
FLOPAM 9041	99.939	25	D-12	(45; 130; 280) cps
FLOPAM 830	99.961	12	D-13	(170; 390; 760) cps
PRAESTOL	99.978	200	D-8	(250 a 400) cps

Fuente: Autores

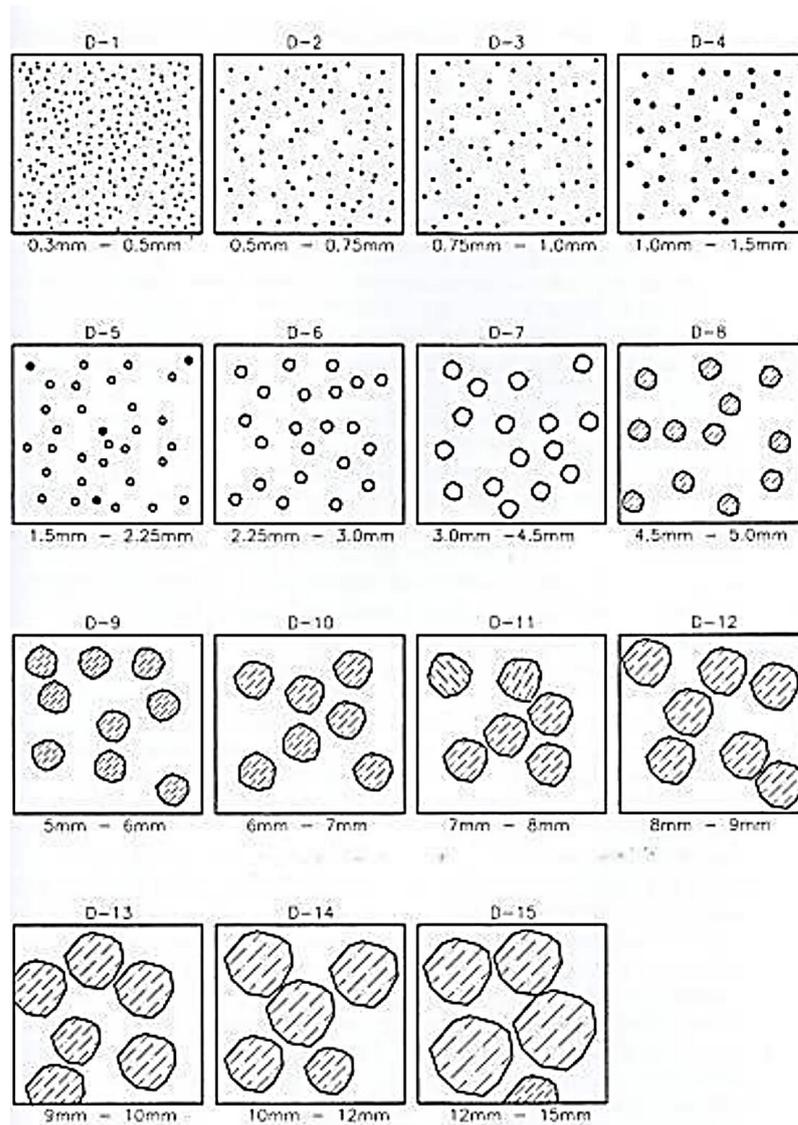


Figura 35: Comparación de la dimensión del flóculo.

Fuente: Company, 2012

Observando la sedimentación previa a la experimentación en el filtro por gravedad se notó que flóculos más grandes se separaron más fácilmente de su fase líquida.

Se determinó que PRAESTOL ofreció un tamaño de floc clasificado como D-7 según la figura 35 y es el que presento mejores resultados de drenabilidad.

Se obtuvieron en un tiempo de 40s los siguientes pesos y tamaños para el resto de floculantes: AKA 8400 un tamaño de flóculo del orden de D-10 y un peso de filtrado de 65g, FLOPAM 9041 un tamaño de flóculo del orden de D-12 y un peso de 25g y finalmente el floculante FLOPAM 830 con un tamaño de flóculo del orden D-13 con un peso de filtrado de 12g.

Sobre PRAESTOL mencionamos que obtuvo el mayor peso de filtrado (mejor drenabilidad), pero una buena drenabilidad no necesariamente significaría buenas



características de deshidratación (Ginisty et al., 2012), para ello el índice de sequedad nos indicaría mejor la relación entre estas dos. Debido a que los sólidos suspendidos formaron flóculos del orden de D-7 se esperó que estos tendrían mejores características mecánicas (mayor resistencia) evitando su fragmentación lo cual también se reflejó en el estudio de (Qi et al., 2011) pues considera que flóculos más compactos son los que poseen mayor resistencia y tamaño (3 a 4.5mm).

Por otro lado tenemos a AKA 8400 el cual presentaba un tamaño de floc entre (6 a 7)mm y una drenabilidad con un peso de filtrado de 65g, ya que hablamos de la relación entre la drenabilidad y la deshidratación, la atención se situó en otros parámetros de alto interés que rigen el contenido final de sólidos en la torta, según (Saveyn et al., 2008) son: características del polielectrolito y la dosis del mismo.

Al referirnos a las hojas técnicas de Flopam 830 y Flopam 9041, se situó el interés en sus viscosidades dinámicas, esto nos daría la pauta para saber del porqué el filtrado de estos parece un gel pese a que los dos ofrecieron una buena remoción de turbiedad en sus sobrenadantes, por ello fue importante recalcar lo que concluye (Liao et al., 2014) “floculantes catiónicos con baja viscosidad no son beneficiosos en la formación de ligaduras debido a que reducen la extensión del polímero y por lo tanto reduce la probabilidad de colisiones entre partículas de polímero y lodo.” Basado en este criterio fue fácil darse cuenta de que debido a una mayor viscosidad era natural que presenten tamaños de floc más grandes y que debido a esto se hace necesario un esfuerzo mayor para poder drenar el agua sobrenadante al momento de deshidratarlo.

Según concluye (Ginisty et al., 2012) “los 3 parámetros más importantes dentro del espesamiento de lodos mediante filtración por gravedad son: la relación de concentración (capacidad de espesamiento de lodos), índice de drenabilidad (cinética de liberación de agua) y la calidad del filtrado (capacidad de floculación de lodos), esto obligo a corroborar los resultados en esta prueba con los resultados en planta, pese a que las variables en esta varían en cuanto ajustes precisos mediante potenciómetros del tablero de control.

4.4. Implementación en planta

Para la implementación en planta se diseñó una hoja de cálculo en Excel la cual permitiría al operario de turno seleccionar entre 4 opciones.

1. Configurar los caudales volumétricos de lodo y floculante según la concentración que se desea en la mezcla LODO/POLÍMERO a partir de una concentración conocida en el tanque preparador de floculante líquido.
2. Conocer la concentración en la mezcla LODO/POLÍMERO a partir de los caudales volumétricos de lodo y floculante en base a una concentración conocida en el tanque preparador de floculante líquido.

3. Conocer los valores equivalentes en cada paso referente a los 4 potenciómetros del panel de control (caudal de lodos, caudal de floculante, velocidad de desplazamiento de la banda, velocidad de agitación en el tanque de mezcla).
4. Conocer la razón de dosificación de floculante en polvo para la preparación de la dilución en el tanque preparador de floculante líquido

ETAPA E.P PLANTA DE DESHIDRATACION DE LODOS DE UCUBAMBA	
	Configurar caudales de lodo y polimero
	Conocer la concentracion en la mezcla lodo polimero
	Ver las equivalencias de valores con respecto a cada paso del potenciometro del tablero de C
	Ver las equivalencias de valores con respecto a cada paso del reloj dosificador

Figura 36: Menú principal del programa para ajustar caudales.

Fuente: Autores

Menú principal del programa para calcular caudales y conocer concentraciones en base a cualquiera de las dos.

Configuracion de caudales de LODO y POLIMERO	
Ingrese caudal a trabajar lodos [l/s]	1
Ingrese concentracion deseada mezcla Lodo/Polimero [ppm]	300
Ingrese concentracion en el tanque de preparacion de polimero [ppm]	1000
Ingrese concentracion deseada de polimero diluido [ppm]	1000
SET Caudal de polimero madre [l/h]	2052.00
SET Caudal de agua de dilucion [l/h]	0.00
Regresar menu principal	

Figura 37: Ejemplo para la configuración de caudales de lodo y floculante.

Fuente: Autores

Para establecer una concentración en la mezcla lodo/polímero de 300ppm y configurar sus respectivos caudales, cuando se tiene una concentración de 1000ppm en el tanque preparador de floculante líquido y el caudal de dilución no está habilitado.

Conocer las concentraciones en base a caudales de LODO y POLIMERO preestablecidos	
Ingrese caudal del lodos [l/s]	2
Ingrese caudal de polimero [l/h]	2000
Ingrese concentracion en el tanque de preparacion de polimero [ppm]	1000
Ingrese caudal de agua de dilucion [l/h]	0
Concentracion en caudal de polimero diluido [ppm]	1000.0
Concentracion en mezcla Lodo/Polimero [ppm]	217.4
Regresar menu	

Figura 38: Ejemplo del cálculo de las concentraciones en los caudales de la mezcla lodo/polímero y agua de dilución.

Fuente: Autores

Para conocer las concentraciones en la mezcla lodo/polímero y caudal de agua de dilución, cuando se tuvieron caudales de lodos, floculante y agua de dilución de 2 l/s, 2000 l/h y 400 l/h respectivamente.

		C [g/min]	Posicion reloj		
		138.38	0		
		154.62	2		
		168.00	4		
		188.29	6		
		204.00	8		
		224.00	9		

Q de agua	l/s	l/min	l/h	C [g/min]
ingreso	2.40602	144.361	8661.672	204.00
Concentracion de salida	g/l	mg/l	ppm	%
	1.413	1413.12	1413.12	0.141



Figura 39: Ejemplo para conocer la concentración a la cual se está preparando la dilución en el tanque preparador de floculante líquido.

Fuente: Autores

Para conocer la concentración a la cual se preparó la dilución primaria de floculante (1413.12 ppm) cuando el reloj del motorreductor se ha establecido en 8, lo cual corresponde a una razón de caída de 204g/min de floculante granular y un caudal de 2.4 l/s de agua potable, este último valor del caudal del agua es un valor de caudal fijo.

❖ Pruebas en planta

Previo a la experimentación en planta recordamos los parámetros que fueron probados en laboratorio: dosis de floculante en la mezcla, humedad de la torta, velocidad de mezcla y drenabilidad. Por otro lado, los parámetros que fueron observados en planta

además de los del laboratorio fueron: caudal de floculante, caudal de lodo, porcentaje de deshidratación de la torta y capacidad de operación continua.

- Prueba con FLOPAM 830



Figura 40: Floculación con FLOPAM a distintas concentraciones.

Fuente: Autores

Se configuró los caudales de lodo y floculante, la velocidad del avance del filtro se estableció en (5.5 cm/s) y la velocidad de agitación del tanque agitado se estableció en (33 RPM) estos dos últimos parámetros corresponden a valores bajo condiciones estándar de operación

Experimentando con las concentraciones establecidas en la prueba de jarras, donde la dosis óptima para este floculante se encontraba en 200 ppm (en la mezcla), observamos que esta concentración no reflejaba una operatividad óptima en el filtro banda, esto se puede apreciar en la imagen de la izquierda donde se produjo un “inundación” de la misma, este fenómeno se explicaría en las condiciones de mezcla, ya que a diferencia de la prueba de jarras, en planta existen 2 tipos de mezcla, una por convergencia de caudales donde se da una mezcla por turbulencia la cual favorecería la colisión entre partículas de lodo y partículas de polímero para la formación del floc y una mezcla en un tanque agitado que sería una mezcla lenta que a su vez favorecería la acumulación de estas partículas para formar flóculos más grandes, debido a “la leve influencia que tienen estos parámetros en la formación de la torta” (Saveyn et al., 2008) se optó por probar la segunda mejor dosis en vez de cambiar los parámetros del filtro banda o la velocidad de agitación del tanque de mezcla, cabe recalcar que la humedad de la torta fue de 67.75%

Cuando se aumentó la dosis a 300ppm, las características cambiaron y se presenció la formación de flóculos mucho más grandes del tamaño de (D-13) en primera instancia la operación fue normal dentro de los primeros 20 minutos, pero al transcurrir el tiempo, la

tela del filtro se tapaba y ocurría el “inundación”, esto presumiblemente debido a la viscosidad intrínseca del floculante que (Liao et al., 2014) menciona “floculantes con viscosidades intrínsecas más grandes tienen la probabilidad de atrapar más partículas del medio en suspensión formando así flóculos más grandes”, por ende algún momento la tela filtrante iba a taparse probablemente a que el tamaño de abertura de malla de la tela era menor que el tamaño del flóculo o bien debido a la velocidad de avance de la banda debido como menciona (OLIVIER, 2003) diciéndonos que “una reducción en la velocidad de la banda influye reduciendo la fluencia del filtrado y obstruye la tela filtrante aunque la calidad del filtrado aumenta” en cualquier de los dos casos la humedad de la torta llegó al 67.08%

- Prueba con AKA 8400



Figura 41: Floculación con AKA 8400 y porcentaje de humedad en el lodo resultante.

Fuente: Autores

Se inició configurando los caudales de lodo y floculante para obtener una concentración en la mezcla de 200ppm, la velocidad de avance de la tela filtrante (5.5 cm/s) y la velocidad de agitación del tanque (33 RPM) estos dos últimos parámetros corresponden a valores bajo condiciones estándar de operación, pero se observó una inundación el filtro, y aunque la drenabilidad del mismo fue mucho mejor, el floc formado fue pequeño (D-4), estas observaciones ya fueron explicadas por el primer floculante.

Luego se trabajó con una concentración de 300 ppm, los flóculos fueron grandes (D-11), el filtro podía mantener una operación constante y aunque la humedad de la torta fue de 67.5%, no se podía permitir obtener una torta con una concentración de agua tan alta, por ello y debido a lo que concluye (Saveyn et al., 2008) en su estudio mencionando “que el contenido de sólidos en la torta se ve influenciado por la dosis del polímero y las características del mismo más que por las características del lodo”, debido a eso planteamos encontrar la dosis óptima que nos permita obtener una torta con un

contenido de humedad igual o por debajo del 64.38%, para ello realizamos experimentos empíricos de prueba error en planta conjuntamente con la medición de la humedad de la torta resultante en cada caso. Adicional a eso el trabajo de (OLIVIER, 2003) establece que una reducción de la velocidad de las bandas genera una ganancia relativamente grande en la sequedad de la torta a la salida de los filtros de banda”, por ello fue importante ajustar la velocidad del filtro banda.

Se encontró que el floculante AKA 8400 con una dosis en la mezcla de 285 ppm, una velocidad de agitación de 20RPM y una velocidad de avance del filtro de 6.2 cm/s reflejaba una humedad en la torta del 60.60%, permitía una operabilidad continua de trabajo.

Se indagó la razón de no obtener porcentajes menores al 60% en deshidratación mecánica mediante un filtro banda, esto se concluye en el estudio de (Vesilind, 1994) el cual menciona que una de las razones por las que la deshidratación de lodos suele fracasar es que parte del agua tiende a adherirse a las superficies de la partícula del flóculo y que el resto del agua no puede ser separada por medios mecánicos.

- Prueba con PRAESTOL



Figura 42: Floculación con PRAESTOL.

Fuente: Autores

Se inició configurando los caudales de lodo y floculante para obtener una concentración en la mezcla de 300 ppm (óptimo en la prueba de jarras), la velocidad del avance del filtro (5.5 cm/s) y la velocidad de agitación del tanque agitado (33 RPM) estos dos últimos parámetros corresponden a valores bajo condiciones estándar de operación, se observó que el tamaño del floc es de (D-8), la drenabilidad se corroboraba con lo observado en la prueba de jarras y la humedad de la torta fue de 61.17%.

En este polímero recalcamos que el tamaño de flóculo es menor al tamaño de flóculo observado en el floculante aka 8400, lo que por consecuencia formaría una torta con un



menor espesor bajo las mismas condiciones, intuitivamente flóculos más grandes formarían tortas con contenido con mayor contenido de sólidos, esto se explicó en el trabajo de (Novak, 2006) “la deshidratación de las tortas húmedas gruesas es mucho más lenta que deshidratar tortas húmedas finas porque el agua expulsada deben pasar a través de la formación de “piel” del filtro”. En el caso de Flopam 830 la torta húmeda formada fue gruesa, la torta húmeda formada por PRAESTOL fue fina y la torta formada por aka 8400 fue un intermedio entre las dos.



CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los floculantes con altos pesos moleculares y altas densidades de carga catiónica (AKA 8400 y PRAESTOL) permitieron obtener un porcentaje de remoción de humedad de 60,60% y 61,17% respectivamente.
- Floculantes de carácter aniónico son incompatibles para el trabajo con materia de carácter u origen orgánico, siendo estos los siguientes: FA, QUEMIFLOC PWG 1020 Y QUEMIFLOC PWG 1021, los mismos que no pasaron la preselección siendo descartados en función de los resultados obtenidos.
- AKA 8400 fue el floculante que presento el mejor resultado de disminución de turbiedad en las pruebas de jarras con un porcentaje de remoción del 99.987% a una velocidad de agitación de 290 RPM y una dosis en la mezcla de 200ppm.
- PRAESTOL fue el floculante que presento la mejor cinética de liberación de sobrenadante, con un peso drenado de 200g en un lapso de 40 segundos.
- Con la información obtenida se desarrolló un programa en Excel que permitió la estandarización del proceso de la configuración de caudales de lodo y polímero basándose en la concentración requerida a la mezcla partiendo de una concentración conocida de floculante diluido.
- El floculante con el cual se obtuvo el menor porcentaje de humedad; es decir; una mejor deshidratación fue AKA 8400 con un 60,60% donde se trabajó con una dosis de 285 ppm, una velocidad de agitación de 20RPM y una velocidad de avance del filtro de 6.2 cm/s.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda una calibración periódica en los equipos de medición dentro de la planta con la finalidad de garantizar que los resultados obtenidos en el estudio sean reproducibles.
- Con la finalidad de un control estricto de caudales, se recomienda un reemplazo con caudalímetros digitales y un variador de frecuencia en el motorreductor del tanque preparador de polímero.
- Se recomienda realizar un estudio de caudales de lodos y floculante antes que ingresen al tanque floculador, debido a su influencia en las características del flóculo.
- Culminado el proyecto dentro de planta se recomienda la continuidad de estudios dentro de la misma para optimizar aún más el proceso, pues se observó que se puede mejorar el proceso de deshidratación y filtrado de los lodos.



CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, C., & Borja, X. (2015). Evaluación del uso de polímeros en la concentración de biomasa en un reactor de lodos activados. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Bermeo, A., & Idrovo, E. (2014). Aprovechamiento de lodos deshidratados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Bioingeniería de Aguas Residuales. (2005). ACODAL.
- Borras, X. (2011). Floculantes para el tratamiento de aguas: Los polímeros flocular mejor. Madrid: Interempresas.
- Castellanos-Rozo, J., & Merchán, N., & Galvis, J., & Manjarres, E., (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. DOI: <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876>
- CIDTA, (2014). Tipos de a condicionantes poliméricos. Salamanca: Universidad de Salamanca
- COMPANY, J. (2000). Coagulantes y Floculantes Aplicados en el Tratamiento de Aguas. Grinver S.A. Barcelona, España
- CONAGUA. (2015). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales "Tratamiento y disposición de lodos". Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua
- De Moura, E., & Sandoval, B. (2012). Propuesta de alternativas de floculantes para la deshidratación de lodos biológicos de la planta de tratamiento de aguas residuales de alimentos Polar Comercial, CA. – Planta Turmero. Valencia: Universidad de Carabobo.
- Durazno Orellana, G., & Díaz Torres, J. (2009). Modelo de gestión para el manejo del sistema de extracción, deshidratación y disposición final de lodos de lagunas de estabilización [Master's Thesis]. Universidad del Azuay.
- Eddy, M. &. (1995). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización.
- ETAPA EP. (2019). Plan maestro de gestión de biosólidos en plantas de tratamiento de aguas residuales de Cuenca, Fase 1 Prefactibilidad. Cuenca.
- Fonfría, R. S., Sans, R., & Ribas, J. de P. (1989). Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Marcombo.
- Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. Documentos De Trabajo ECAPMA, (1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- Ginisty, P., OLIVIER, J., Vaxelaire, J., & Fortuny, S. (2012, septiembre). Influence of flocculation on sewage sludge thickening and dewatering. 3rd European Conference on Sludge Management. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01294328>
- Guilmain, J. (1990). Los lodos de depuración de aguas residuales urbanas. España: Junta de Andalucía.
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). Ingeniería ambiental. Pearson Educación.



- Izquierdo, A. (2015). Determinación de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio aplicado en la planta de tratamiento de agua de la central termoeléctrica "El Descanso". Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Liao, Y., Zheng, H., Qian, L., Sun, Y., Dai, L., & Xue, W. (2014). UV-Initiated Polymerization of Hydrophobically Associating Cationic Polyacrylamide Modified by a Surface-Active Monomer: A Comparative Study of Synthesis, Characterization, and Sludge Dewatering Performance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(27), 11193-11203. <https://doi.org/10.1021/ie5016987>
- Limón, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamientos de aguas residuales, ¿Problema o Recurso? Guadalajara, Jalisco.
- López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., García, H. A., & Cervantes Carrillo, F. J. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño.
- López, J. S., Burgos, A. J., & Rodríguez, P. U. (2014). COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN (FT-PRI-001).
- MARIO, D. F., JOSE. (2018). Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Martínez, M. (2015). Uso de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Menendez, C., & Perez, J. M. (2007). Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales. <https://isbn.cloud/9789591606198/procesos-para-el-tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2013). Lodos de depuradora. Catálogo de residuos utilizables en construcción. España: Gobierno de España.
- Morales, R., (sf). Tratamiento de lodos. Capítulo IV. México, Universidad de las Américas de Puebla.
- Moretón, E. (2007). Filtración de lodos industriales. Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua. Barcelona: Escuela de Negocios.
- Moura, E., & Sandoval, B. (2012). PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE FLOCULANTES PARA LA DESHIDRATACION DE LODOS BIOLÓGICOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALIMENTOS POLAR COMERCIAL, CA. - PLANTA TURMERO. Valencia: Universidad de Carabobo.
- Novak, J. T. (2006). Dewatering of Sewage Sludge. *Drying Technology*, 24(10), 1257-1262. <https://doi.org/10.1080/07373930600840419>
- OLIVIER, J. (2003). ETUDES DES FILTRES A BANDES POUR LA DESHYDRATATION MECANIQUE DES BOUES RESIDUAIRES URBAINES [Theses, Université de Pau et des Pays de l'Adour]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01294710>
- Ramalho, R. S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Reverte.
- Saveyn, H., Curvers, D., Thas, O., & Van der Meeren, P. (2008). Optimization of sewage sludge conditioning and pressure dewatering by statistical modelling. *Water Research*, 42(4), 1061-1074. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.09.029>
- Taşdemir, T. (2012). Effect of Mixing Conditions on Flocculation.



Tratamiento de Lodos. (s.f) Tratamiento de aguas residuales y lodos biológicos. Madrid, España.

Trejos, M., & Agudelo, N. (2012). Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa "Comestibles La Rosa" como alternativa para la generación de biosólidos.

Vaxelaire, J., & Olivier, J. (2006). Conditioning for Municipal Sludge Dewatering. From Filtration Compression Cell Tests to Belt Press. *Drying Technology*, 24(10), 1225-1233. <https://doi.org/10.1080/07373930600838090>

Vesilind, P. A. (1994). The role of water in sludge dewatering. *Water Environment Research*, 66(1), 4-11. <https://doi.org/10.2175/WER.66.1.2>

Vásconez, D. (2013). Reducción del nivel de sólidos suspendidos del agua de retro lavado en la etapa de filtración. Quito: Universidad Central del Ecuador.

Wang, Y. L., & Dentel, S. K. (2010). The effect of high speed mixing and polymer dosing rates on the geometric and rheological characteristics of conditioned anaerobic digested sludge (ADS). *Water Research*, 44(20), 6041-6052. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.068>

Water Environment Federation. (2010). *Designo f Municipal Wastewater Treatment Plants* (5 ed.). Virginia, Estados Unidos.