

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

EVALUACIÓN DE POSIBLES MEJORAS EN UN SISTEMA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LOS
BENEFICIOS DE CAFÉ MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
EQUIPO DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF) PARA EL
AUMENTO DE LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ

Proyecto de Graduación puesto a consideración ante la Escuela de Ingeniería
Química, como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Química

JOCELYN COROMOTO QUESADA AMARO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
San José, Costa Rica
2023

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.



Mag. Adolfo Ulate Brenes
Presidente



Lic. Esteban Gamboa Gamboa
Director del proyecto



Lic. Natalia Montero Rambla
Lector del proyecto



Lic. Carlos Cambronero Salas
Lector del proyecto



PhD. Leonardo Garro Mena
Miembro invitado



Jocelyn Coromoto Quesada Amaro
Sustentante

DEDICATORIA

Todo este trabajo lleno de esfuerzo y dedicación se lo dedico primeramente a Dios, por ser parte fundamental de mi desempeño en la universidad, por nunca dejarme sola cuando más lo he necesitado y por ayudarme en cada etapa de mi vida a ser la mejor versión de mí.

A mi madre Anais, que siempre velo por mi salud tanto física como mental a través de estos años de estudio. Por ser además de mi madre una amiga, una ingeniera profesional y luchadora con deseos de verme en lo más alto de la cumbre. A esta mujer tan especial que admiro con todo mi corazón. En donde un par de líneas no describen todo el proceso por el que pasamos para llegar a este punto. Ojalá algún día la vida te devuelva el triple de las cosas tan lindas que hiciste por mí y que juntas podamos cumplir todos nuestros sueños.

A mi papá, que siempre anhelo con todo su ser verme como ingeniera cumplir mis sueños. Espero que este sea uno de muchos más que me veas cumplir y que puedas disfrutarlos a mi lado. Te mereces todos mis éxitos por siempre ser el padre bondadoso que todos en la vida se merecen. Esto es para ti.

AGRADECIMIENTOS

Parte fundamental de este proceso es agradecer a Dios, por todos los momentos en los que me impulsó a seguir adelante a pesar de las dificultades.

Agradezco profundamente a mis compañeras de vida y estudio: Laura, Stephanie y María José. Por siempre dar absolutamente todo cuando más se necesitaba, por siempre apoyarnos en momentos de estrés y por facilitar gran parte del proceso de carrera. Gracias desde el fondo de mi corazón por todas las veces en las que me impulsaron a no darme por vencida, a luchar por los sueños, a creer en mi cuando las condiciones eran difíciles y a dar la milla extra. Sin ustedes, no sería la profesional que soy hoy en día. Me llevo la felicidad más grande de saber que seguirán siendo mis amigas para el resto de la vida. Espero que encuentren el apoyo y la motivación en mi como yo siempre lo hice con ustedes.

Asimismo, quiero agradecer a María S que independientemente de las carreras que estudiamos, siempre fue mi apoyo en los últimos años de universidad, mi fiel compañera que durante muchos años me apoyó con todo el amor del mundo y me brindó la paz emocional para concluir satisfactoriamente este proceso universitario. Sin duda alguna, estamos cumpliendo nuestros sueños de admirarnos y vernos crecer profesionalmente juntas. Espero que la vida te recompense por siempre apoyar a todos de la forma en la que lo haces.

A los profesores que a través de los años me ayudaron como guías del conocimiento para poder formarme como profesional. Gracias por todo el apoyo que durante estos últimos semestres me brindaron para poder concluir de forma eficiente mi carrera universitaria. Finalmente, agradecida al 100% con mi alma máter la Universidad de Costa Rica por todo el conocimiento y sabiduría que logré adquirir en estos años de estudio.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
Introducción.....	1
CAPÍTULO 2	4
Producción de café en Costa Rica.....	4
2.1. Metodología.....	4
2.2. Proceso de beneficiado de café	4
2.2.1. Operaciones unitarias que generan aguas residuales.....	7
2.3. Tratamiento para aguas residuales.....	8
2.3.1. Pretratamiento.....	8
2.3.2. Tratamiento primario	9
2.3.3. Tratamiento secundario.....	12
2.3.4. Tratamiento terciario.....	15
2.3.5. Tratamiento de lodos.....	16
2.4. Reglamentación y trámites actuales para operar una PTAR.....	18
CAPÍTULO 3	20
Funcionamiento previo a la implementación del DAF	20
3.1. Metodología.....	20
3.2. Proceso productivo actual de la empresa.....	21
3.3. Tratamientos actuales que se llevan a cabo en la PTAR de la empresa.....	27
3.3.1. Pretratamiento.....	28
3.3.2. Tratamiento primario	28
3.3.3. Tratamiento secundario.....	29
3.4. Datos históricos del comportamiento de parámetros actuales	30
3.5. Comparativa de los datos históricos con respecto a la legislación	39
CAPÍTULO 4	42
Implementación del DAF piloto.....	42
4.1. Metodología.....	42
4.2. Puesta en marcha del DAF piloto en la empresa.....	43

4.3. Comportamiento de parámetros al implementar el DAF piloto.....	47
4.4. Eficiencia del DAF	54
4.5. Comparativa de los datos con respecto a la legislación.....	60
4.6. Comparativa entre ambas cosechas	61
CAPÍTULO 5	64
Propuesta de diseño del DAF y elaboración de un manual de operación y mantenimiento para la PTAR	64
5.1. Metodología.....	64
5.2. Diseño de un equipo de flotación por aire disuelto (DAF)	65
5.3. Parámetros de diseño	67
5.4. Equipos auxiliares y materiales de construcción.....	77
5.5. Disposición de lodos.....	82
5.6. Diagrama de flujo de la PTAR y diagrama del DAF	83
CAPÍTULO 6	86
Costos de inversión asociados al diseño propuesto para el DAF	86
6.1. Metodología.....	86
6.2. Costo de inversión del equipo.....	86
6.3. Escenarios financieros	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
NOMENCLATURA.....	95
BIBLIOGRAFÍA	96
APÉNDICES	100
APÉNDICE A: RESULTADOS.....	100
APÉNDICE B: MUESTRA DE CÁLCULO.....	113
APÉNDICE B: DIAGRAMA DE FLUJO	122
APÉNDICE C: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	123

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros teóricos para el diseño de un DAF.	68
Cuadro 2. Resultados obtenidos de los parámetros más importantes del DAF y las principales dimensiones del equipo.	71
Cuadro 3. Resultados obtenidos del dimensionamiento ajustado del DAF.....	73
Cuadro 4. Comparación de precios y características de ambos fabricantes.	88
Cuadro 5. Escenarios financieros para la compra del equipo DAF según cada entidad bancaria.....	90
Cuadro A 1. Cotización de ambos proveedores para la compra del equipo.	100
Cuadro A 2. Datos recopilados de entidades financieras para el costo de la inversión del equipo.	101
Cuadro A 3. Resultados obtenidos de los parámetros más importantes del DAF y las principales dimensiones del equipo.	102
Cuadro A 4. Resultados obtenidos del dimensionamiento ajustado del DAF.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición del fruto de café (Soto, 2010).	6
Figura 2. Funcionamiento del equipo de flotación por aire disuelto (Partner S.A., 2018).....	11
Figura 3. Diagrama de bloques asociado al proceso productivo de la empresa actual incluyendo los puntos de generación de aguas residuales.	25
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso asociado a la PTAR de la empresa en estudio.	27
Figura 5. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2020, cosecha 2020 – 2021.	31
Figura 6. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2020, cosecha 2020 – 2021.	33
Figura 7. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2020, cosecha 2020 – 2021.	34
Figura 8. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2021, cosecha 2020 – 2021.	34
Figura 9. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2021, cosecha 2020 – 2021.	35
Figura 10. Comportamiento del pH en promedio por cada mes de cosecha 2020 – 2021.	37
Figura 11. Comportamiento del promedio de SST durante la cosecha 2020 – 2021.	39
Figura 12. Promedio de valores de DQO vertidos en cuerpo receptor en comparación con la legislación actual para la cosecha 2020 – 2021.....	40
Figura 13. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2021, cosecha 2021 –	

2022.....	48
Figura 14. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2021, cosecha 2021 – 2022.....	49
Figura 15. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2021, cosecha 2021 – 2022.....	50
Figura 16. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2022, cosecha 2021 – 2022.....	51
Figura 17. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2022, cosecha 2021 – 2022.....	51
Figura 18. Comportamiento del promedio de pH para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.....	52
Figura 19. Comportamiento del promedio de SST para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.....	53
Figura 20. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir del DQO para la cosecha 2021-2022.....	56
Figura 21. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir del DQO para la cosecha 2021 – 2022.....	57
Figura 22. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir de los SST para la cosecha 2021-2022.....	58
Figura 23. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir de los SST para la cosecha 2021 – 2022.....	60
Figura 24. Equipo de prueba de jarras utilizado para encontrar la dosificación de coagulante y floculante requerida.	75
Figura 25. Resultados obtenidos del agua residual antes (derecha) y después (izquierda) del proceso primario de flotación por aire disuelto.	76

Figura 26. Válvulas de bola y manómetro del tanque de presurización entrando al DAF.....	79
Figura 27. Diagrama del equipo DAF a) Vista lateral, b) vista frontal y c) vista superior (Elaboración propia).....	83
Figura 28. Diagrama de Flujo del proceso de la PTAR (Elaboración propia).....	85
Figura A 1. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2020, cosecha 2020 – 2021.....	104
Figura A 2. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2020, cosecha 2020 – 2021.....	105
Figura A 3. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2020, cosecha 2020 – 2021.....	105
Figura A 4. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2021, cosecha 2020 – 2021.....	105
Figura A 5. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2021, cosecha 2020 – 2021.....	106
Figura A 6. Comportamiento del pH en promedio por cada mes de cosecha 2020 – 2021.....	106
Figura A 7. Comportamiento del promedio de SST durante la cosecha 2020 – 2021.....	107
Figura A 8. Promedio de valores de DQO vertidos en cuerpo receptor en comparación con la legislación actual para la cosecha 2020 – 2021.....	107
Figura A 9. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2021, cosecha 2021 – 2022.....	108
Figura A 10. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2021, cosecha 2021 – 2022.....	108

Figura A 11. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2021, cosecha 2021 – 2022.....	109
Figura A 12. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2022, cosecha 2021 – 2022.....	109
Figura A 13. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2022, cosecha 2021 – 2022.....	109
Figura A 14. Comportamiento del promedio de pH para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.....	110
Figura A 15. Comportamiento del promedio de SST para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.....	110
Figura A 16. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir del DQO para la cosecha 2021-2022.....	111
Figura A 17. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir del DQO para la cosecha 2021 – 2022.....	111
Figura A 18. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir de los SST para la cosecha 2021-2022.....	112
Figura A 19. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir de los SST para la cosecha 2021 – 2022.....	112
Figura A 20. Eficiencia comparativa entre ambas cosechas del tratamiento primario a partir del DQO.....	113
Figura A 21. Diagrama de flujo del proceso de la PTAR.....	122

CAPÍTULO 1

Introducción

El cultivo de café en Costa Rica trasciende desde hace décadas hasta la actualidad, dando origen a una parte importante de la historia del país, tanto de forma económica como cultural. El fruto del café tiene la ventaja de que, al ser procesado, se extrae la cafeína, la cual es un alcaloide que actúa bloqueando los receptores de la adenosina neurotransmisora disminuyendo la percepción de cansancio; asimismo, también es posible encontrar componentes como vitamina B3, magnesio y potasio; contribuyentes a una vida saludable (Mesa Rodríguez et al., 2017).

A pesar de los grandes beneficios del café, existe un gran problema a la hora de ser procesado y es la cantidad de residuos que genera y por ende el aumento de las aguas residuales, ya que según Suarez Agudelo (2012), se utiliza solamente un 9,5 % del peso total del fruto en preparación de bebidas, por lo que el 90,5 % restante se atribuye a residuos vertidos en su gran mayoría a cuerpos de agua, esto específicamente cuando el café se prepara por el método húmedo, el cual contempla el uso de grandes cantidades de agua para remover el mucílago, originando un gran impacto ambiental.

La problemática actual radica en que el agua residual alcanza volúmenes muy altos por lo que un factor limitante en este tipo de industrias es la capacidad que tenga la planta de tratamiento de aguas, muchas veces esta se ve colapsada lo que produce que deba dejar de recibirse café para ser procesado, lo que posteriormente afecta la rentabilidad de la operación. Por este motivo, se quiere implementar una mejora para el sistema de tratamiento y así poder aumentar la producción de café.

Un adecuado manejo de las aguas residuales logra controlar la contaminación hasta en un 95% (Acuña, 2002), lo cual determina que a pesar de que no se logra eliminar todo, el impacto que se produce hacia los ecosistemas es menor. Además, con un adecuado control se cumple asimismo con la legislación del país asociada al Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No 33601 (2006), el cual determina los parámetros que deben tomarse en cuenta para asegurar la calidad del efluente. Un tratamiento de aguas adecuado involucra procesos en los que se logre eliminar tanto los sólidos no disueltos como los disueltos en el agua, esto mediante equipos como sedimentadores, homogeneizadores, equipos de flotación por aire disuelto (DAF), reactores anaerobios y aerobios.

El propósito de la investigación es proponer mejoras para el sistema de tratamiento de aguas residuales en los beneficios de café, utilizando un equipo de flotación por aire disuelto (DAF) dimensionado acorde a las necesidades de la empresa, con el fin de lograr una correcta gestión de los residuos y ofrecer una producción sostenible de café minimizando el impacto ambiental que este produce para así aumentar la producción de café. También, se planea proponer un método para la gestión de los lodos de manera amigable con el ambiente. Además, se plantea realizar un manual de operación y mantenimiento del equipo de tratamiento de aguas residuales provenientes del beneficiado de café para que este sea accesible a los operarios con todo tipo de escolaridad y que la capacitación en temas de tratamiento de aguas por parte de los beneficios de café hacia los trabajadores sea más eficiente. De igual forma, la propuesta se realiza tomando en cuenta el impacto económico que se produce al instalar el DAF, ya que es un equipo que debe importarse lo cual genera un gran costo, el cual se determinará como parte del proyecto.

Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar posibles mejoras en un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de los beneficios de café mediante la implementación de un equipo de flotación por aire disuelto (DAF) para el aumento de la producción de café y a su vez, mejorar el desempeño de los reactores biológicos. Para el debido cumplimiento de este objetivo se diseñaron los siguientes puntos específicos de partida:

- ✓ Determinar las condiciones y parámetros actuales de la empresa previo a la implementación del DAF.
- ✓ Analizar la eficiencia del DAF piloto que se va a instalar en la planta de tratamiento.
- ✓ Diseñar el equipo de tratamiento primario DAF, así como también el proceso de tratamiento y disposición de lodos.
- ✓ Estimar costos de inversión y operativos asociados al diseño propuesto para el DAF.

CAPÍTULO 2

Producción de café en Costa Rica

2.1. Metodología

A través de una investigación bibliográfica, se documentó cómo se lleva a cabo el proceso del beneficiado de café, haciendo énfasis en los procesos y las operaciones unitarias que generan las aguas residuales. También, se investigaron los diferentes tipos de tratamientos para aguas residuales que existen: pretratamiento, primario, secundario, terciario típicos de un proceso de beneficiado de café. Se buscaron las principales leyes y reglamentaciones que debe cumplir una planta de tratamiento de aguas en Costa Rica y también la legislación referente al vertido de las aguas residuales. Asimismo, se investigaron los ministerios, entidades gubernamentales y trámites correspondientes que regulan el tratamiento de aguas para que sea una actividad sostenible hacia el ambiente, de modo que el impacto hacia este sea el menor posible.

2.2. Proceso de beneficiado de café

En el país se cuenta para el periodo 2020-2021 con 304 beneficios de café encargados de procesar el grano de café cereza hasta café pergamino seco por medio de la separación de las partes que conforman al fruto seguido de un proceso de secado (Puerta-Quintero, 2000). En total para la cosecha 2020-2021 según datos del “Informe Sobre La Actividad Cafetalera de Costa Rica” (2021) se procesaron 1,88 millones de fanegas (una fanega = 400 L), lo cual demuestra la gran demanda en la producción.

A pesar de que la producción de café se mantiene como uno de los sectores de mayor auge económico para el país, es un tema que posee varias regulaciones, esto con el fin de que ambientalmente el café sea viable, por lo cual se debe cumplir con el Reglamento Para La Producción, Industrialización y Comercialización Del Café Sostenible No 30938-MAG (2002), la cual promueve la importancia de la reducción, reutilización y el reciclaje de desechos provenientes del café; asimismo, afirma que la producción de café sostenible debe ser socialmente justa, ecológica y económicamente viable para lograr la certificación respectiva.

El procesamiento del café sostenible se puede llevar a cabo por dos métodos, el húmedo y el seco, el más utilizado en Costa Rica es un proceso en húmedo debido a que genera características más suaves en la bebida, mientras que el proceso en seco genera sabores más amargos o fuertes y se considera más espeso (Puerta-Quintero, 2000). El proceso inicia con la recolección de café cereza, luego se continúa con el despulpado, siguiendo con la remoción del mucílago haciendo uso de agua para posteriormente pasar al lavado, clasificación y secado; hasta obtener el café pergamino seco que luego se trilla para producir café almendra para exportación y comercialización (Quintero et al., 2017).

A continuación, se presenta la Figura 1 asociada a las partes del grano, esto con el fin de comprender mejor como se da el proceso de beneficiado de café desde la remoción de la pulpa (exocarpio) que es la capa más externa hasta la semilla como tal.

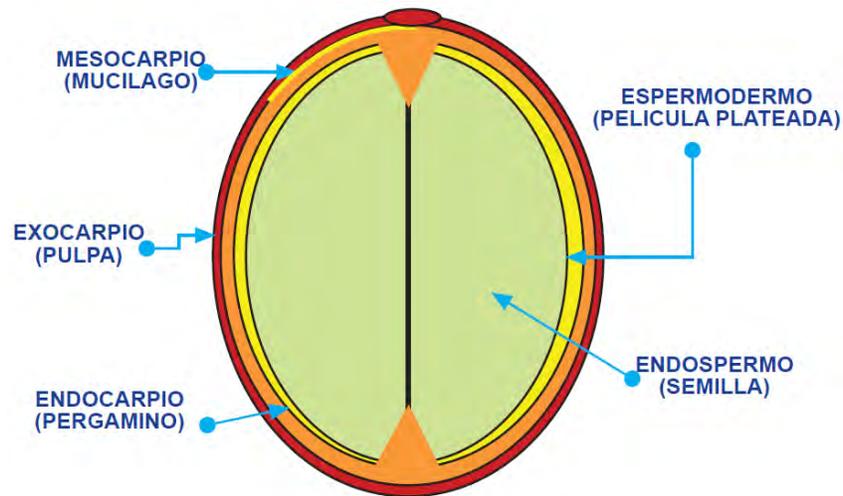


Figura 1. Composición del fruto de café (Soto, 2010).

La etapa de recibo del café, generalmente se realiza a las cinco de la tarde, una vez recolectado en el campo. Se dice que solamente un 82 % del café se almacena menos de diez horas antes de ser procesado en el beneficio. El café se deposita mediante un sistema de poleas o un sistema hidráulico en una tolva de recibido, en esta parte se utiliza agua para lubricar la tubería. Seguidamente, se realiza el despulpado del café, donde este es transportado por gravedad hasta el equipo que remueve la pulpa o cáscara ya sea de manera manual en épocas de cosecha bajas o despulpadoras eléctricas en épocas de grandes cosechas. La pulpa es transportada por medio de un tornillo sin fin hasta un depósito donde normalmente un camión se la lleva para utilizarla como abono en las cosechas. La pulpa puede generar lixiviados que se penetran en el suelo (Quintero et al., 2017).

En cuanto a la remoción del mucílago, la misma puede realizarse por fermentación natural o por medio de un equipo mecánico, normalmente el método mecánico es más rápido, ya que lo que se utiliza es una desmucilagadora que desprende el mucílago del grano sin necesidad de fermentarlo. Este equipo puede

tener eficiencias de hasta un 98% de remoción de mucílago. Seguidamente, se realiza lo que es el lavado del grano mediante un tanque y posteriormente se clasifica. Finalmente, el secado se realiza con hornos alimentados con leña donde se aprovecha la cascarilla del fruto del café también como combustible para los hornos. Luego se realiza el triturado del café o el empaque directamente sin trillar, se almacena y se comercializa (Quintero et al., 2017).

2.2.1. Operaciones unitarias que generan aguas residuales

Dentro de los procesos de café mencionados anteriormente que generan aguas residuales se encuentra principalmente el lavado y la remoción del mucílago. En el caso del lavado y separado se hace uso de 0,1 L hasta 0,3 L de agua por cada litro de fruta que se procese, ya que se debe lavar el café debido a que puede contener arena, hojas, piedras, tierra y ramas; además de que se separan los granos de café verdes de los maduros (rojos) mediante un tanque cuba sifón, mientras que el proceso que utiliza la mayor cantidad de agua es el proceso de remoción de mucílago utilizando cerca de 3 L hasta 5 L de agua por cada litro de fruta procesada (Campos et al., 2021).

El agua residual proveniente del beneficiado es considerada como un residuo; no obstante, posee una alta concentración de nutrientes que consisten en material orgánico en suspensión y componentes orgánicos e inorgánicos en solución que suelen tener gran impacto ambiental negativo si son desechados a los ríos sin ningún tipo de tratamiento previo. Estas aguas residuales al ser liberadas a cuerpos de agua originan la formación de zonas anóxicas dada su estabilización anaeróbica, lo cual produce como subproductos de la materia orgánica degradada compuestos

contaminantes como: metano, fenoles y sulfuro de hidrógeno; los cuales producen olores desagradables, siendo esto un problema que ambientalmente no es viable (Campos et al., 2021).

2.3. Tratamiento para aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales debe realizarse en una planta adecuada para este fin, las plantas de tratamiento de aguas residuales conocidas por su abreviatura como PTAR son una infraestructura dispuesta a varios procesos físicos, químicos y biológicos con el fin de mejorar la calidad del agua residual proveniente de operaciones unitarias anteriores (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), 2015).

Generalmente, las PTAR con el fin de salvaguardar la salud pública y cumplir los reglamentos establecidos, incluyen varios tipos de tratamientos para el agua en donde se inicia por eliminar las sustancias más sencillas hasta llegar a las más complejas; esto mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Los dos primeros procesos se llevan a cabo en instalaciones de coste bajo, aunque se invierte lo suficiente en reactivos, mientras que los biológicos contemplan altos costos energéticos como lo son los procesos aeróbicos o altos costos de inversión en procesos anaeróbicos (Cabildo Miranda et al., 2008). A continuación, se presentan los tratamientos que existen para el adecuado manejo de las aguas residuales en una PTAR.

2.3.1. Pretratamiento

Se engloba este paso en el tratamiento primario, puede ser un proceso físico o mecánico, se encarga de eliminar materiales muy gruesos y grasas, normalmente se

realiza para desbastar o afinar el agua residual. Incluye las siguientes operaciones (Cabildo Miranda et al., 2008):

- Dilaceración: Trituración de sólidos muy gruesos para disminuir su tamaño y que estos puedan atravesar las rejillas utilizadas en la siguiente operación.
- Cribado: Se utiliza cuando el agua residual contiene material voluminoso, este se hace pasar a través de una malla o rejilla.
- Tamizado: Retiene los sólidos con volumen superior a 1 mm de diámetro presentes en el agua residual, los tamices utilizados pueden ser estáticos o rotatorios.
- Desarenado: Se logra separar gravas y arenas, mediante un canal de poca profundidad con una velocidad suficiente para arrastrar en su mayoría partículas orgánicas sedimentando las arenas más pesadas, de esta forma se evita el deterioro de equipos posteriores que pueden aterrarse por la arena.
- Homogenización de efluentes: Se mezclan y homogenizan los efluentes provenientes de todos los procesos productivos, con esto se logra regular el caudal de las aguas residuales, la carga de sólidos en suspensión y el DQO. Para llevar a cabo esta operación se utiliza un tanque homogeneizador con agitación.

2.3.2. Tratamiento primario

Suele ser un proceso físico o químico, se realiza para eliminar el resto de material que haya quedado flotando en el agua residual, además de sólidos en suspensión como, por ejemplo: coloides, ácidos, bases fuertes, metales pesados, grasas y aceites (Cabildo Miranda et al., 2008). Se realizan las siguientes operaciones en el tratamiento primario:

- Decantación o sedimentación primaria: Se realiza para eliminar sólidos en suspensión que hayan quedado del pretratamiento, para esto se necesita un tanque

sedimentador o decantador, el cual a velocidad de paso mínima luego de varias horas tendría cerca de un 65% de los sólidos suspendidos en el fondo del equipo. Estos sólidos se llaman normalmente lodos primarios (Cabildo Miranda et al., 2008).

- Neutralización: El potencial de Hidrógeno (pH) debe controlarse en las aguas residuales, ya que la actividad biológica de tratamientos posteriores se ve afectada por este parámetro, el rango óptimo debe ser entre 6,5 – 8,5. Esta neutralización se realiza en un tanque y luego se pasa a un clarificador para que los hidróxidos insolubles sedimenten (Cabildo Miranda et al., 2008).
- Coagulación – floculación: Se realiza con el fin de eliminar aceite emulsionado o partículas de baja densidad, ya que estas requieren de un tiempo y espacio de sedimentación considerable por lo que no es viable eliminarlas por el método de sedimentación (Fanaie et al., 2019).

Se propone en este proceso implementar un DAF, en este equipo, el agua residual y el aire son mezclados en un saturador de aire a alta presión, entre 300 kPa y 700 kPa, para después ser liberada a la zona de contacto con el resto del agua residual a presión atmosférica. La despresurización que se da origina la precipitación y produce microburbujas que se adhieren a las partículas suspendidas en el agua residual, de modo que estas se elevan a la superficie por fuerza de flotación. Como es un proceso continuo, se va formando una capa de lodo en la superficie, la cual se va arrastrando hasta ser depositada en uno de los costados del equipo mediante las rasquetas, de modo que al lado contrario se va depositando el agua clarificada (Fanaie et al., 2019).

A continuación, en la Figura 2 se muestra el equipo DAF para una mejor

comprensión de su funcionamiento.

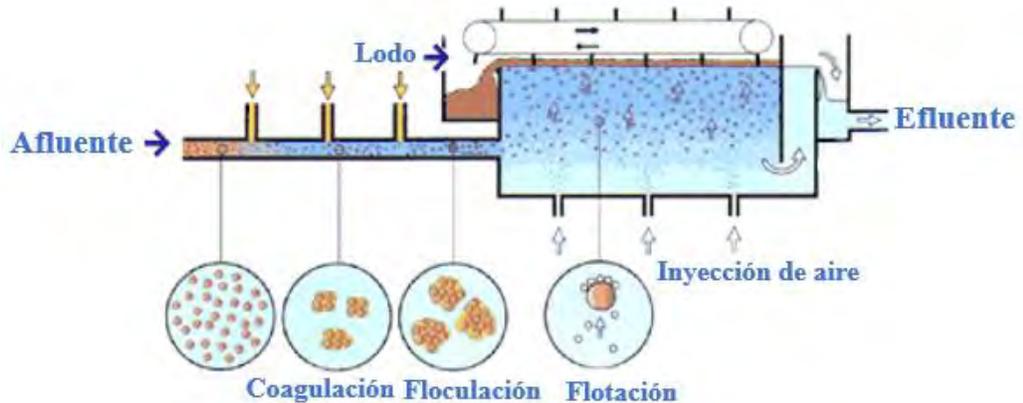


Figura 2. Funcionamiento del equipo de flotación por aire disuelto (Partner S.A., 2018).

Para diseñar un proceso de flotación por aire disuelto se requiere de una serie de parámetros a estudiar como lo son: el tipo y la cantidad de compuesto químico a utilizar, la intensidad de mezclado, el tiempo de retención en la zona de mezclado rápido y en la zona de floculación, el tamaño del flóculo, la hidrodinámica del tanque de flotación, la eficiencia del equipo, entre otros.

Para que la coagulación sea efectiva debe realizarse de manera rápida, mientras que la floculación es un proceso un poco más lento. El mezclado adecuado y la adición de coagulante es fundamental para lograr reducir la carga superficial de las partículas coloidales, ya que estas por si solas poseen un mismo signo de cargas negativas originando repulsión entre las partículas coloidales y por ende una gran carga eléctrica. Los coloides y sólidos en suspensión con cargas negativas son atraídos por los coagulantes en donde todos poseen cargas positivas, de esta forma se impide la aglomeración y precipitación (Díaz et al., 2017).

Como se mencionó anteriormente, la coagulación y floculación son procesos vitales en el uso del DAF, por lo que es importante conocer sus diferencias entre

sí. La coagulación se define como el proceso por el que los componentes de una suspensión estable son desestabilizados por superación de fuerzas encargadas de mantener su estabilidad, por lo que neutraliza las cargas presentes en el coloide, mientras que la floculación es el proceso por el que las partículas ya desestabilizadas se unen para formar grandes partículas estables aglomeradas (flóculos). Como se ejemplifica en la Figura 2.

Existen diversos tipos de coagulantes para el tratamiento del agua residual, estos se pueden clasificar en dos: Inorgánicos y Orgánicos. Los Inorgánicos pueden ser algunas sales de aluminio simples o polimerizadas, sales de hierro simples o polimerizadas, cal y otros; sin embargo, se prefieren los coagulantes prepolimerizados debido a que tienden a tener mayor eficacia en el tratamiento de aguas residuales, presentan una buena sedimentación de flóculos, amplio rango de pH y baja sensibilidad al cambio de temperatura (M. I. Aguilar et al., 2002). En el caso de los floculantes, pueden ser de tipo aniónico, catiónico o no iónico. Se suelen utilizar polielectrolitos orgánicos sintéticos, estos son polímeros de gran peso molecular solubles en agua, también se pueden utilizar copolímeros o floculantes naturales como almidón, gelatinas, entre otros (Cabildo Miranda et al., 2008).

2.3.3. Tratamiento secundario

Es un proceso biológico que se encarga de eliminar la materia biodegradable, soluble u orgánica que exista en el agua residual. Para esto se utilizan microorganismos (bacterias) que son alimentadas por medio de la materia orgánica del agua, donde finalmente esta materia orgánica se convierte en materia degradada y también se da la formación de nuevas bacterias. Para llevar a cabo este proceso se utilizan reactores biológicos con condiciones óptimas para el desarrollo adecuado de

las bacterias. Los procesos biológicos utilizados se clasifican en aerobios o anaerobios, ambos se encargan de la síntesis celular de los microorganismos para que estos crezcan, formen nuevas bacterias y generen lodos secundarios (biomasa) que luego son extraídos por procedimientos físicos y químicos o recirculados al reactor nuevamente. La biomasa generada contiene microorganismos vivos y muertos (Cabildo Miranda et al., 2008). A continuación se explican los procesos aerobios o anaerobios que pueden llevarse a cabo en el tratamiento secundario:

- Tratamiento aeróbico: En este tratamiento la materia orgánica se degrada y se oxida en especies inorgánicas originando a su vez nuevos microorganismos. En el proceso ocurren dos reacciones en específico, la primera que se muestra es de oxidación exotérmica (1), en donde la materia orgánica en presencia de oxígeno y microorganismos aerobios se transforma en energía (E), como se muestra, se da la generación de dióxido de carbono y amoníaco, los cuales pueden ser aprovechado para generar biogás y por ende funcionar como combustible energético, sin embargo, este proceso posee un costo alto de implementación para purificar los gases residuales (Pal, 2017).



La otra reacción involucrada es de síntesis celular (2), esta da origen a nuevos microorganismos a partir de la energía generada en la reacción anterior.



De esta forma se da origen a nuevas células o microorganismos. Se

determina asimismo que una de las formas más comunes que se utilizan en una PTAR son tanques de estabilización aerobios, estos son de poca profundidad (1 m) y las aguas residuales permanecen máximo 10 días, tienen el impacto de la luz solar directa lo que ocasiona producción de algas y microorganismos capaces de degradar la materia orgánica de forma aeróbica, de esta forma se logra un procedimiento de costo reducido (Lopez-Vazquez et al., 2017).

- Tratamiento anaeróbico: Es más económico que el aeróbico, ya que se efectúa sin presencia de aire, por lo que el oxígeno necesario para que la reacción se lleve a cabo es el presente en la materia orgánica solamente (Cabildo Miranda et al., 2008). Para el caso de los microorganismos anaeróbicos, los que se utilizan con más frecuencia son los mesófilos, por lo que se determina que las condiciones de operación para que estos microorganismos se desarrollen adecuadamente es entre 25 °C y 45 °C. Además, para que el proceso sea exitoso, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0, de esta forma se estima que el pH óptimo ronda los 7 (Varnero, 2011).

El proceso anaeróbico equivale a un proceso de fermentación metanogénica que sucede mediante una serie de reacciones químicas de acuerdo con la cantidad de microorganismos presentes. Este proceso se divide en cuatro fases: hidrólisis, etapa fermentativa, acetilénica y metanogénica. La hidrólisis se encarga de solubilizarla materia orgánica, se lleva a cabo por acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. Una vez ocurrida la hidrólisis, ocurre el proceso de fermentación, donde se da la formación de compuestos orgánicos más reducidos y a su vez, se eliminan rastros de oxígeno disuelto en el sistema mediante bacterias formadoras de ácidos. Seguidamente, se da la etapa acetogénica, la cual oxida a los compuestos orgánicos que existan en el sistema,

formando así ácidos volátiles sencillos mediante microorganismos acetogénicos.

Finalmente, en la etapa metanogénica, se eliminan muchos de los compuestos formados en las etapas anteriores dando paso a la formación de metano y dióxido de carbono, así como también otros compuestos sulfurados, esto a partir de bacterias anaeróbicas como lo son los microorganismos metanogénicos (Varnero, 2011). A continuación, se presenta la reacción global de este proceso, siendo M nuevos microorganismos.



Los procesos anaerobios se prefieren para aguas residuales con mayor carga orgánica, debido a que ofrecen ventajas de tipo económico en comparación a los sistemas aerobios que requieren de grandes cantidades de energía debido al uso de compresores y aireadores, además de que están destinados a aguas residuales con menor carga orgánica. Mientras que sistemas anaerobios, trabajan con la luz solar y sin requerimientos excesivos de energía, por lo cual el costo operativo es menor. No obstante, el costo de implementación de un reactor anaerobio es muy alto y requieren de amplio espacio en la planta (Varnero, 2011).

2.3.4. Tratamiento terciario

Se trata de un proceso físico, químico o biológico que se encarga de eliminar contaminantes específicos que aún no han podido ser eliminados en los tratamientos anteriores, como lo son sales disueltas y microcontaminantes. Entre las principales funciones están la eliminación de gérmenes patógenos, parásitos, color, detergentes, fosfatos, compuestos nitrogenados y asimismo la disminución de la carga orgánica que persiste en el agua residual. Las principales operaciones que pueden llevarse a cabo son: arrastre con aire y arrastre con vapor de agua, procesos de filtración por membranas, pervaporación, electrodiálisis, intercambio iónico, adsorción,

precipitación y otros (Lopez-Vazquez et al., 2017).

2.3.5. Tratamiento de lodos

En el tratamiento de aguas residuales, incluyendo todos los mencionados anteriormente, se generan lodos o biomasa producida por la sedimentación de la materia orgánica, normalmente existen tres tipos de acuerdo con el tratamiento que se haya realizado: lodos primarios, secundarios y mixtos. Esta biomasa, en su mayoría aporta poco valor, ya que en esta masa pastosa o líquida se concentra la mayoría de los contaminantes que se eliminaron de las aguas residuales, por ende, estos lodos deben ser tratados con cuidado. No obstante, existen lodos que dependiendo de su composición, se pueden reutilizar para acondicionamiento de terrenos.

Una de las ventajas que posee el DAF en cuanto a la generación de lodos es que el mismo equipo separa el agua clarificada de los lodos, de modo que esto facilita la obtención de la biomasa para un posterior tratamiento. Además, mientras que un sedimentador solamente separa sólidos por gravedad, el DAF separa sólidos sedimentables y suspendidos que son arrastrados por las burbujas de aire hasta la superficie para su remoción generando así hasta 7 veces menos cantidad de lodo que un sedimentador. Otra ventaja son los tiempos de retención, en el DAF son de 30 min en la cámara de coagulación - floculación mientras que un sedimentador puede tardar hasta 2 horas ocupando un espacio físico hasta 96 veces mayor que el DAF (Teamb S.A., 2019).

Los lodos salientes del DAF ya concentrados pueden estabilizarse mediante una digestión anaerobia la cual produce biogás aprovechable como energía para otros procesos o bien mediante un tratamiento químico como la adición de cal, esto elevaría el pH de la solución cercano a 11 donde muchas bacterias no pueden sobrevivir, de esta forma se evitaría la fermentación de los microorganismos que hayan quedado en

los lodos lo cual puede generar malos olores (Cabildo Miranda et al., 2008).

No obstante, aunque se evite la fermentación, el nitrógeno amoniacal ionizado presente en los lodos se convierte en gas amoniacal cuando se adiciona cal al sistema, lo cual produce malos olores. Por ende, se recomienda realizar la dosificación de cal en ambientes cerrados para evitar molestias de la población vecina por olores desagradables, un ambiente cerrado de igual forma asegura un efecto bactericida e incrementa la eficiencia del proceso de estabilización del lodo. El proceso generado por la adición de cal es exotérmico, lo cual hace que se genere calor, por ende, al incrementarse la temperatura se favorece la desinfección del lodo eliminando microorganismos que no se adaptan a altas temperaturas (Méndez et al., 2002). Otro tratamiento para estabilizar es el térmico, el cual consiste en calentar a 260 °C a presión de entre 40 atm a 100 atm durante unos 40 min, este proceso se conoce como oxidación húmeda.

Finalmente, para el tratamiento de los lodos luego de ser estabilizados es necesario realizar un proceso de extracción de agua como el deshidratado (uso de equipos en condiciones controladas de temperatura, humedad y aire) o el secado (uso de fuentes naturales como sol y viento), esto permite eliminar la mayoría de agua restante a los lodos para reducir su humedad con el fin de que estos se vuelvan más livianos, estables y sean más fáciles de transportarlos. El lodo seco normalmente debe ir a relleno sanitario, esto según el Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos N° 39316-S, sin embargo, el lodo proveniente de actividades agropecuarias sí es aprovechable como abono agrícola, en compostaje, obtención de energía por incineración, entre otros; como es el caso de los lodos de un beneficio.

2.4. Reglamentación y trámites actuales para operar una PTAR

Actualmente, varias entidades gubernamentales se encargan de controlar y regular el adecuado tratamiento de las aguas residuales. Es por esto que, es de suma importancia tener presente la legislación existente que aplica para una adecuada operación o ya sea construcción de plantas de tratamiento de aguas en Costa Rica. A continuación, se enlista la legislación que aplica en el país.

- ✓ Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No 33601 (2006): El mismo estipula que es de carácter obligatorio tratar las aguas provenientes de un proceso para que cumplan con las disposiciones del Reglamento y se eviten así perjuicios al ambiente, a la salud, o al bienestar humano. También, el decreto estipula una serie de parámetros límites que deben tomarse en cuenta para la debida disposición de los residuos, en el caso del beneficiado de café se permite máximo: una demanda química de oxígeno (DQO) de 1400 mg/l, una demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5 a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) de 700 mg/l y un máximo de sólidos suspendidos totales (SST) de 500 mg/l.
- ✓ Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Decreto No 39887-S-MINAE (2016): Este reglamento estipula donde deben ubicarse las plantas de tratamiento de aguas residuales para que estas cumplan con la ley, además indica los metros de retiro que se deben de respetar cuando se instala algún tratamiento de aguas. Asimismo, especifica donde deben verterse las aguas de forma legal. Explica las obligaciones del interesado que debe cumplir para que su permiso sanitario de funcionamiento sea vigente. Menciona las características del manual operativo y de mantenimiento de la planta.

Ambos decretos son de gran importancia para las empresas que cuenten con

tratamiento de aguas residuales. El primero está enfocado a la operación adecuada de la planta y a los análisis periódicos que deben realizarse para estar al día, mientras que el segundo está enfocado a más que todo la parte constructiva que rige a las plantas de tratamiento, aunque ambos mencionan aspectos clave a tomar en cuenta para cumplir con la legislación. Los dos decretos mencionados se rigen por el Ministerio de Salud y por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE).

Con respecto a los trámites que deben realizarse para estar al día con la legislación, se incluye tener un permiso de funcionamiento al día emitido por el Ministerio de salud y también enviar un reporte operacional a la misma entidad cada cierto tiempo dependiendo del caudal que se maneje, a continuación, se detalla este proceso.

El reporte operacional debe generarse únicamente mediante el uso de la plataforma provista por el Sistema Informático para el Registro de Reportes Operacionales de Aguas Residuales (SIRROAR), que se encuentra disponible junto con el Manual del Usuario Externo en la página web del Ministerio de Salud (www.ministeriodesalud.go.cr). En este reporte operacional, además de las características generales de la empresa, se debe incluir en este un reporte de laboratorio de análisis físico, químicos y microbiológicos cada cierto tiempo dependiendo de caudal que se maneje en la PTAR además de un refrendo respaldado por el Colegio de Químicos de Costa Rica.

Los entes generadores cuyo efluente tenga un caudal promedio mensual menor o igual a 100 m³/día deberán presentar un reporte operacional cada seis meses, mientras que si es mayor a 100 m³/día deberán presentar un reporte operacional cada tres meses. En caso de que haya cambios en el proceso productivo y en las unidades de tratamiento, se debe realizar también un reporte al Ministerio de Salud.

CAPÍTULO 3

Funcionamiento previo a la implementación del DAF

3.1. Metodología

Se realizó una visita a la planta y se comparó la información investigada en el capítulo 2 con el proceso productivo actual, con esta información se generó un diagrama de bloques del proceso de beneficiado en el que se identifican los puntos de generación de aguas residuales. Se analizaron datos históricos del comportamiento de algunos parámetros de DQO, pH y SST previo a la implementación de un DAF piloto en la empresa, los cuales fueron tomados durante 5 meses todos los días en los diferentes puntos de generación: entrada y salida del equalizador u homogeneizador, entrada y salida del reactor anaerobio flujo ascendente y salida hacia el efluente (vertido en campos de agua). Los datos experimentales recopilados se analizaron mediante gráficas para posteriormente ser comparados con los límites permitidos según la legislación vistos en el capítulo anterior.

En el caso de la demanda química de oxígeno, esta es un parámetro que puede cuantificarse mediante un análisis en espectrofotómetro. Para elaborar este análisis, una vez tomada la muestra de agua residual, se toma una alícuota y se afora en un balón con agua destilada. Se debe anotar el factor de dilución que se tomó. Seguidamente, se mezcla en un vial 1 mL del agua residual del balón junto con 1 mL de una solución cargada con dicromato de potasio y ácido sulfúrico, la cual se encarga de oxidar la sustancia en análisis convirtiendo así el cromo en su estado trivalente, el cual se cuantifica en el espectrofotómetro para obtener la demanda química de oxígeno. Los viales se introducen a un termoreactor durante 2 horas a 150 °C. Debe

realizarse un blanco para que el espectrofotómetro pueda comparar con base en este. El blanco incluye la solución de dicromato de potasio, ácido sulfúrico y agua destilada solamente. Una vez los viales alcancen la temperatura ambiente, se introducen al espectrofotómetro para medir la absorbancia a 600 nm, que es cuando se absorbe y se cuantifica la cantidad de cromo trivalente en una muestra después del proceso de digestión. Se mide primeramente el blanco y luego la muestra de interés. De esta forma el equipo muestra el valor de DQO en mg/L o ppm. Debe multiplicarse por el factor de dilución en caso de que la muestra se haya diluido.

3.2. Proceso productivo actual de la empresa

En la empresa en estudio, se realiza un proceso de beneficiado en húmedo, el cual como se mencionó anteriormente, es un proceso que involucra utilizar gran cantidad de agua. El agua utilizada para el proceso de beneficiado se extrae de una quebrada adyacente al terreno, para la cual se solicitó previamente un permiso al MINAE para concesión de aguas superficiales. En específico se otorgó un caudal de 17.36 L/s máximo por un periodo de uso de julio a febrero durante 24 horas diarias. A continuación, se explican las etapas del proceso productivo de la empresa que se llevan a cabo actualmente para el beneficiado de café.

- **Recibo de café en fruta:** El proceso de beneficiado inicia con la cosecha del grano maduro, el cual es transportado por camiones y tractores. Una vez que el café llega al beneficio es medido por medio de angarillas, con el fin de determinar la cantidad de café que ingresa al beneficio. Una vez llena la angarilla (con una capacidad de diez cajuelas) el trabajador encargado de la labor abre la compuerta de esta a través de una palanca, lo que hace que el café caiga por gravedad a los

sifones de almacenamiento.

- Despedrado y clasificación: Luego de que el café permanezca en los sifones por determinado tiempo (1 día aproximadamente), este es trasladado por medio de gravedad hasta las bombas y a su vez hasta un despedrador mecánico que se encarga de separar el café de distintos residuos (palos, piedras); seguidamente, el café pasa por un sifón con agua donde se separa por densidad y pasa al siguiente proceso.
- Despulpado: Una vez clasificado el café maduro, se procede a separar la pulpa del café mediante una máquina llamada chancador o despulpador. La pulpa es enviada a vagonetas encargadas de transportarla a los patios de composteo, para luego recibir tratamiento fuera de la empresa. El grano despulpado pasa a la siguiente parte del proceso.
- Desmucilaginado: Cuando el café se despulpa es enviado a las tolvas donde se lava para quitar el exceso de miel que lleva el grano mediante un equipo mecánico, enviando estos residuos a la planta de tratamiento de aguas. El equipo que remueve el mucílago se conoce como desmucilaginator, este recibe por gravedad el café sin pulpa y mediante una fuerza de fricción separa el mucílago del grano de café. Este proceso de tipo mecánico facilita el beneficiado de café debido a que es más rápido que una fermentación natural y además se aumenta el peso final del café hasta un 2% según estudios realizados por el CENICAFE y el ICAFE (Penagos Hermanos & Cía. S.A.S, 2020).

- Clasificación: El café es trasladado hasta las tolvas de espera por medio de bandas transportadoras donde se separa por calidades y posteriormente es enviado a las máquinas de lavado para continuar con el proceso.
- Lavado final: El café escogido, pasa por un equipo que se encarga de lavarlo a presión para finalmente enviarlo al proceso de secado, en este proceso, se utiliza al menos un 10% del flujo total requerido por cada fanega procesada de café.

Todo este proceso mencionado anteriormente se realiza en húmedo, lo que significa que requiere de agua para funcionar, aproximadamente 1 m³ por fanega procesada. Luego de la clasificación se da el proceso de beneficiado en seco el cual es característico del café para su secado. A continuación, se explican las siguientes partes del proceso en seco:

- Presecado: Mediante bandas transportadoras, el café se lleva a una presecadora de cascada, en la cual el café desciende diagonalmente, sobre una corriente de aire caliente con el fin de quitar el exceso de humedad y residuos que lleva el grano. Posteriormente se traslada a las secadoras verticales donde se continua con el proceso de secado.
- Secado: Después de que el café ha pasado por las presecadoras, se envía a las guardiolas o secadoras horizontales, donde permanece hasta alcanzar el 11 % de humedad. Lo anterior se logra inyectando aire caliente procedente de los hornos y también haciendo uso de abanicos. Al concluir el proceso de secado el café es trasladado a los silos de almacenamiento.

- Pelado y ensacado: Esta parte del proceso se realiza con una máquina trilladora (apolo) y consiste en eliminar mediante fricción el pergamino al grano de café para finalmente obtener el grano oro. La cascarilla que resulta del proceso de pelado se envía a un silo de cascarilla. Posteriormente mediante vibradoras se prepara y clasifica el café por tamaño y peso según los requerimientos del cliente. Finalmente, se empaca en sacos cabuya de 69 kilos y se traslada en camiones hasta las bodegas de exportación.

Una vez terminada la época de cosecha (finales de febrero inicios de marzo) se realiza el mantenimiento del beneficio, el cual comprende diversas actividades: desarmar la maquinaria, cambiar partes dañadas, sacudir paredes, techos y máquinas, engrasar, pintar y cualquier otra labor que sea necesaria para mejorar el funcionamiento del beneficio en la siguiente cosecha que empieza en octubre aproximadamente. En cuanto a la PTAR, se purgan las diversas etapas, se lavan los equipos, se mantiene el sistema en funcionamiento al mínimo.

A continuación, en la Figura 3 se muestra un diagrama de bloques donde se muestra la generación de aguas residuales del beneficio en estudio junto con los procesos productivos mencionados anteriormente.

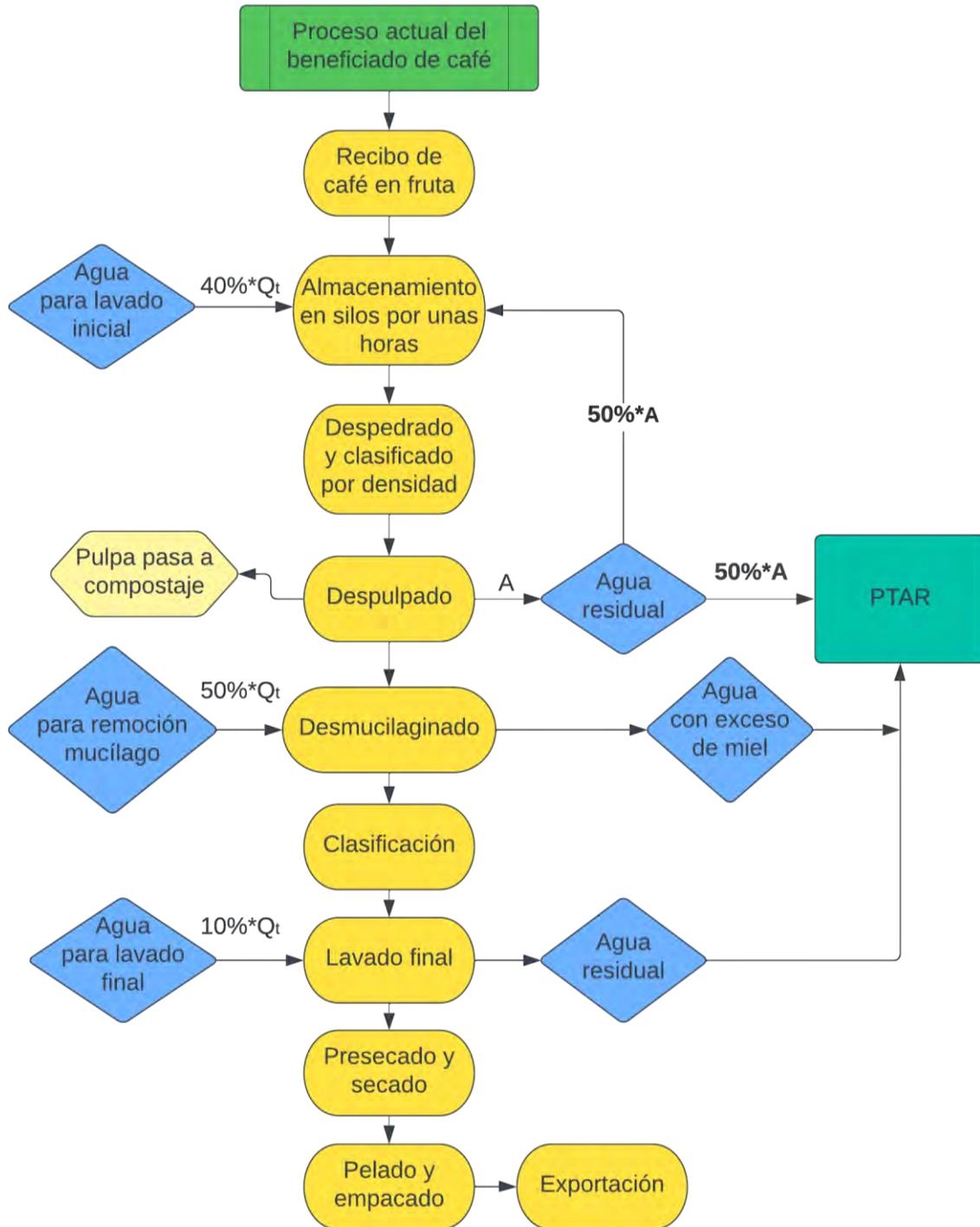


Figura 3. Diagrama de bloques asociado al proceso productivo de la empresa actual incluyendo los puntos de generación de aguas residuales.

Primeramente, se debe aclarar que en la Figura 3, el Q_t hace referencia al caudal de agua necesario para el proceso en húmedo, normalmente se tienen rangos

por día en promedio de 0.5 m³ hasta 1 m³ por fanega procesada; este caudal depende de muchos factores, como lo es la suciedad del café, si viene con lodo o no, de la cantidad residual que haya quedado de agua en el silo de almacenamiento, entre otros.

Se muestra a su vez, que es necesario agua limpia en tres puntos diferentes: al almacenar el café en tolvas luego de ser recibido, para la remoción del mucílago y para el lavado final. En cuanto al agua utilizada para almacenar el café, normalmente se requiere del 40 % del caudal utilizado por día, lo que quiere decir que, si por ejemplo se utiliza 1 m³ por fanega, entonces en el proceso de almacenado en tolvas debe suministrarse 0.4 m³ por fanega recibida. En el caso del agua utilizada para remover el mucílago sería un 50 %, por lo que es equivalente a 0.5 m³ por fanega y para el lavado final sería 0.1 m³ por fanega tomando como base el cálculo del ejemplo anterior con un caudal total de 1 m³ por cada fanega.

Luego del despulpado, se realiza una recirculación del agua residual, esto es porque la mitad del agua sobrante al finalizar el proceso de remoción de la pulpa se recircula al inicio del proceso en las tolvas de almacenado para ahorrar agua, mientras que la mitad restante se va hacia la planta de tratamiento de aguas. Debe considerarse al menos un 5 % en pérdidas por fugas y derrames para las corrientes de salida de agua residual.

Comparando los procesos productivos de manera teórica y práctica realmente no se tienen mucha diferencia ya que, el proceso es básicamente el mismo excepto por la parte final luego de la remoción del mucílago en donde los autores Quintero et al. (2017) mencionan que primero se realiza el lavado y luego la clasificación, mientras que en la empresa se hace al revés. Lo cual tiene más sentido, debido a que si se realiza el lavado primero, se estaría desperdiciando agua en granos de café que

podrían sean descartados. Los autores, también mencionan que por ejemplo la remoción de mucílago puede realizarse por métodos como la fermentación o el mecánico, en el caso de la empresa todo se realiza de forma mecánica, de modo que es más rápido el proceso y se obtienen resultados mejores.

3.3. Tratamientos actuales que se llevan a cabo en la PTAR de la empresa

Como parte de las visitas realizadas en la empresa, se recopiló la información de cómo se distribuye actualmente la planta de tratamiento de aguas, esto con el fin de conocer cómo puede optimizarse el sistema. La empresa actualmente no cuenta con tratamiento terciario, sino que solamente tienen pretratamiento, tratamientos primario y secundario. En la Figura 4 se muestra el DFP asociado a la planta de tratamiento de aguas de la empresa, a continuación se explican las etapas una a una para el proceso de tratamiento actual que maneja la empresa.

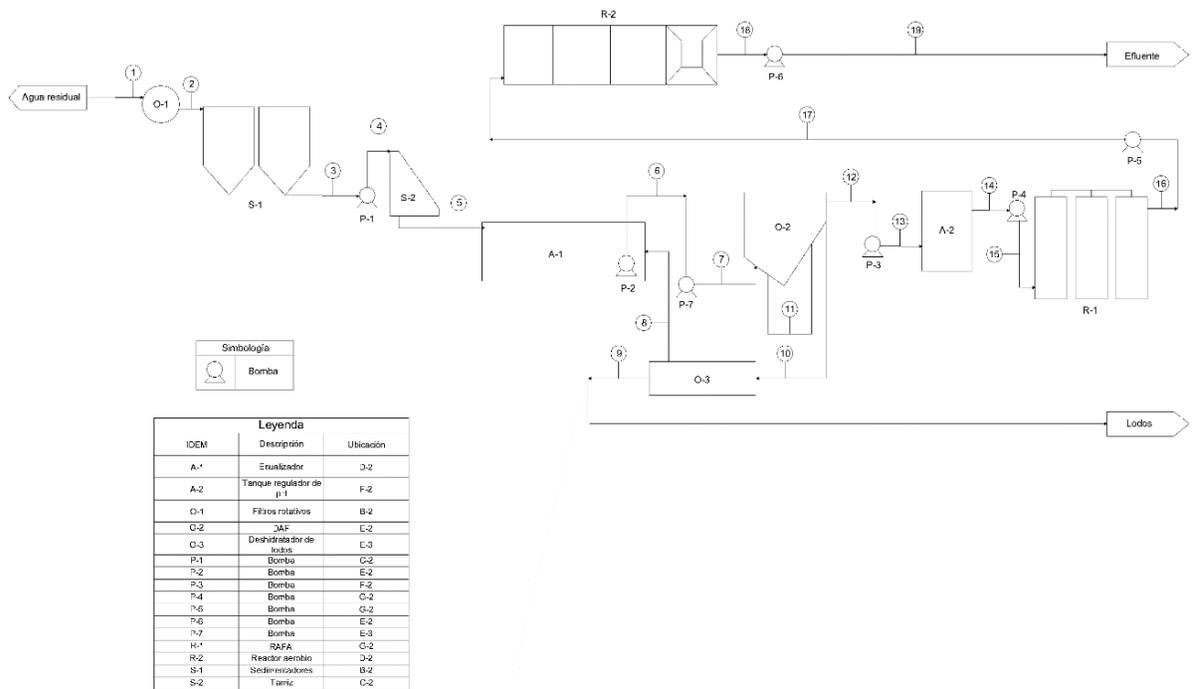


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso asociado a la PTAR de la empresa en estudio.

3.3.1. Pretratamiento

Se cuenta actualmente con filtros rotativos y estáticos que permiten eliminar residuos de brosa o demás contaminantes que se hayan ido por la tubería de agua. Seguidamente, se pasa a unos sedimentadores donde se sedimentan las arenas por aproximadamente 4 horas. Se pasa por un tamiz finalmente para luego descargarse en el ecualizador.

3.3.2. Tratamiento primario

Se realiza la homogenización de efluentes proveniente de las tres corrientes mostradas en la Figura 3, que representan la entrada asociada a la corriente 1 del DFP de la Figura 4. Se considera como un tratamiento primario en las instalaciones de la empresa; sin embargo, debería ser un pretratamiento. En este proceso, se mezclan y homogenizan los efluentes provenientes de todos los procesos productivos que generan aguas residuales que deben tratarse, con esto se logra regular el caudal de las aguas residuales, la carga de sólidos en suspensión y el DQO. Para llevar a cabo esta operación se utiliza un tanque homogeneizador o ecualizador con aireación constante. Cabe resaltar, que este equipo en el momento de realizar los análisis no se encontraba en sus óptimas condiciones, ya que debía tener dos aireadores capaces de acaparar toda el área superficial posible; no obstante, uno de ellos no funcionaba, por lo que solo se trabajaba con el otro restante. Este problema puede haber afectado la composición del agua residual, debido a que la capacidad de aireación no es suficiente. Otro aspecto importante a la hora de estar en sitio es que el equipo no tenía un mezclador o agitador, sino que solamente se “agitaba” por medio de la aireación, esto ocasiona

que no se pueda asegurar que la mezcla de agua residual haya sido homogénea. La capacidad máxima del equalizador es de 800 m³, se estima que trabajando a un caudal de 50 m³/h y a $\frac{3}{4}$ de capacidad se tendría un tiempo de retención de 12 horas en este equipo.

3.3.3. Tratamiento secundario

Luego del homogeneizador, se tienen dos reactores para un tratamiento biológico de las aguas, uno anaerobio y otro aerobio. Previamente a que el caudal entre al reactor anaerobio, este pasa por un tanque mezclador donde sucede la neutralización de pH del agua residual, esto con el fin de que se alcance un pH cercano a 7 (neutro) para que así los microorganismos puedan reproducirse adecuadamente en el RAFA (reactor anaerobio de flujo ascendente), proceso explicado previamente en la sección 2.3.3. Normalmente, para regular el pH, se utiliza soda cáustica, cal o carbonato de sodio. El reactor anaerobio se caracteriza por no tener participación de oxígeno en su interior, ya que las bacterias y microorganismos que se reproducen para eliminar la materia orgánica no lo requieren. Se utilizan microorganismos mesófilos en este reactor, capaces de desintegrar la materia orgánica sin requerir de elevados costos de mantenimiento. El sistema tiene un tiempo de retención de 10 horas aproximadamente, no se tiene el cálculo preciso de cuantos microorganismos se encuentran en el sistema ni de la tasa en que se generan. Las bacterias cuando finaliza la cosecha entran en un estado de hibernación, de igual forma, si se lavan las pilas del equipo, se pueden traer microorganismos de un beneficio similar una única vez. Las pilas del sistema se dividen en 3 y en total poseen una capacidad de 500 m³.

Además del reactor anaerobio, se tiene un sistema aerobio ubicado a unos 30 m de distancia. Este sistema involucra 3 secciones de 180 m³ cada una

aproximadamente, en donde el agua pasa primero a través de la primera y por gravedad baja a la siguiente hasta llegar a la última. Este sistema tiene dos aireadores por sección excepto por la última que no posee ninguno, ya que es un tanque cónico como especie de sedimentador para terminar de separar partículas grandes que hayan quedado. El sistema de aireación no se utilizaba de forma regular, ya que la empresa decidió que solamente era necesario utilizarlo cuando la demanda química de oxígeno fuera muy alta y que se le dificultara al proceso anaerobio bajar los niveles para cumplir con la legislación, entonces el sistema aireado solamente se utiliza en picos altos de cosecha según disposiciones mencionadas por el personal de la empresa. El reactor posee una recirculación que depende de los picos de cosecha, esta recirculación se realiza con el fin de controlar la alcalinidad del reactor anaerobio. El equipo tiene un tiempo de retención no mayor a 1 día.

3.4. Datos históricos del comportamiento de parámetros actuales

A partir de los datos históricos recopilados por la empresa durante la cosecha 2020 – 2021, se estudió el comportamiento de parámetros como DQO, pH y SST. En esta sección se explican cada uno de ellos de acuerdo con la caracterización del agua residual, la cual proviene del proceso de beneficiado de café. En las próximas Figuras 5, 6, 7, 8 y 9 se muestra el comportamiento de la demanda química de oxígeno para la cosecha mencionada, se tomaron datos en 5 puntos de generación: la entrada y salida del ecualizador, la entrada y salida del RAFA (reactor anaerobio de flujo ascendente), y la salida del río; o ya sea que se tome la salida del RAFA como la misma para el río en los casos donde no se utiliza el sistema aireado (meses de poca demanda).

Es posible observar en las Figuras 5, 6, 7, 8 y 9 que no se tiene alguna tendencia determinada en el comportamiento del DQO, ya que este parámetro es muy variable y depende de la cantidad de café que se esté procesando por día y de que tanta carga orgánica posea el café (qué tan maduro esté el grano). Para explicar el contexto del beneficiado, normalmente el mes de octubre asociado a la Figura 5 es un mes donde empieza a madurar de forma acelerada el café de modo que la recolección empieza a ser fuerte durante esta etapa del año, aumentando la demanda de beneficiado a finales de octubre, donde se continúa fortaleciendo en noviembre y diciembre que son los meses “pico” o de alta demanda y va disminuyendo la producción en el mes de enero y hasta febrero que termina la cosecha aproximadamente.

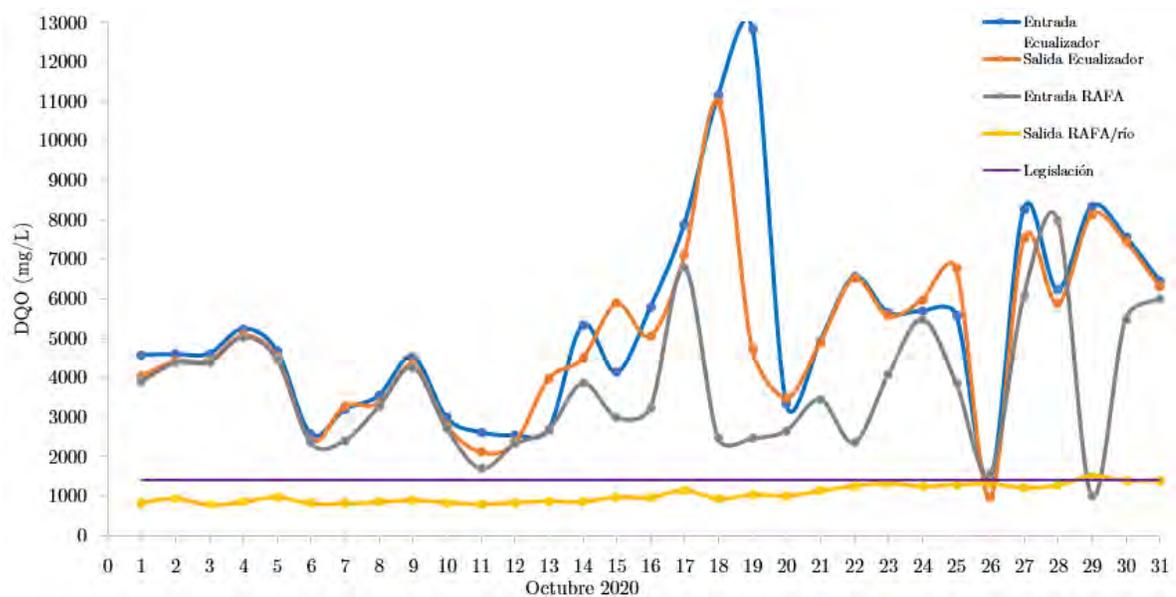


Figura 5. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2020, cosecha 2020 – 2021.

De esta forma, como se muestra en la Figura 5, en el mes de octubre al inicio se tiene un DQO de 4500 mg/L aproximadamente para la entrada del ecuilizador, este se logra disminuir hasta valores menores a 1000 mg/L. También, se aprecia

como a mediados de octubre se puede notar un pico de cosecha que eleva repentinamente el DQO, esto sucede cuando llega mucho café por procesar y de esta forma aumenta el agua residual. En promedio, para el mes de octubre se llegan a recibir unas 300 fanegas/día considerando que cada una tiene un peso de 258 kg entonces se reciben unos 77 400 kg de café diarios. Esta carga incrementa a gran escala el uso de agua residual, ya que aproximadamente se requiere de 1 m³/fanega en promedio. Este valor depende de muchos factores, por ejemplo, al inicio de la cosecha los gastos de agua se incrementan porque se deben limpiar equipos y zonas comunes, además de que poco café requiere de grandes cantidades de agua para poder llenar los silos. Mientras que cuando hay mucho café, más bien se requiere de menos agua por fanega, dado que el silo logra almacenar mayor cantidad de café en lugar de agua. No obstante, para poder considerar la carga máxima, se realizaron los cálculos para 1 m³/fanega en todos los meses.

Para el mes de noviembre mostrado en la Figura 6, como se mencionó anteriormente, se incrementa la demanda química de oxígeno hasta valores de entrada cercanos a 55 000 mg/L, esto se da ya que la cantidad de fanegas por día que entran en este mes alcanzan hasta las 1500, lo cual representa una alta demanda de agua. Esto logra disminuirse con todos los procesos de tratamiento hasta valores de salida en efluente ligeramente superiores a 1400 mg/L que es lo que permite la legislación, lo cual no es ventajoso porque no se cumple con lo estipulado. Sin embargo, como la demanda es tan grande, es complicado llegar a reducir tanto la carga, por lo que se decidió implementar un equipo de tratamiento primario como lo es el DAF, con el fin de reducir la carga orgánica insoluble del agua residual y mejorar la eficiencia en el RAFA, que es el equipo

que actualmente estaba disminuyendo toda la carga posible junto con el sistema aireado, sin embargo dado los tiempos de retención y demás del RAFA, se dificultaba procesar tanta cantidad de café, entonces esto produce que el ecualizador se llene demasiado rápido y que por ende se tenga que dejar de recibir café.

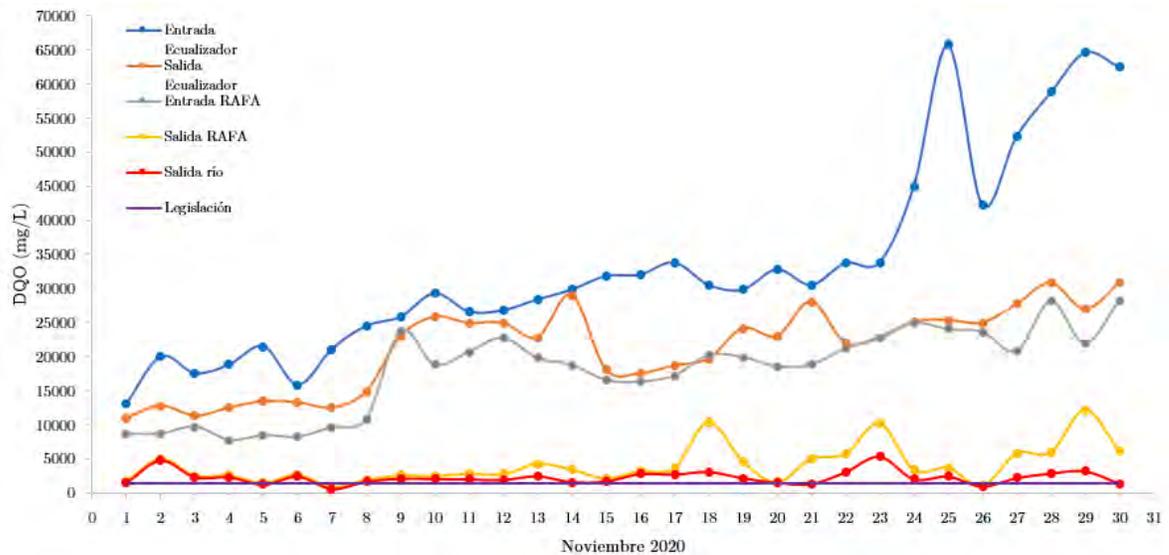


Figura 6. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2020, cosecha 2020 – 2021.

De esta forma, se evidencia que la planta de tratamiento de aguas es la principal limitante de la producción de café, por lo que se quiere aumentar su eficiencia y así poder recibir más cantidad de café y a su vez aumentar las ventas.

También, se logra visualizar en la Figura 7 como la carga a inicios de diciembre entra al ecualizador en valores de hasta 65 000 mg/L, siendo este el pico mas alto que se tuvo en cosecha para ese año. Conforme transcurre el mes, se observa que se estabiliza de cierta forma el DQO disminuyendo poco a poco hasta valores de 20 000 mg/L y menores, estos son mucho más manejables para la planta de tratamiento y permiten ir disminuyendo de forma ordenada la carga presente.

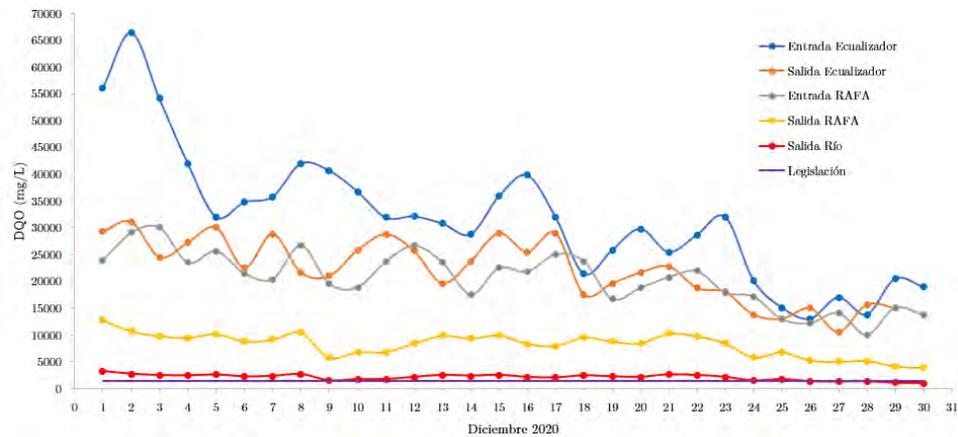


Figura 7. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2020, cosecha 2020 – 2021.

En la Figura 8 se muestra como el DQO alcanza cifras manejables de hasta 6000 mg/L, lo cual es ventajoso porque se facilita el tratamiento del agua residual. Finalmente, se obtienen valores un poco superiores a la legislación en la salida del río, por lo que esto debe controlarse, de modo que estas aguas no pueden enviarse al río, sino que se envían a tratamiento con una empresa externa debido a que no se pudieron tratar completamente en la planta de tratamiento del beneficio. De esta forma, esto representa un costo para la empresa alto, por lo que es otra razón para implementar el DAF.

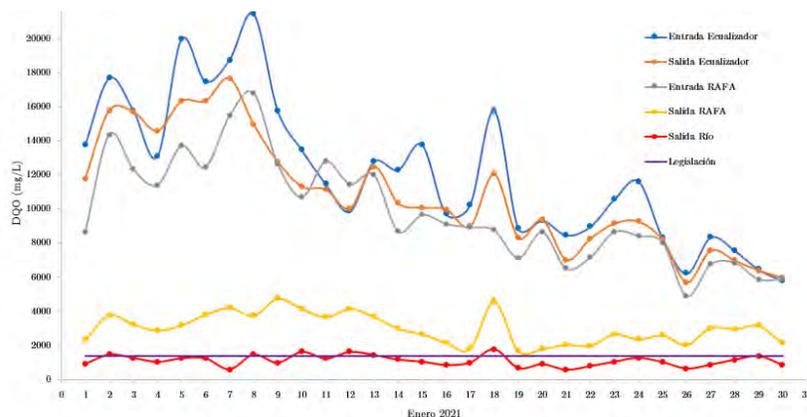


Figura 8. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2021, cosecha 2020 – 2021.

Es de suma importancia no enviar sólidos insolubles a los reactores anaerobios porque estos se encargan de degradar la materia que es soluble, la cual se puede conocer comúnmente como sólidos disueltos. Al agregar materia insoluble, como sólidos suspendidos o sedimentables, se ve comprometida la eficiencia del reactor, ya que los microorganismos presentes en este no son capaces de degradar este tipo de sólidos, por lo que le es más difícil al equipo poder tratar el agua residual (Varnero, 2011).

En el mes de febrero mostrado en la Figura 9, se logra notar que existen valores de DQO mucho más inferiores y por ende más fácil de manejarlos, esto hace que el sistema si logre ser más eficiente y entonces cumpla adecuadamente con la legislación por sí mismo.

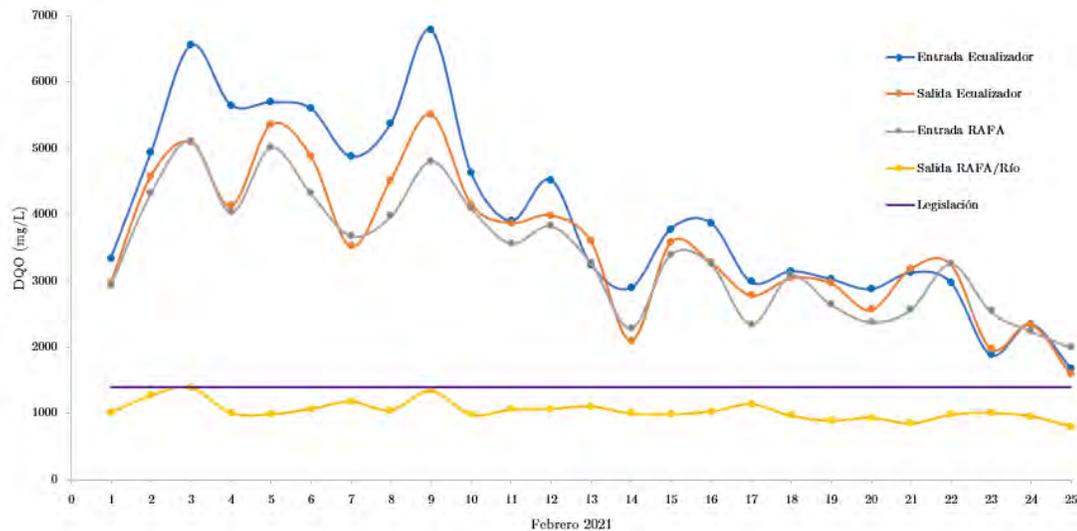


Figura 9. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2021, cosecha 2020 – 2021.

En todos los meses se logra notar que la mayor eficiencia de remoción se presenta en el RAFA, de esta forma es posible visualizar que existe una diferencia amplia en el DQO de entrada y salida de este equipo, esto muestra que el sistema

es eficiente, no obstante, no es suficiente para el tratamiento de agua residual de café que es tan cargada en compuestos orgánicos, por lo que se requiere de más tecnología y sistemas eficientes que logren disminuir las altas cargas presentadas.

Parte de esta investigación, es encontrar un sistema con el DAF que permita mejorar la eficiencia de remoción de carga orgánica y que a su vez acelere el proceso de tratamiento de agua, ya que esto permitiría procesar más café por día y aumentar las ganancias para la empresa. Ya que como se evidenció actualmente, no se tienen las condiciones para un sistema eficiente y rápido que logre los objetivos de la empresa.

Otro de los parámetros que se analizaron es el pH, el cual se tomó con pHmetro. Como se muestra en la Figura 10, se clasificó por el punto en el que se tomó el dato y el promedio del valor de pH en cada mes. De modo que, en el mes de octubre, por ejemplo, representado por las líneas azules, se obtuvo un valor promedio de 4.32 para la entrada del ecualizador, mientras que finalmente en el efluente se obtuvo un valor de 7.38 considerado como pH neutro. Esto demuestra que, al cabo de todos los tratamientos realizados, el pH ácido inicial se logra establecer como neutro. Este comportamiento se da en todos los meses de cosecha, el agua residual se vuelve muy ácida al quitar el mucílago, por lo que entra de esta forma al ecualizador, pero conforme se trata va disminuyendo acidez. En la mayoría de tratamientos de tipo fisicoquímicos el pH se debe regular entre 6 -7 para un adecuado funcionamiento de los equipos, sin embargo, en agua residual del café se trabajó en valores de pH bajos, lo cual fue un comportamiento inusual y a la vez interesante de estudiar.

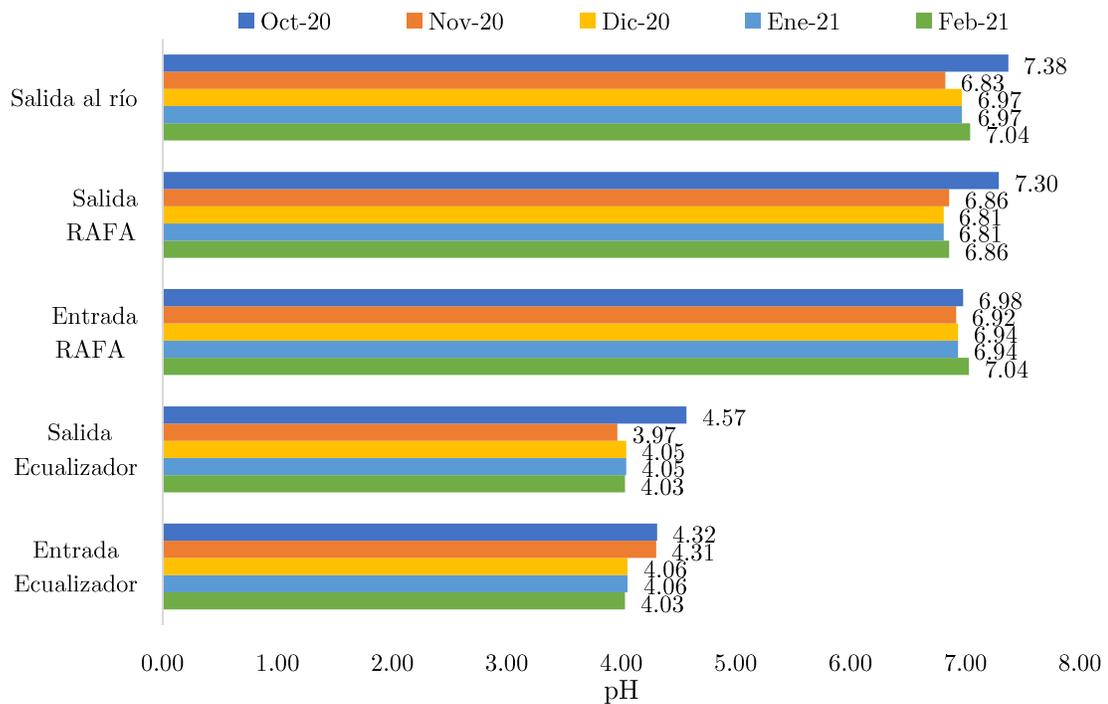


Figura 10. Comportamiento del pH en promedio por cada mes de cosecha 2020 – 2021.

En algunos días puede suceder que el pH es menor a 6 cuando entra al RAFA, pero dado que este reactor funciona con microorganismos mesófilos, estos deben estar en pH relativamente neutro para poder desarrollarse adecuadamente, entonces esto indica que el pH debe subirse antes de entrar al equipo, por lo que en estos casos lo que se hace es agregar soda caustica para aumentar el pH y asegurar un buen funcionamiento de los microorganismos.

De igual forma, en la Figura 10 se muestra que el pH en realidad es muy similar para todos los meses en cada etapa, lo que quiere decir que no existe mucha variación por lo que no afecta la cantidad de café procesada como tal en términos de este parámetro. De forma general, entre más café se procese al día, es normal asumir que el pH del agua residual vaya a ser más ácido, sin embargo,

esto puede que no se cumpla porque la acidez del agua no depende tanto de la cantidad que se procese de café, sino más bien depende principalmente de la madurez del grano de café y este parámetro es difícil de calcular, ya que influyen en él otras cosas como la altitud de donde se recolecte el grano, de modo que entre más baja sea la altitud la maduración es mayor. Entonces, en cuanto al pH, se evidencia que en el mes de noviembre y diciembre que son los más fuertes, al salir del ecualizador se observa que el pH de estos meses es inferior a los demás, esto puede demostrar que se cumple el comportamiento esperado de que un pH ácido representa que hay alto nivel de carga orgánica. Aunque hay factores como la poca agitación y aireación del ecualizador o bajos tiempos de retención en sedimentadores que pueden reducir bastante los niveles de pH.

Es importante aclarar que la medición se puede ver afectada por la hora en la que se esté tomando el pH, por lo que para disminuir estos factores se utilizó el mismo pHmetro y se tomaron las mediciones a la misma hora según datos brindados de la empresa.

Por otro lado, una de las partes más importantes de análisis constituye el parámetro de sólidos suspendidos totales (SST), este ensayo se realizó utilizando un equipo medidor portátil que se encarga de medir la cantidad de sólidos totales que hay en una muestra líquida. En la Figura 11 se muestra el comportamiento de los SST a través de los meses de cosecha. Es posible evidenciar, que al igual que en los otros parámetros, la carga orgánica más alta se encuentra siempre en el ecualizador que es donde se mezclan todas las aguas. En general, se tienen parámetros bastante estables en todos los meses, los cuales van disminuyendo conforme el agua se está tratando, tal y como se espera.

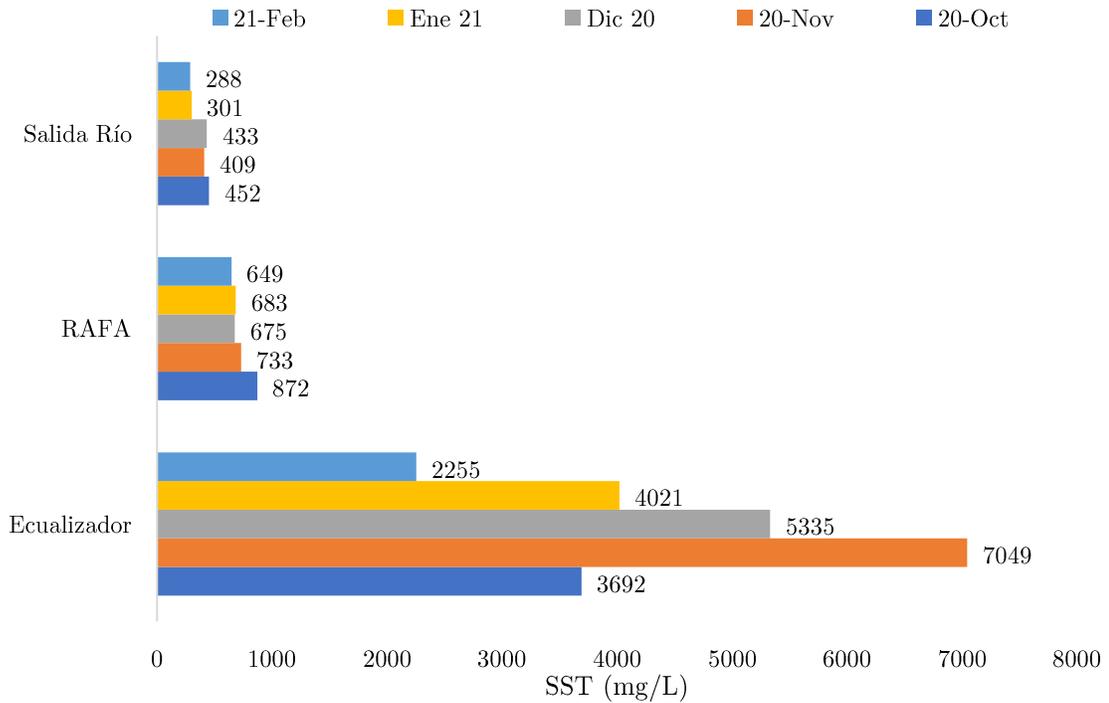


Figura 11. Comportamiento del promedio de SST durante la cosecha 2020 – 2021.

Es interesante observar que los meses de noviembre, diciembre y enero son los que poseen mayor carga orgánica y sólidos suspendidos, esto porque son los meses que se recibe más cantidad de café y por ende el sistema puede saturarse más. Se observa que se obtienen valores de hasta 7049 mg/L en promedio hasta finalizar en un rango de 450 mg/L - 280 mg/L luego de ser tratada el agua. Cabe resaltar que esto es un promedio de valores históricos analizados, pero un dato de sólidos suspendidos en el beneficio puede perfectamente alcanzar hasta los 15 000 mg/L, valor que se toma como base de cálculo.

3.5. Comparativa de los datos históricos con respecto a la legislación

Uno de los principales requisitos para el adecuado funcionamiento de una empresa es respetar y cumplir con la legislación. Es por esta razón que se hace énfasis en poder cumplir con los parámetros establecidos por la ley. A continuación, en la

Figura 12 se muestra el promedio de los valores del efluente con respecto al DQO. Es posible observar que solamente los meses de noviembre y diciembre no están cumpliendo según lo estipulado por la ley, ya que sobrepasan el valor permitido para agua residual del beneficiado de café que es 1400 mg/L según el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales vigente. El resto de los meses, cumplen con la legislación, esto se debe a que son los meses donde llega menos cantidad de fanegas y por ende la carga orgánica es menor, por lo que es más fácil para el sistema de tratamiento de aguas llegar a valores menores de DQO. De igual forma, afecta el consumo de agua que se utilice, ya que como se mencionó anteriormente, al inicio se gasta mucha más agua que en picos de cosecha donde se recibe mucho café, por ende al inicio la carga orgánica se diluye más y esto disminuye el valor de DQO.

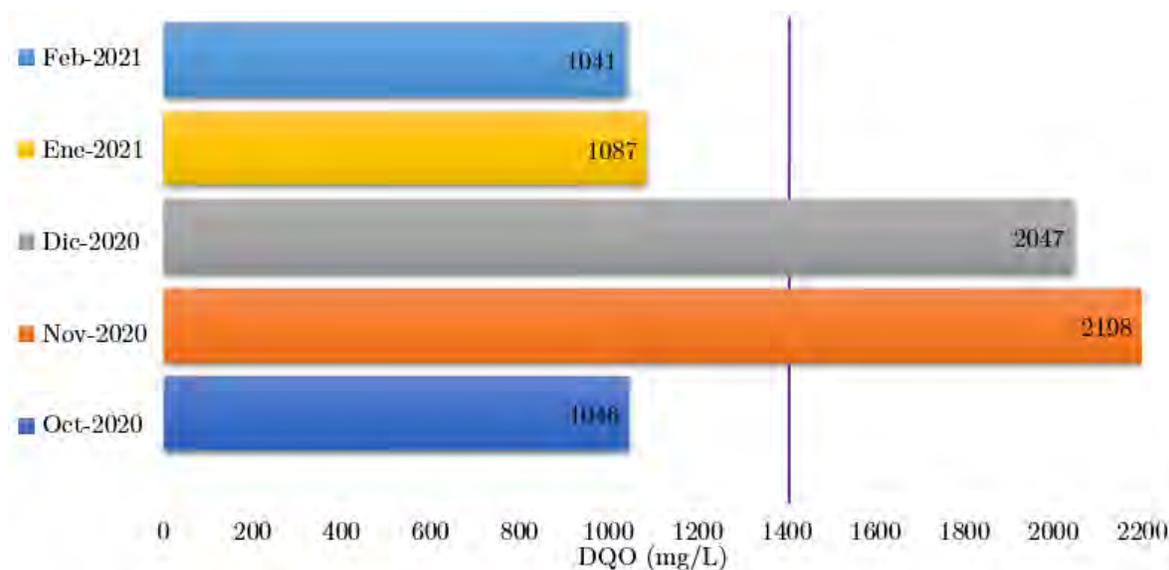


Figura 12. Promedio de valores de DQO vertidos en cuerpo receptor en comparación con la legislación actual para la cosecha 2020 – 2021.

Este comportamiento coincide con el de la Figura 6 y Figura 7, donde se muestra que estos mismos meses de noviembre y diciembre presentan altos valores de DQO, los cuales son difíciles de reducir al mínimo establecido por la ley. Por esta

razón, para poder cumplir con la ley se quiere implementar un sistema que ayude a reducir esta carga orgánica tan grande y que logre abastecer todo el sistema de tratamiento de aguas para que funcione adecuadamente, y de esta forma poder estar más bien lo más cercano a cero mg/L de DQO posible.

En el caso del pH, se evidencia en la Figura 10 que todos cumplen con la legislación permitida que es actualmente un rango de entre 5 y 9 para efluentes que necesiten verter en cuerpos de agua. De esta forma, se cumple lo establecido ya que el pH ronda los 7 en todos los meses. Este parámetro se considera como el menos sensible a cambios de carga orgánica, ya que se comporta muy similar sin importar el mes, como se evidenció en la Figura 10.

Por otro lado, los sólidos suspendidos totales como se muestra en la Figura 11, todos se encuentran por debajo de 500 mg/L que es lo permitido por la ley para efluentes que viertan a cuerpos de agua, esto demuestra que se está cumpliendo con lo establecido, sin embargo, los valores promedios están muy cercanos al valor establecido por la ley, esto hace que sea riesgoso porque puede que algunos días del mes estén dando valores superiores a lo permitido. El objetivo es reducir lo más que se pueda este valor para alejarse del límite de 500 mg/L establecido por la legislación.

CAPÍTULO 4

Implementación del DAF piloto

4.1. Metodología

Se participó de forma activa en la puesta en marcha del DAF piloto y su implementación, lo que contempla comprender el funcionamiento del equipo y como operarlo. Además de que se determinó los parámetros de operación como dosificaciones de coagulante y floculante mediante una prueba de jarras. Se propusieron posibles acciones de mejora o soluciones a problemas que ocurrieron durante la operación del equipo.

Se tomaron datos de forma experimental de a DQO, pH y SST luego de la implementación del DAF piloto en la empresa durante 5 meses aproximadamente en los diferentes puntos de generación: entrada y salida del equalizador u homogeneizador, entrada y salida del DAF, entrada y salida del reactor anaerobio flujo ascendente y salida hacia el efluente (vertido en campos de agua).

En el caso de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó tomando muestras todos los días de la entrada y salida de los equipos del tratamiento primario y secundario, estas muestras se sometieron a un proceso de digestión durante 2 horas para posteriormente dejarse enfriar y luego obtener la absorbancia de las muestras mediante un espectrofotómetro y finalmente el valor de DQO en mg/L. De igual forma se obtuvieron con muestras tomadas al agua residual el valor de sólidos suspendidos totales (SST) al menos cada 3 días mediante un instrumento de medida TDS. Y también, se obtuvo el pH todos los días mediante un pHmetro. Estos parámetros se utilizaron para calcular la eficiencia de remoción para el DAF piloto.

Adicionalmente, se realizó una comparación entre la eficiencia del tratamiento secundario sin la implementación del DAF piloto y con la implementación de este y se compararon todos los resultados con respecto a la legislación.

4.2. Puesta en marcha del DAF piloto en la empresa

Se realizó la puesta en marcha del DAF el 1 de octubre de 2021, la compañía W.W.T. Ingeniería se encargó de la instalación del equipo. El DAF piloto implementado tenía un caudal de diseño máximo de 5 m³/h (6 veces menos que el DAF requerido por la PTAR). Dentro de los objetivos de la implementación del equipo se encuentran los siguientes:

- Estimar el aumento de capacidad del beneficio con la instalación de esta tecnología.
- Medir la eficiencia del DAF durante las etapas de cosecha.
- Verificar la variación del consumo de químico durante las etapas de cosecha.
- Extrapolar el impacto en la eficiencia del RAFA con la disminución de sólidos suspendidos.
- Medir el impacto en términos económicos con la reducción de contratación de cisternas para extraer agua ya que la capacidad actual no es suficiente.
- Reducir la cantidad de soda caustica utilizada para regular el pH.

Al iniciar la implementación del DAF, se realizó la toma de parámetros como DQO, pH y SST todos los días. Primeramente, se iniciaba a las 7:00 am en donde se encendía el equipo, se ajustaba el caudal de entrada, se dosificaba el coagulante y floculante en este orden respectivo la cantidad precisa determinada mediante una prueba de jarras. Se utilizó el coagulante AQUAFLOZ WO 47 en una dosis promedio

de 300 ppm y el floculante AQUAFLOC TS 06 S en una dosis de 50 ppm según resultados obtenidos por las pruebas de jarras.

Cabe destacar que estos valores varían todos los días, dependen de la carga orgánica que haya en el sistema y del caudal de agua residual, por lo que se debe estar en constante monitoreo para poder verificar si se requiere más o menos dosis de ambos componentes. Se tuvieron picos de dosis de coagulante de hasta 400 ppm y de floculante 180 ppm, por lo que para disminuir el consumo de químico se optaba por disminuir un poco el caudal y aumentar la recirculación en el DAF, esto permite que el sistema trabaje de una forma más eficiente. Se controlaba el pH, cercano a 4.5.

Se ajustaba el tiempo de encendido de las rasquetas para que funcionaran en promedio de 1 min a 2 min continuos, con tiempos de apagado de 5 min a 10 min dependiendo de la cantidad de sólidos. El tiempo de encendido se encarga de remover todos los sólidos suspendidos que hayan quedado en la superficie del DAF, mientras que el tiempo de apagado debe ser mayor para lograr acumular la mayor cantidad de sólidos en la superficie del equipo, los cuales se remueven en el tiempo de encendido luego de ser acumulados.

En cuanto al caudal, en el mes de octubre 2021 se logró tratar hasta un máximo de 90 m³/día de agua en el equipo mientras que los meses posteriores de noviembre y diciembre se logró tratar un máximo de 50 m³/día, para finalmente terminar tratando como 30 m³/día en los meses de enero y febrero. En promedio el DAF piloto podía operar cargas de hasta 5000 mg/L con un caudal de 5 m³/h, sin embargo, dado que las cargas orgánicas presentes en el beneficio sobrepasaban los valores de diseño, se debió operar con recirculación, esto para poder disminuir la carga orgánica presente en el agua residual, de esta forma, se estima que la mayoría

del tiempo se trabajó a $2 \text{ m}^3/\text{h}$ con recirculaciones de hasta 400% para poder obtener una buena eficiencia en el equipo; ya que el DAF piloto al tener una capacidad baja en comparación a la demanda necesaria, requería que la misma agua residual que ya había sido tratada volviera a pasar por el equipo para disminuir considerablemente su carga orgánica (recirculación).

En octubre es cuando normalmente empieza a llegar el café pero en cantidades moderadas de 300 fanegas/día aproximadamente mientras que en noviembre aumenta hasta 1500 fanegas/día y en diciembre aproximadamente 750 fanegas/día. En los meses de enero y febrero se recibe en promedio unas 500 fanegas/día y 300 fanegas/día respectivamente. De esta forma, se determina que los meses “pico de cosecha” representan alta carga orgánica y por ende se puede tratar menos cantidad de agua por día, ya que el equipo se satura más rápidamente.

De igual forma, se implementó un deshidratador de lodos “volute” que se encargaba de reducir el porcentaje de humedad de los lodos resultantes del proceso de flotación por aire disuelto los cuales salen del DAF con un 3.5 % de concentración en materia seca. En promedio estos lodos luego de deshidratarse contienen un 30 % de materia seca, por ende, se logra reducir aproximadamente un 26.5 % de humedad en el proceso de deshidratado. Estos lodos al salir se terminaban de secar en lechos de secado o bien se envían a un gestor autorizado para su debido tratamiento. Tratar los lodos consiste en parte esencial del tratamiento de residuos que generan las aguas residuales, por ende, el deshidratador de lodos es parte fundamental del proceso del DAF.

De forma general, la operación del DAF consistía en realizar pruebas de jarras todos los días para dosificar el coagulante y floculante, incluyendo la toma de los parámetros de DQO, SST y pH. Además de monitorear el flujo de entrada

dependiendo de cómo esté saliendo el agua en el efluente del DAF (verificar si es necesario recircular agua residual o no). Esta operación era necesaria por ser un DAF piloto, un equipo ya dimensionado para una operación unitaria no debería de tener un monitoreo tan estricto.

Uno de los problemas más frecuentes era que se tenía que disminuir el caudal porque el sistema no estaba siendo eficiente, entonces se probaba con un caudal menor para corroborar si esto mejoraba la eficiencia en la operación, de modo que esta saliera sin evidencia de sólidos suspendidos o partículas sedimentadas. Como se explicó anteriormente, una disminución del caudal permite separar mejor los sólidos insolubles del agua residual, por ende, dada la carga excesiva de SST de hasta 15 000 mg/L, se debía disminuir el caudal a prácticamente 1/3 de capacidad del DAF, el cual estaba diseñado para tratar solamente 5 000 mg/L. De esta forma, con una recirculación del agua residual de hasta 400 % con flujo de entrada de 2 m³/h se lograba una eficiencia apropiada en el equipo, a pesar de que no se lograba trabajar a caudal máximo por la alta carga orgánica.

El sistema de aireación del DAF se mantenía constante con los parámetros designados por el fabricante, ya que el sistema viene por defecto en un caudal de aire constante, por lo que no era necesario modificarlo. Asimismo, la presión en la que se introduce el aire también era un parámetro que se debía revisar y mantener en 40 psi aproximadamente. La cámara de presurizado se encargaba de mantener una sobresaturación de aire adecuada para que el agua blanca recirculada (agua clarificada del DAF) pudiera elevar hasta la superficie toda la biomasa presente.

Otro de los aspectos importantes era la preparación del coagulante y floculante, ya que estos vienen sin preparar. En el caso del floculante su presentación era en polvo y se debía concentrar al 0.1 % v/v, mientras que el coagulante si venia

en presentación líquida y se diluía al 5 % v/v normalmente. Aproximadamente, de 3 a 5 veces por día se debía preparar ambos compuestos antes de que se acabaran.

Se debía manipular las bombas de floculante y coagulante, esto dependía de la dosificación que se obtuviera en la prueba de jarras, tomando como referencia el caudal máximo de la bomba se calcula el porcentaje que debe introducirse de cada compuesto al sistema y se dosifica la bomba en ese valor determinado. Estas dosis varían según la carga orgánica presente en el agua y el caudal de entrada al equipo, con base en esto se puede obtener un cálculo respectivo para la dosificación de las bombas, este cálculo se explica más a detalle en el capítulo 5.

Cabe resaltar, que para efectos de discusión de resultados, no se toma en cuenta el pretratamiento, comprendido por el filtro rotativo, los sedimentadores y el tamiz, esto debido a que no se tienen parámetros en estas áreas por lo que no se pueden discutir y también porque en la empresa no se lleva un control estricto del funcionamiento de estos equipos, a diferencia del resto a partir del ecualizador, por ende en los resultados no se discute con base en equipos del pretratamiento. No obstante, se recalca la importancia de contar con un adecuado control de estos y todos los equipos, por lo que se recomienda a la empresa contar con parámetros de todas las áreas de la planta de tratamiento.

4.3. Comportamiento de parámetros al implementar el DAF piloto

Al operar el DAF piloto se tomaron una serie de parámetros con el fin de evidenciar si hubo mejoría o no en la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas. Primeramente, se analiza el DQO. En las Figuras 13, 14, 15, 16 y 17 se muestran los resultados obtenidos para todos los meses, en la Figura 13 se evidencia el comportamiento para octubre, en donde se muestra que los valores de entrada al

ecualizador son similares a los valores mostrados en la Figura 5, esto demuestra que en general el comportamiento del beneficiado de café presenta etapas iniciales similares, lo cual brinda una buena aproximación para iniciar la caracterización del agua residual. En el mes de octubre se muestra que se cumple con los parámetros establecidos ya que el valor obtenido del efluente que va hacia el río es mucho menor a lo estipulado por la legislación, lo cual es beneficioso. Mientras tanto para la cosecha pasada donde no se contaba con el DAF piloto, los valores resultantes para el efluente eran más cercanos a 1400 mg/L, valor máximo permitido por ley.

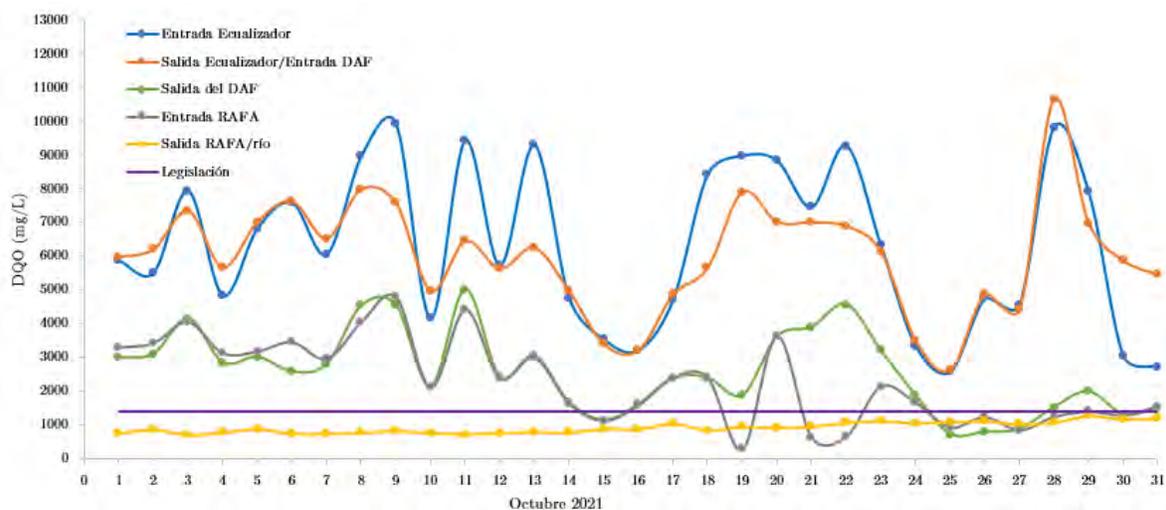


Figura 13. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2021, cosecha 2021 – 2022.

Otro aspecto importante es que según la ubicación del DAF, este se encontraba a escasos 5 m del ecualizador que es de donde provenían las aguas de entrada al equipo, mientras que el RAFA se encuentra a unos 50 m del DAF, lo cual afecta severamente, ya que el agua cuando va llegando al RAFA se va mezclando con el agua del ecualizador cruda y por ende el DQO es variable cuando sale del DAF y cuando entra al RAFA. Esto se debe a la distancia entre los equipos y también a que el DAF no está operando con toda la carga y caudal que hay porque es un equipo

piloto que no abastece todo el beneficio, entonces apenas ayuda a liberar un poco de carga orgánica pero siempre el efluente del DAF se mezclaba con parte del equalizador sin tratar y esto era el agua que llegaba al RAFA. Sin embargo, es posible notar diferencias significativas con solo aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{h}$ que brinda el DAF de agua tratada en comparación al caudal total que puede alcanzar los $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

El comportamiento de los meses siguientes de noviembre y diciembre mostrados en las Figuras 14 y 15 es similar a lo que se encontró en la cosecha anterior, ya que los valores de DQO de entrada alcanzan los $65\,000 \text{ mg/L}$ en pico de cosecha. A diferencia de lo obtenido en la cosecha pasada 2020 - 2021, el DQO en este escenario para el efluente que va hacia el cuerpo receptor si cumple con lo establecido por la ley, se afirma que el valor esta ligeramente debajo de la línea permitida, mientras que en la cosecha anterior el valor superaba el límite permitido.

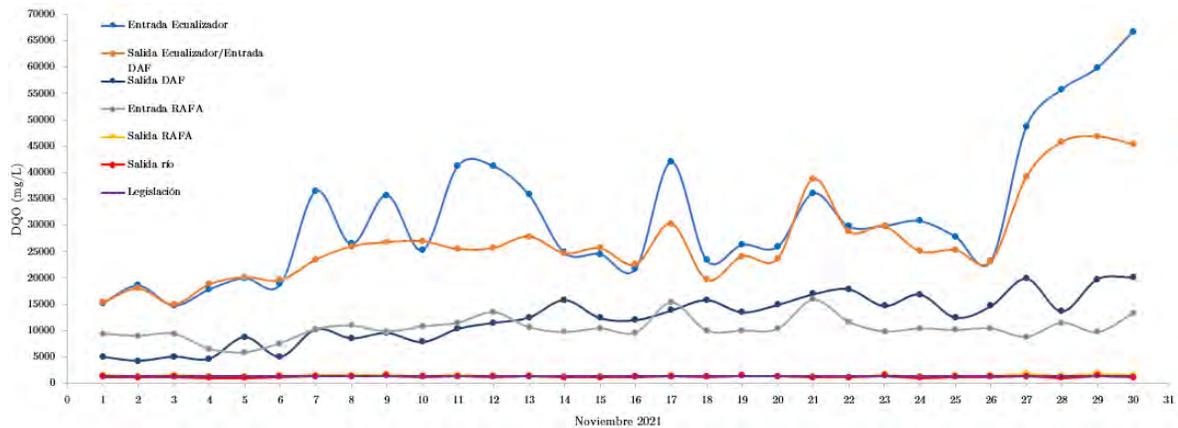


Figura 14. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2021, cosecha 2021 – 2022.

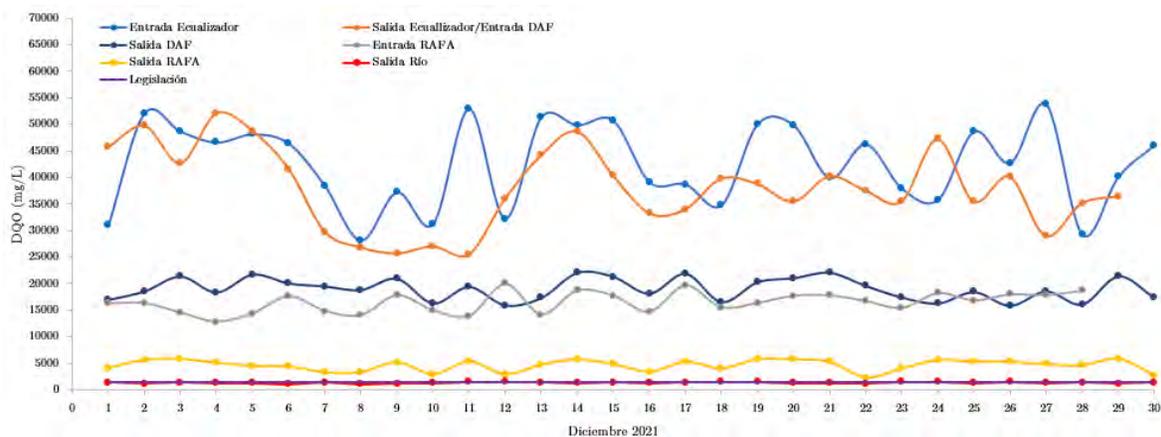


Figura 15. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2021, cosecha 2021 – 2022.

De igual forma se evidencia en los gráficos que el DQO de salida al DAF difiere de la entrada al RAFA, este comportamiento es el mismo explicado anteriormente, ya que afecta la distancia que hay entre los equipos. Igualmente puede suceder que el valor de DQO entrante al ecuializador difiera del valor que sale de este, esto es factible que suceda ya que cuando el agua se homogeniza con todo el resto que hay en el ecuializador todos los parámetros se estabilizan y por ende pueden cambiar un poco, ya sea subir o bajar ligeramente, este comportamiento es normal (Maria & Graterol, 2015).

Finalmente, cercano al mes de enero y febrero mostrado en las Figuras 16 y 17, es posible notar que el sistema de tratamiento está menos saturado, por ende los valores alcanzados de DQO ya son menores, y como se nota, el efluente que va hacia el río alcanza DQO mucho más aceptable y bajo, lo cual es beneficioso para que el sistema se termine de limpiar y demás. Con esto el sistema se libera para poder estar listo para la próxima cosecha.

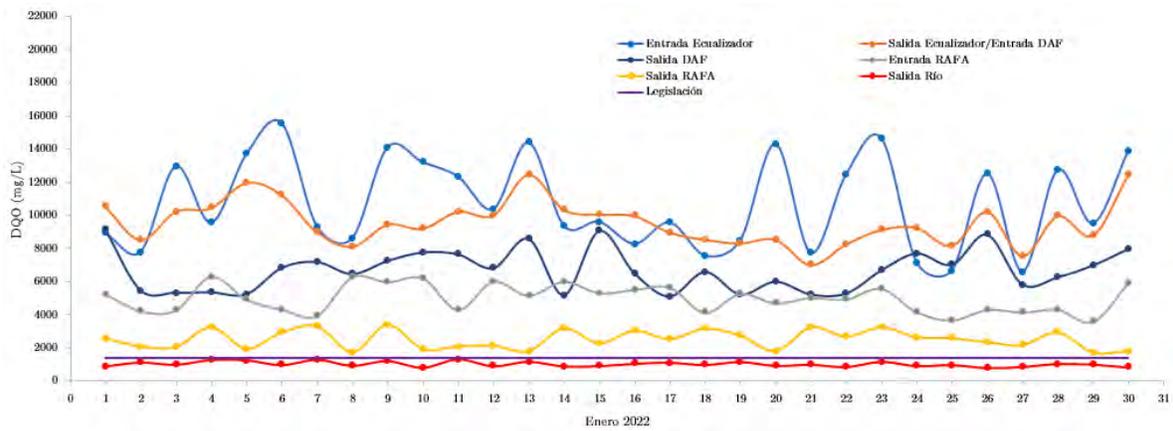


Figura 16. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2022, cosecha 2021 – 2022.

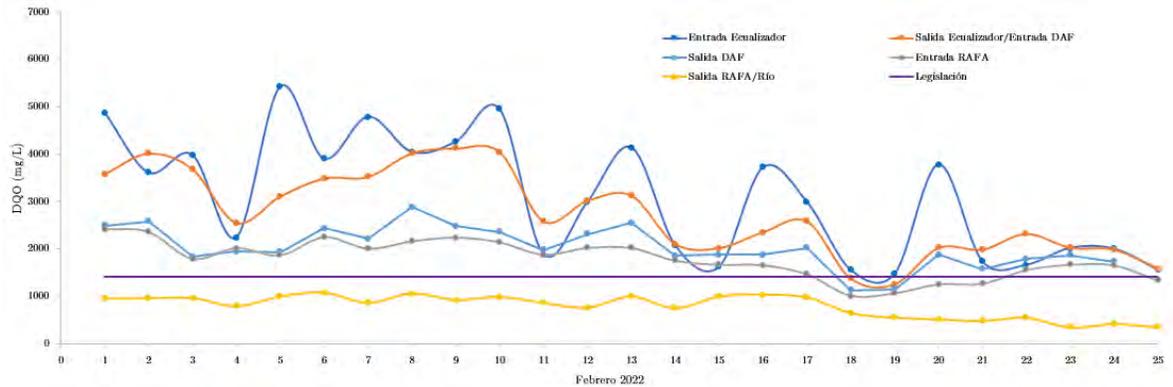


Figura 17. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2022, cosecha 2021 – 2022.

Seguidamente, en la Figura 18 se analiza el pH obtenido, el cual es muy similar a la cosecha anterior, aquí se muestra que el agua inicial viene con pH ácido de 4 y mientras se homogeniza y pasa por el DAF la salida también es ligeramente ácida, ya que alcanza un valor de 5. Los meses de más alta demanda que son noviembre y diciembre el pH es más ácido que el resto, entonces se puede afirmar que la cantidad de carga orgánica si afecta en la medición del pH.

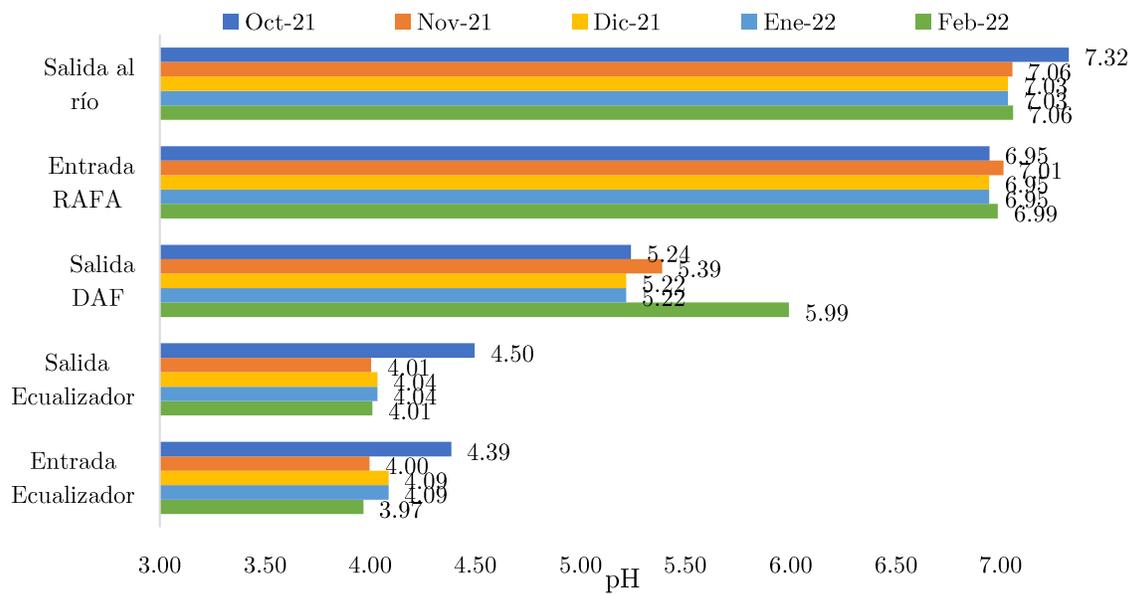


Figura 18. Comportamiento del promedio de pH para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.

Al salir del DAF, el agua llega al RAFA donde el pH debe ser estabilizado a valores neutros, ya que esto es muy importante que suceda para que las bacterias y microorganismos puedan desarrollarse de una mejor forma y a su vez que se encuentren en condiciones óptimas para su reproducción. Para lograr esta estabilización normalmente se hace uso de soda cáustica para regular el pH antes del ingreso al RAFA. La cantidad de producto depende exclusivamente del pH en el que se encuentre el agua en ese momento, se va agregando hasta ver valores neutros en el pHmetro.

Por ejemplo, se observa que el pH de salida del DAF ronda valores de 5, mientras que de entrada al RAFA el pH se encuentra en 6 – 7. Este cambio no sucede solo, sino que se realiza la dosificación de soda cáustica en un tanque agitado para controlar que el pH del agua que ingresa al reactor sea superior a 6 y que con esto no se vea afectada la eficiencia, ya que los microorganismos trabajan a pH cercanos al neutro de lo contrario, se pueden inactivar. Para el efluente donde se vierte a cuerpos

de agua finalmente se obtiene un valor neutro de pH lo cual es apto según la legislación que permite un rango de 6 – 9.

Por otro lado, en la Figura 19 se muestran los resultados para los SST en la cosecha 2021 – 2022. Se puede observar que existen picos altos de cosecha en el ecualizador que son los que entran al DAF. La carga orgánica es tan alta que los sólidos suspendidos pueden alcanzar hasta los 14 000 mg/L en el mes de noviembre, realmente esto es un valor muy alto por lo que complica el tratamiento de aguas, ya que no se puede tratar el mismo caudal en donde los sólidos habían sido menos de la mitad, por ende esto hace que el proceso sea más lento a la hora de tratar las aguas y todo lo que son tiempos de retención o recirculación en el caso del DAF tengan que aumentarse. Cabe resaltar que para el mes de noviembre en promedio si se tiene un valor de casi 10 000 mg/L pero en dos días de este mes se alcanza la cifra antes mencionada.

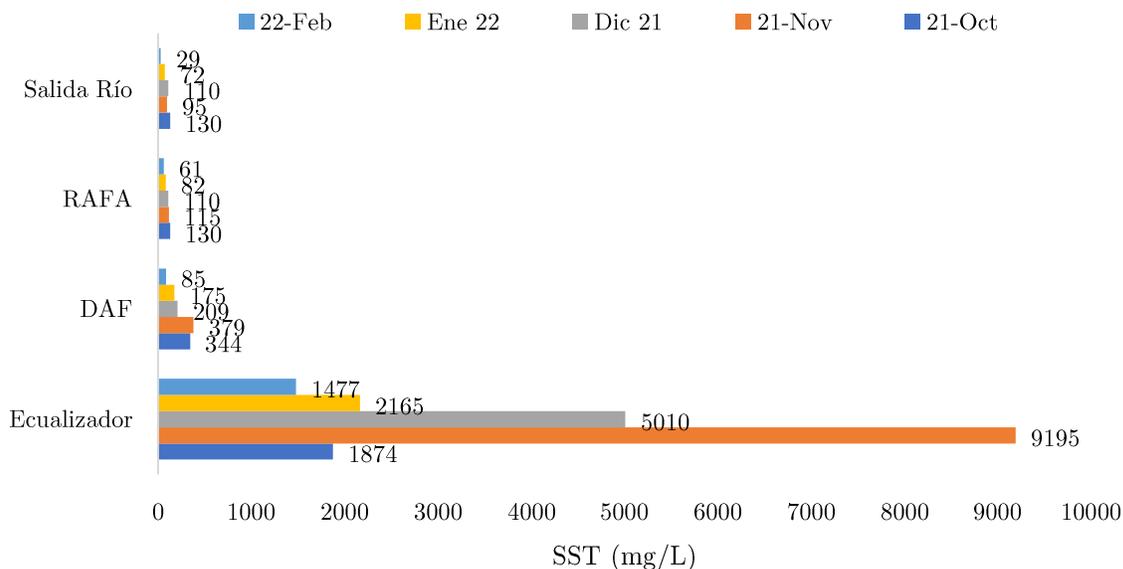


Figura 19. Comportamiento del promedio de SST para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.

Esta amplia carga de sólidos entra al DAF y se logra reducir prácticamente en un 90% en promedio. Lo cual es bastante eficiente, cabe resaltar que el DAF piloto

no es capaz de procesar todo lo que hay en el ecualizador por efectos de capacidad hidráulica, sin embargo, si agiliza mucho más el sistema en comparación a la cosecha anterior.

En este caso, la cosecha 2021-2022 si presenta muchos más picos que la pasada 2020 – 2021, esto puede verse afectado por efectos de la maduración del café. En general, el agua residual del beneficiado de café es difícil de caracterizar debido a la miel del mucílago que se le extrae, ya que esta miel puede cambiar de composición fácilmente y afectar el agua residual.

4.4. Eficiencia del DAF

Una de las partes más importantes a la hora de evaluar el desempeño del equipo es obtener su eficiencia. La eficiencia de un equipo cuantifica la capacidad para realizar un trabajo de forma adecuada, de modo que a partir de estos datos se pueden tomar decisiones relevantes para la compañía si es rentable de forma productiva adquirir o no el DAF. La eficiencia se calculó a partir de la siguiente ecuación 4:

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{(C_{e.DAF} - C_{s.DAF})}{C_{e.DAF}} * 100 \quad (4)$$

donde,

Eficiencia de remoción = Es la eficiencia obtenida a partir de la concentración, %.

$C_{e.DAF}$ = Concentración de entrada del DAF, mg/L.

$C_{s.DAF}$ = Concentración de salida del DAF, mg/L.

A partir de esta ecuación 4, se puede calcular todas las eficiencias de cada día obtenidas en el DAF, en este caso se graficó primeramente con respecto al DQO,

tomando el valor asociado a la salida del ecualizador que es lo mismo que la entrada del DAF y el valor de la salida del DAF. A partir de estos resultados para todos los meses de cosecha se diseñó la Figura 20.

En esta se muestra un comportamiento bastante variable, en general las eficiencias pueden cambiar dependiendo del flujo que se trabajara ese día en el DAF y de la carga orgánica del agua también, por esta razón se tienen valores desde 13 % hasta un poco más del 80 %. A pesar de que estos porcentajes de remoción son significativos, es necesario centrar el análisis en el porcentaje de remoción de SST, ya que el DAF es un equipo que su función principal es remover sólidos suspendidos, mas no disminuir el DQO, aunque si se disminuye el porcentaje de SST a su vez se logra disminuir el DQO, debido a que hay menos carga orgánica en el agua residual. Es posible notar que los meses de octubre y febrero son los más bajos en cuanto a eficiencia esto se debe a que es donde hubo menos carga orgánica probablemente porque son meses bajos de cosecha, lo cual puede afectar las mediciones de eficiencia. De igual manera, se le realizaba mantenimiento al equipo periódicamente y puede que esto haya afectado los resultados de los meses descritos anteriormente, ya que se tenía que parar la operación para realizar cambios de bombas o reparaciones.

Dado que no existe una tendencia que prevalezca en la gráfica, es posible notar que todos los días de todos los meses son diferentes, es difícil apreciar un patrón. Sin embargo, en octubre conforme termina el mes se muestra un aumento en la eficiencia, esto está asociado con el aumento de cosecha. De igual manera, se logra apreciar que diciembre maneja un promedio de 50 % de eficiencia, por lo que es un mes promedio donde el DAF logra disminuir la carga de DQO en la mitad de su valor de entrada. Enero y febrero son meses de baja cosecha, por ende muestran resultados de baja eficiencia, esto indica que no hay un cambio significativo en la entrada y salida de

DQO del DAF piloto.

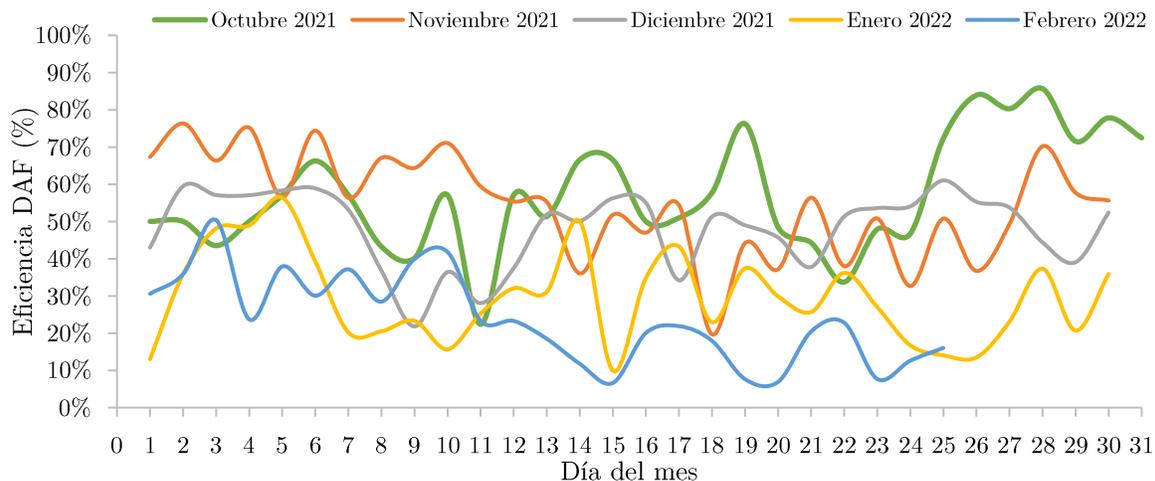


Figura 20. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir del DQO para la cosecha 2021-2022.

De igual forma, en la Figura 21 se muestra un gráfico de barras que representa el promedio de las eficiencias por cada mes con respecto al DQO, el gráfico se elabora a partir de la Figura 20 como referencia, solamente que utilizando el valor promedio de cada mes. Se muestra que en octubre, fue el mes en el que se obtuvo una mayor eficiencia, de hasta un 57 % en promedio, mientras que en febrero se obtuvo una eficiencia de 23.7 %, lo cual demuestra que el mes en el que se trabajó mejor fue cuando había “menos carga orgánica” y estaba empezando la cosecha mientras que para los meses siguientes que aumentaba la carga orgánica se logró mantener un valor de eficiencia cercano al 50 %, sin embargo ya para los meses de enero y febrero disminuyó su eficiencia. Estos valores se encuentran dentro de lo esperado, ya que por ejemplo una eficiencia de remoción promedio para un DAF es de un 20 % a un 50 % (ISA, 2023).

En este aspecto es importante mencionar que en enero se cambió una de las bombas que no estaba funcionando adecuadamente, lo cual afecta la dosificación. Se

pudo haber evaluado de una mejor forma el DAF si las bombas hubieran operado adecuadamente durante toda la cosecha, pero como se mencionó, se tuvieron problemas técnicos que pudieron afectar las mediciones.

De igual forma, la función del DAF principalmente es disminuir la carga orgánica o sólidos suspendidos totales, no se enfoca en disminuir DQO, no obstante, si se logra apreciar una disminución importante en este valor lo que contribuye al buen desempeño del equipo.

El comportamiento de la eficiencia también se puede explicar desde el punto de vista de la maduración del café, ya que en los meses iniciales de cosecha el café se encuentra “verde”, por lo que la concentración de azúcares es menor en comparación al café maduro, en este caso la carga orgánica soluble es baja en octubre pero aumenta conforme la producción se eleva y esto hace que la eficiencia del equipo se vea afectada porque la carga soluble no la puede eliminar el DAF, solo reactores biológicos que es el tratamiento secundario.

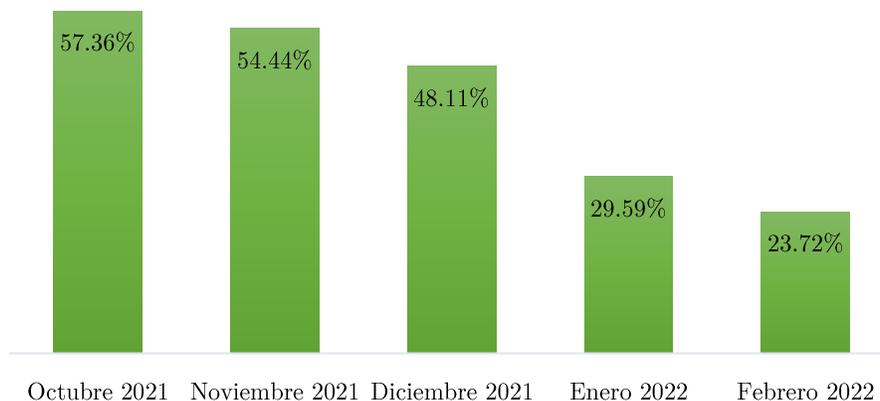


Figura 21. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir del DQO para la cosecha 2021 – 2022.

Por otro lado, a partir de la misma ecuación 4, se logra obtener la eficiencia

de remoción por parte de los sólidos suspendidos totales. En la Figura 22 se muestra la eficiencia obtenida a partir de los SST, se evidencia que los valores son más altos que los obtenidos en la Figura 20, ya que existen eficiencias desde 73 % hasta 97 %, superiores a lo que afirma la literatura (ISA, 2023), por ende esto confirma que realmente el equipo se enfoca más que todo en la disminución de la cantidad de sólidos suspendidos que tenga el agua residual, lo cual no significa que sea más importante reducir SST que DQO, sin embargo, el equipo se diseña para tal fin. El DAF, al ser un equipo que no posee tratamiento con microorganismos, se enfoca más que todo en separar sólidos suspendidos o sedimentables llamados insolubles, mientras que equipos como el RAFA se diseñan para eliminar la materia soluble presente en el agua mediante tratamiento secundario, por ende, este último equipo si representa una mayor disminución de DQO que de SST dado que se enfoca a reducir los sólidos disueltos en el agua (Quintero et al., 2017). Reducir los SST hace que el agua residual que entre al RAFA sea mucho más fácil de tratar y por ende esto aumente la eficiencia del reactor anaerobio y de la planta de tratamiento.

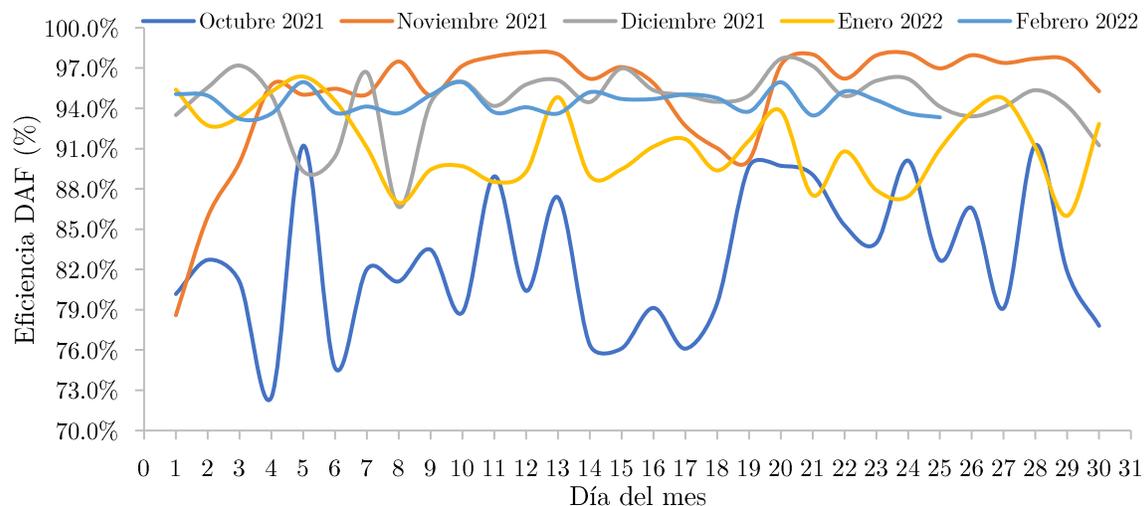


Figura 22. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir de los SST para la cosecha 2021-2022.

Asimismo, los tiempos de retención pueden ser menores, ya que el caudal de entrada a cada etapa va a variar, de modo que si el agua residual posee mucha carga orgánica el caudal que debe suministrarse a los equipos debe ser más lento en comparación al caudal en el escenario en el que el agua vaya menos cargada. Esto se debe a que el sistema requiere de más tiempo para tratar el agua que viene más cargada, este comportamiento aplica principalmente para el DAF.

Además, en la misma Figura 22 se logra observar valores más estables con el tiempo debido a que la línea de tendencia para cada mes posee menor amplitud a la observada en la Figura 20, excepto por el mes de octubre que si tiene una amplitud grande, esto se debe a que es uno de los meses más fuertes de cosecha.

Seguidamente, se muestra la Figura 23 asociada al promedio de las eficiencias de remoción respecto a los sólidos suspendidos totales. Se logra apreciar que el promedio de todos los meses es superior a 82.6 %, lo cual es beneficioso, ya que el DAF se está desempeñando de forma adecuada suministrando la remoción suficiente para llegar a porcentajes de eficiencia altos, como lo afirma la compañía ISA (2023) con valores estándar para la remoción de sólidos suspendidos desde un 65 % hasta un 80 %. Esto representa que el equipo logra remover de manera adecuada los sólidos suspendidos que hay presentes en el agua residual. Lo que ayuda a que tratamientos posteriores sean más eficientes.

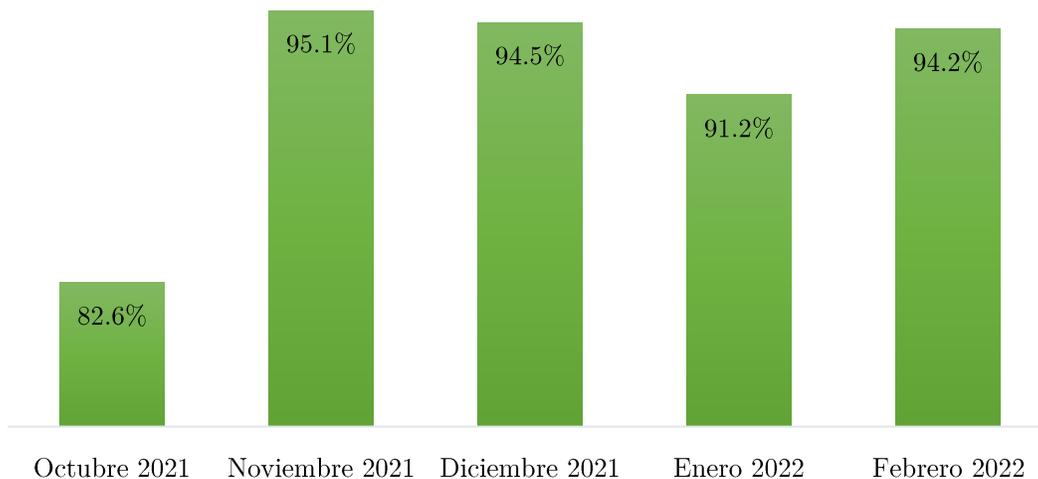


Figura 23. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir de los SST para la cosecha 2021 – 2022.

Estos porcentajes de remoción tan altos, representan que el DAF posee un buen desempeño en la remoción de SST. Como se mencionaba anteriormente, esto se debe a que el DAF se diseña para eliminar sólidos insolubles (suspendidos y sedimentables) los cuales pueden realizarse con tratamiento fisicoquímico, mientras que la remoción de DQO se enfoca más que todo a tratamiento biológico. De esta forma, se determina que el DAF posee mayores eficiencias en remoción de SST que de DQO.

4.5. Comparativa de los datos con respecto a la legislación

En cuanto a la legislación, con respecto al DQO se cumple de manera efectiva en prácticamente todos los meses, ya que el efluente está en valores inferiores a 1400 mg/L, esto representa que el equipo realmente si está siendo eficiente con respecto a la ley debido a que sus valores de DQO, SST y pH cumplen con lo establecido, lo cual es sumamente importante para el control del ministerio de salud y de la aprobación de los permisos de funcionamiento. De igual forma, el pH se encuentra

en rango de 7 a la hora de salir en el efluente, lo cual se encuentra dentro de los parámetros aceptados.

Finalmente, con respecto a los SST, se muestra que igualmente se encuentran en rango, ya que los valores finales de efluente para los meses de cosecha no superan los 380 mg/L, lo cual cumple con la legislación al estar por debajo de 500 mg/L. Se puede notar, que estos valores obtenidos para la cosecha 2021 - 2022 son menores que los obtenidos para la cosecha 2020 - 2021, estos resultados y las eficiencias obtenidas afirman que el DAF funciona adecuadamente en el tratamiento de aguas residuales del beneficiado de café.

4.6. Comparativa entre ambas cosechas

Al finalizar la cosecha 2021 - 2022, es posible notar que si existen diferencias en comparación a la cosecha 2020 - 2021, ya que todos los parámetros experimentaron una disminución significativa para el efluente que va hacia el río anexo a la empresa. En cuanto el DQO, se puede afirmar que cuando se instaló el DAF piloto en promedio el valor máximo de salida para el río fue de 1302 mg/L, lo cual cumple la legislación del país estipulada en el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales, por ende esto favorece a la empresa debido a que el DAF está disminuyendo la gran cantidad de carga orgánica presente. Mientras que por otro lado, para la cosecha en la que no se tenía el DAF los valores de salida llegan hasta los 2198 mg/L, lo cual indica que la legislación no se estaba cumpliendo.

En la Figura 24, se muestra una comparativa de ambas cosechas con respecto al DQO, tomando como referencia el “tratamiento primario” que es la laguna en la primera cosecha y el DAF en la segunda cosecha se logra obtener la siguiente gráfica comparativa. Aquí se muestra que la primera cosecha posee eficiencias muy bajas, de

máximo 31.93% para el mes de noviembre, mientras que la eficiencia del tratamiento primario una vez instalado el DAF alcanza valores de 57.4% y en todos los meses se muestra con cifras superiores a la cosecha pasada, siendo esto un escenario positivo al implementar el DAF piloto.

EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO PRIMARIO



Figura 24. Eficiencia comparativa entre ambas cosechas para el tratamiento primario a partir del DQO.

En el caso de la comparativa con respecto a SST, no se pudo realizar porque solamente se tenían los datos de entrada al ecualizador y de salida del RAFA, por ende al no tener el dato histórico intermedio para comparar no se pudo realizar una gráfica de eficiencias con respecto al tratamiento primario a partir de SST.

También, en cuanto al pH, realmente no se logra notar un cambio abrupto debido a que en ambas cosechas se cumple con el rango aceptable para el efluente estipulado por la ley, sin embargo, es posible evidenciar que tomando como referencia el pH saliente del ecualizador que es 4, en la cosecha sin DAF se tenía que agregar una cantidad alta de soda cáustica para llegar el pH hasta al menos 6.5 y que los microorganismos del RAFA logren sobrevivir, mientras que cuando estaba instalado

el DAF, el pH saliente del DAF era aproximadamente 5.5, por ende se requiere de menos soda cáustica para lograr llegar a pH neutro antes de entrar al RAFA. De esta forma, se determina que sí existe un beneficio económico para la empresa.

Finalmente, en cuanto a los SST, se logra evidenciar que para la cosecha sin DAF los valores de salida para el efluente superan los 400 mg/L, valor muy cercano al máximo permitido por la legislación, mientras que para la cosecha con DAF los valores van desde los 29 mg/L hasta máximo 130 mg/L, lo cual permite una ventaja extra para la empresa ya que se evidencia que en caso de haber picos de producción, este parámetro no sobrepasaría los límites establecidos por ley.

CAPÍTULO 5

Propuesta de diseño del DAF y elaboración de un manual de operación y mantenimiento para la PTAR

5.1. Metodología

Se incluyó en el diseño del DAF el funcionamiento del equipo, características que este posee, además de sus dimensiones y capacidad de operación de acuerdo con las necesidades de la empresa. Se tomó en cuenta para el diseño la generación de lodos que se produce de acuerdo con la cantidad de agua que se está tratando y los factores que se deben tomar en cuenta como aireación. Se diseñó el equipo DAF dimensionado de acuerdo con las condiciones actuales de caudal que deben tratarse de agua residual en la empresa. Se incluyó asimismo la selección de las bombas que deben utilizarse en el equipo y las tuberías.

Se elaboró un apartado para la disposición de los lodos provenientes del DAF en donde se determinó como pueden ser aprovechados. Se determinó el mejor coagulante y floculante según la caracterización del agua residual, esto involucró realizar pruebas de jarras a diferentes dosis para poder conocer cuales productos químicos se ajustan de mejor manera al tratamiento del agua residual, de esta forma se asegura el mejor coagulante realizando prueba de jarras hasta que el agua residual resulte clarificada. Es necesario realizar el procedimiento de prueba de jarras todos los días porque la maduración del café recibido siempre es diferente, además cambian las condiciones de operación y caudal. Se discutieron factores que pudieron afectar el rendimiento del DAF.

En el diseño de la planta se incluyó un diagrama de flujo elaborado mediante la herramienta AutoCad asociado al equipo DAF y su distribución en la PTAR. Finalmente, como parte de las necesidades de la empresa se reelaboró un manual de

operación y mantenimiento tomando en cuenta el DAF, para esto se recopiló información de los fabricantes de equipos de la planta de tratamiento de aguas incluyendo al DAF, los cuales indiquen el debido procedimiento para el arranque de estos y la correcta puesta en marcha con el fin de operarlos adecuadamente. Además, se incluyó el mantenimiento preventivo y correctivo que debe realizarse a la planta de tratamiento para prolongar su vida útil. Asimismo, se incluyó como calcular las dosis de coagulante y floculante para la debida operación del DAF.

De igual forma, se elaboró un plan en caso de emergencia al final del manual para que los operarios estén preparados en una eventualidad con algún equipo de la planta de tratamiento. El manual está destinado a personas con todo tipo de escolaridad, de modo que sea de fácil lectura y comprensión para que el lector pueda operar correctamente la planta de tratamiento y que la capacitación por parte de los beneficios de café sea más accesible y eficaz.

5.2. Diseño de un equipo de flotación por aire disuelto (DAF)

Un sistema de flotación por aire disuelto es una operación unitaria de gran utilidad para separar partículas de baja densidad contenidas en una fase líquida. Estas partículas finas de carácter sólido se adhieren a las microburbujas de 30 μm a 120 μm que se forman mediante la inducción de aire presurizado, normalmente entre 4 atm - 6 atm. De esta forma, las partículas que estaban suspendidas logran ascender a la superficie del tanque mediante una fuerza de impulsión ocasionada por la presión del aire. De modo que partículas con mayor densidad que el agua, se logren separar por flotación. Las partículas separadas en la superficie forman lodos que se eliminan de manera fácil mediante un sistema de rasquetas, el cual cada cierto tiempo, al menos 3 min, arrastran el lodo hacia el lado contrario de donde sale el agua tratada

del equipo (Aguilar, 2014).

Una vez explicado el funcionamiento del equipo, es necesario entender algunas de las principales características que posee este diseño. Para diseñar un DAF, es importante saber dos parámetros, la cantidad de sólidos presentes en el agua residual y el caudal horario que se maneja, este último hace referencia al caudal de agua residual que se tenga en las horas de operación del equipo, por ejemplo 8 horas al día. A partir de estos parámetros, es posible determinar un equipo que se adapte a estas necesidades y que por ende tenga la mayor eficiencia posible. En el caso de la empresa en estudio, se tenía mucha carga de sólidos, los cuales alcanzaban hasta 15 000 mg/L de SST máximo, por lo tanto, un diseño del DAF a considerar sería tomar como referencia procesar 15 000 mg/L de SST operando 20 horas diarias, con el fin de que queden 4 horas al día para limpieza (el beneficio opera 24/7 durante la cosecha), imprevistos u otros. De esta forma, el equipo puede procesar adecuadamente la gran cantidad de sólidos presentes en el agua residual.

Existen varios tipos de DAF entre los más comunes el rectangular y el circular, sin embargo, para efectos de diseño se contempló el rectangular debido a que es el más encontrado en el mercado y a pesar de que no tengan la mejor capacidad de remoción, ocupa menos área y son mecánicamente más fáciles de trabajar. Asimismo, todos los equipos DAF contemplan la recirculación del agua tratada presurizada con aire, ya que la recirculación permite menores tiempos de retención hidráulicos en el equipo y por ende se ahorra energía. Además de que la recirculación aumenta el porcentaje de remoción de sólidos, ya que el agua residual pasa más de una vez por el equipo lo que permite separar adecuadamente la biomasa. No es lo mismo trabajar en un sedimentador que puede requerir de horas para separar cierta cantidad de sólidos o en un DAF que es un proceso más rápido y eficiente. Se debe tomar en

cuenta, que la cantidad de aire necesaria depende de la cantidad de contaminantes que tenga el agua, de la presión de trabajo y la temperatura (prácticamente constante) (Sainz, 2005).

El equipo posee 4 componentes esenciales: tanque de flotación, sistema de adición de aire, calderín de presurización y equipo de bombeo. En el tanque de flotación, se da la separación de los contaminantes mediante la ayuda de las burbujas que se generan en el sistema de presurizado de modo que estas al ascender logran acumular los sólidos insolubles del agua en la parte superior, donde las rasquetas se encargan de separarlos del agua residual. El sistema de adición de aire y presurizado se encargan de crear las burbujas pequeñas que son introducidas al equipo para así lograr separar los sólidos suspendidos. El sistema de presurizado como tal se encarga de aumentarle la presión al agua recirculada ya tratada para que vuelva a entrar al equipo como el “agua limpia” que ayuda a separar los sólidos. Normalmente trabaja a una presión de 40 psi a la hora de expulsar el agua a presión con las burbujas. El equipo de bombeo incluye la bomba necesaria para enviar el agua al equipo desde el tanque homogeneizador, la bomba de presurizado que succiona el agua clarificada y la lleva hasta el tanque presurizado y las bombas de floculante y coagulante las cuales se encargan del proceso químico que proporciona la separación del sólido insoluble del agua residual. De igual forma, se debe contemplar válvulas de purga en el sistema de presurizado, manómetro, válvulas de seguridad, entre otros (Sainz, 2005).

5.3. Parámetros de diseño

Los datos de diseño para el tanque de flotación se muestran en el Cuadro 1. Estos parámetros son teóricos u obtenidos a partir de datos brindados por la empresa con el fin de facilitar el diseño del equipo para el adecuado tratamiento de aguas

residuales.

Cuadro 1. Parámetros teóricos para el diseño de un DAF.

Parámetro	Valor	Referencia
Caudal (m ³ /día)	670	Promedio de todos los meses según la
Horas diarias que trabaja el DAF	20	cantidad de fanegas
Densidad del aire (mg/L a 25 °C)	1.184	(Aguilar et al., 2014)
Presión de vapor del agua (mmHg a 25 °C)	23.8	(Aguilar et al., 2014)
Tiempo retención hidráulico tanque flotación (min)	30	(Aguilar et al., 2014)
Tiempo retención hidráulico cámara de presurización (min)	2	(Aguilar et al., 2014)
Carga superficial (m ³ /m ² *día)	130	Se recomienda de (120 – 360) (Pimiento & Cárdenas, 2020)
Factor seguridad	1.5	(Aguilar et al., 2014)
Solubilidad de saturación del aire 1 atm (mL/L a 25 °C)	17.1	(Aguilar et al., 2014)
Presión de inyección de aire (mmHg)	4650	Recomendado por asesor técnico W.W.T Ingeniería
Relación aire/sólidos (mL/mg)	0.03	Recomendado asesor técnico W.W.T Ingeniería
SST entrada DAF (mg/L)	15000	Valor máximo obtenido en pico de producción
SST salida DAF (mg/L)	1275	Según eficiencia promedio de remoción: 91.5%

Como se muestra, el caudal de 670 m³/día se obtiene a partir del caudal promedio de todos los meses según la cantidad de fanegas, en el orden respectivo desde octubre hasta febrero se obtienen 300, 1500, 750, 500 y 300 fanegas por mes, tomando como referencia que aproximadamente cada fanega requiere de 1 m³ según lo expuesto anteriormente en promedio. Entonces, esto da como resultado el valor de 670 m³/día de agua residual que se genera.

Todos estos parámetros del Cuadro 1 se toman constantes porque son lo que normalmente se han utilizado a lo largo de la implementación del DAF en la industria, además de que están referenciados de acuerdo con la teoría. Son parámetros que pueden cambiar por motivos de clima, temperatura, caracterización del agua y demás.

Como se mencionó anteriormente, se plantea diseñar el equipo para que sea capaz de procesar 15 000 mg/L, esto siendo la cantidad máxima que se podría esperar en picos de cosecha. Por lo tanto, a partir de este flujo y asumiendo una recirculación máxima posible del 400 % utilizada en el DAF piloto para lograr disminuir la carga tan alta de sólidos quedaría un flujo total de 167.5 m³/h para el DAF diseñado tomando en consideración la recirculación.

De esta forma, se puede lograr reducir la carga de sólidos en promedio de un 91.5% como se obtuvo según el promedio de las eficiencias de SST según la Figura 23 tomando en cuenta todos los meses, sin embargo, es importante aclarar que esto es muy relativo, se está tomando como que si todos los días hay 15 000 mg/L de SST entrantes y realmente esto no se comporta de esta forma, solamente en picos de cosecha que normalmente suceden en los meses de noviembre y diciembre. No obstante, es una aproximación para asegurar que el equipo soporte la carga en picos de cosecha, esto a pesar de que se toma en cuenta un factor de seguridad de 1.5

(Aguilar et al., 2014) que también asegura que el dimensionamiento sea superior al requerido.

De igual forma, en el Cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros obtenidos para dimensionar el DAF. En cuanto al fabricante, los parámetros más necesarios son el caudal, la cantidad de sólidos a procesar, área superficial del tanque de flotación, recirculación y la cantidad de aire liberado. Cabe resaltar, que la parte dimensionada del prisma rectangular es la parte del DAF en donde ocurre todo el proceso de clarificación del agua, mientras que la pirámide es la parte inferior que contribuye a evitar la sedimentación debido a que si hay sólidos que sedimentan estos se van a ir a la parte cónica por efecto de la gravedad, de este modo se provee un sistema de fácil extracción de sólidos sedimentables cuando se realice mantenimiento al equipo. Además, por motivos de fuerza ejercida por el peso del agua, un diseño plano en la parte inferior puede tender a doblarse con el tiempo, por lo que la inclinación de la pirámide reduce la fuerza ejercida del agua sobre el equipo.

Se muestra en los resultados, que en total se requiere de un volumen de 125.62 m³ en la cámara de flotación. Asimismo, el tanque de presurización se logró dimensionar a partir del valor de recirculación, el cual se obtuvo a partir del valor utilizado en el DAF piloto de aproximadamente 400% de recirculación, estos resultados se muestran en el Cuadro 2.

De esta forma, se estima que el DAF necesario puede ser flexible en cuanto a dimensiones como altura, ancho y largo, sin embargo, si debe cumplir con parámetros fijos como lo son el caudal necesario, la recirculación y la cantidad de sólidos a procesar. En los anexos se muestra el cálculo respectivo para cada uno de los parámetros descritos.

Cuadro 2. Resultados obtenidos de los parámetros más importantes del DAF y las principales dimensiones del equipo.

Parámetro	Valor
Solubilidad a presión de operación (mL aire/L agua)	107.45
Solubilidad a presión atmosférica (mL aire/L agua)	14.83
Cantidad de aire liberado (mL aire/L agua)	95.02
Cantidad de lodo máximo (kg/h)	459.8
Área superficial del tanque flotación (m ²)	25.77
Fracción de aire disuelto a presión de operación	1.04
Dimensiones del equipo	
V prisma rectangular (m ³)	125.62
Ancho prisma rectangular (m)	4.87
Altura prisma rectangular (m)	2.20
Largo prisma rectangular (m)	11.7
Largo cámara de floculación y coagulación con respecto al largo del prisma (%)	12.7
Largo cámara de burbujas con respecto al largo del prisma (%)	8.85
Largo entre la cámara de burbujas y el inicio de las rasquetas con respecto al prisma (%)	9.6
Largo de las rasquetas con respecto al largo del prisma (%)	59.6
Largo de la abertura de lodos con respecto al prisma (%)	3.85
Profundidad de la cámara de lodos con respecto a la altura del prisma (%)	39.47
Profundidad de la división del efluente con respecto a la altura del prisma (%)	73.68
Largo cámara del efluente con respecto al largo del prisma (%)	5.77

Cuadro 2 (Continuación). Resultados obtenidos de los parámetros más importantes del DAF y las principales dimensiones del equipo.

Parámetro	Valor
Largo de cada pirámide con respecto al largo del prisma (%)	36.5
Altura pirámide (m)	0.300
V pirámide (m ³)	2.09
V total cámara de flotación (m ³)	129.8
Recirculación (m ³ /h)	134
V tanque presurizado (m ³)	6.70
Relación diámetro/altura del tanque presurizado	0.44
Diámetro del tanque presurizado (m)	1.56
Altura tanque presurizado (m)	3.51

Como se muestra, en el caso de las dimensiones del equipo, específicamente el ancho obtenido de 4.87 m es un valor complicado de acomodar en un contenedor que normalmente es el medio de transporte para un equipo DAF desde el fabricante hasta el lugar de uso, ya que los contenedores rondan los 2.4 m hasta 2.8 m como máximo de ancho, por lo que este motivo es un indicador de que el DAF diseñado no es posible construirlo por temas de transporte. Por este motivo, en el Cuadro 3 se plantea dividir el equipo diseñado en 2, de esta forma contemplando los mismos parámetros de altura y largo pero cambiando el ancho a la mitad, se logra tener dos equipos iguales que logran procesar la mitad del caudal cada uno. El costo es un factor que se ve afectado, sin embargo para poder cumplir con el caudal de diseño se requiere de esta modificación, de lo contrario, no existe un transporte viable que pueda traerse el equipo ya que no cabe en un contenedor normal de 40 pies.

En el Cuadro 3, se observan los parámetros obtenidos en el caso de dimensionar el DAF a la mitad para su facilidad de transporte. Cabe resaltar que estos parámetros mencionados en el Cuadro 3 son con base en 1 DAF y se debe contemplar que se comprarían 2 para suplir la demanda necesaria. De esta forma, se estaría trabajando con dos DAF, de 16.75 m³/h entrantes cada uno con una recirculación de 67 m³/h para cada equipo. Cabe resaltar que los cálculos se realizaron de una forma similar al Cuadro 2.

Cuadro 3. Resultados obtenidos del dimensionamiento ajustado del DAF.

Parámetro	Valor
V prisma rectangular (m ³)	62.81
Ancho prisma rectangular (m)	2.44
Altura prisma rectangular (m)	2.20
Largo prisma rectangular (m)	11.71
Altura pirámide (m)	0.300
V pirámide (m ³)	1.04
V total cámara de flotación (m ³)	64.9
Recirculación (m ³ /h)	67.0
V tanque presurizado (m ³)	3.35
Diámetro del tanque presurizado (m)	1.24
Altura tanque presurizado (m)	2.79

Otro de los parámetros importantes a considerar a la hora de diseñar el DAF es el coagulante y floculante, los cuales se determinaron a partir de la caracterización del agua residual proveniente del beneficio, esto se realiza mediante prueba de jarras. Este ensayo consiste en tener varios recipientes con el agua residual cruda sin tratar

a un mismo volumen. A cada recipiente se le agrega una dosis determinada de coagulante y de floculante, se agita durante 5 min y se comparan los resultados visuales de como los sólidos presentes en el agua se agrupan y se separan del agua residual. De esta forma, se logra limpiar sólidos suspendidos en el agua residual.

Mediante prueba de jarras, se logró encontrar la combinación que más contaminantes remueve, la cual fue un coagulante orgánico y polimérico, junto con un floculante catiónico. Mediante las cargas que poseen, el coagulante primeramente se encarga de agrupar los sólidos en coágulos y finalmente el floculante agrupa los coágulos para formar una masa de sólidos separados del agua residual. A esto se le conoce como el proceso de coagulación/floculación que sucede en el DAF. Las burbujas presentes en el equipo se encargan de ascender estos flóculos formados para ser removidos y separados del DAF.

En la siguiente Figura 25 se logra apreciar cómo funciona el equipo utilizado, se realizan diferentes dosificaciones de coagulante se dosificó a 200 ppm, 175 ppm, 150 ppm y 125 ppm de izquierda a derecha respectivamente mientras que el floculante se fijó en 30 ppm para todos los envases. Se muestra en los resultados que para el primer envase se tiene un agua residual más transparente y por ende menos turbia, mientras que en los otros se va oscureciendo cada vez más el agua. Esto demuestra que la dosis adecuada de coagulante para el agua residual de ese día sería 200 ppm con 30 ppm de floculante. Una vez obtenido este parámetro, se puede cambiar ahora el floculante dejando fija la dosis de coagulante y así sucesivamente hasta encontrar los parámetros favorables. Se debe recordar que el agua residual es muy cambiante, por ende, se puede esperar que las dosis varíen de un día para otro significativamente.



Figura 25. Equipo de prueba de jarras utilizado para encontrar la dosificación de coagulante y floculante requerida.

Las pruebas de jarras se recomiendan realizarlas al menos 1 vez al día, ya que en cada lote de fanegas de café puede variar la cosecha y por ende cambiar la composición del agua por lo que esto afecta la dosificación necesaria. De igual forma, para asegurar que el cambio en la dosis sea el menor posible se debe asegurar que el equalizador se encuentre mezclando adecuadamente y con buena aireación, de esta forma se puede lograr una dosificación más homogénea. Entre más café se reciba, más probabilidad hay de que la composición del agua cambie, ya que proviene de diferentes fincas donde se tienen diferentes altitudes y demás que afectan a la maduración del grano.

A continuación, se muestra una imagen de cómo se logra apreciar el agua antes y después del tratamiento del DAF. Es posible apreciar en la Figura 26 como el vaso de la derecha que es agua cruda sin tratar posee alta composición de sólidos por su viscosidad a simple vista, mientras que el agua de la izquierda se muestra más transparente y blanca, cabe resaltar que aún así el agua tratada se puede ver turbia, sin embargo se debe considerar que el DAF es solamente el tratamiento primario y

por ende los tratamientos posteriores como el RAFA se encargan de eliminar sólidos disueltos que hayan quedado y así lograr obtener agua residual cada vez más limpia.



Figura 26. Resultados obtenidos del agua residual antes (derecha) y después (izquierda) del proceso primario de flotación por aire disuelto.

A continuación, se muestra cómo se realiza el cálculo de la dosis de coagulante y floculante. Primeramente, es importante conocer los parámetros recomendados por el proveedor, diluir a un 5 % el coagulante que viene en presentación líquida y a un 0.1 % el floculante que viene en presentación sólida (polvo), estas concentraciones pueden variar dependiendo de la carga del agua residual y de la necesidad de remoción de sólidos. Una vez realizadas las diluciones de ambos componentes se calculaba de la siguiente forma el volumen a agregar de coagulante/floculante para una determinada dosis comprobada mediante la prueba de jarras.

$$Q_{Agregar} = \frac{Q_{Tratar} * D}{C * 10000} \quad (5)$$

Donde,

$Q_{agregar}$ = Caudal dosificado por la bomba de coagulante/floculante, L/h.

Q_{tratar} = Caudal de entrada al DAF, L/h.

D = Dosis de floculante/coagulante, ppm

C = Concentración de coagulante/floculante, %.

De igual forma, para obtener la dosis respectiva se utiliza la misma ecuación 5 sin embargo sustituyendo ambos caudales por volumen, de modo que el volumen a agregar sería los mL de coagulante/floculante utilizados para tratar 500 mL de agua residual que es lo que normalmente entran en la prueba de jarras y de la ecuación se despeja el valor de D asociado a la dosis necesaria que se requiere para tratar el agua residual. Esto se muestra de forma más clara en la ecuación 6.

$$D = \frac{V_{Agregar} * C * 10000}{V_{Tratar}} \quad (6)$$

De esta forma, si por ejemplo se requirió de 1 mL de coagulante al 5% para tratar 500 mL de agua residual en la prueba de jarras entonces la dosis sería de 100 ppm. De igual forma si para el floculante se necesitó de la misma cantidad de producto al 0.1% entonces la dosis sería de 2 ppm y así sucesivamente cada vez que se realice la prueba de jarras. De igual manera, a modo de ejemplo para la ecuación 5, para una dosis de coagulante de 100 ppm al 5%, tratando 6000 L/s, se requiere agregar de coagulante 12 L/s para abastecer la dosis necesaria, este valor se modifica en la bomba según su capacidad. Lo mismo sucede para obtener el caudal necesario de floculante.

5.4. Equipos auxiliares y materiales de construcción

El diseño del DAF incluye asimismo el dimensionamiento y selección de las bombas que deben utilizarse en el equipo y las tuberías, así como los materiales adecuados para que se logre un beneficio tanto técnico como económico en el equipo

asegurando que este funcione adecuadamente.

En cuanto a los materiales, se recomienda para la celda de flotación utilizar acero laminado en caliente ASTM A 568 (hierro negro) de 4 mm de espesor, esto con el fin de que logre soportar adecuadamente la fuerza que ejerce el agua residual en cuanto al peso y la resistencia química a las sustancias como coagulante y floculante (Maria & Graterol, 2015). A pesar de que el autor anterior recomienda utilizar el material de hierro negro, el agua residual de café al ser tan oxidante solamente permite utilizar material en acero inoxidable o fibra de vidrio, los cuales aseguren que la durabilidad del equipo sea extensa, aunque esto aumenta los costos del equipo. En cuanto a las tuberías, se recomienda hierro galvanizado o sino de PVC, esta última opción ofrece gran resistencia y bajo costo, por lo que se recomienda más para este tipo de operaciones, ya que funcionan adecuadamente y su costo es menor al del hierro galvanizado.

Con respecto a las válvulas, se instalan conforme el presupuesto y durabilidad que requiera la persona que va a instalar el equipo, ya que pueden conseguirse materiales de buena calidad que soporten más de 10 años pero costosos o materiales que deban renovarse cada 3 años con un costo más accesible. Se recomienda instalar válvulas antes y después de cada bomba de coagulante y floculante para poder detener la operación en caso de mantenimiento, además de una antes del tanque de saturación con el mismo fin de poder detener el flujo y realizar mejoras al equipo. En especial, la válvula previa al tanque de saturación debe ser de seguridad y se recomienda instalar un manómetro. Deben ser de acero inoxidable. También, debe haber una válvula al final del tanque como purga para que este se logre vaciar cuando se requiera hacer mantenimiento o limpieza.

De igual forma, debe haber una válvula para el sistema de recirculación, otra

para la bomba de aire en caso de que se deba liberar la presión a modo de seguridad. Finalmente, debe haber una válvula en la salida igualmente para detener la operación en caso de fuga o por motivos de seguridad. En el equipo piloto se tenían válvulas para cada recirculación de aire que entraba al DAF, así como un manómetro, esto permite controlar la presión de entrada al equipo para que no se produzcan accidentes. Todas las válvulas son de bola. En la siguiente Figura 27 se muestra la entrada de aire al sistema con todas las válvulas y manómetro operando correctamente.



Figura 27. Válvulas de bola y manómetro del tanque de presurización entrando al DAF.

Se debe recalcar la importancia de la presión del calderín, ya que si el agua no se introduce al DAF a una presión adecuada la misma no va a producir el efecto de las burbujas que hacen flotar los flóculos de biomasa y por ende no se va a lograr separar los sólidos insolubles que se requieren eliminar del agua residual.

En el caso de las rasquetas, las cuales se encargan de eliminar los sólidos flotando en el equipo, se requiere un mecanismo de barrido ubicado en la parte de arriba de la celda de flotación, normalmente se compone de 4 placas encargadas de barrer el lodo. Estas se encuentran unidas a dos cadenas de rodillo a cada lado hechas de acero, las cuales se desplazan a través de piñones para así lograr un barrido superficial y de manera continua cada 2 min o 3 min según se programe el equipo. Este sistema funciona a partir de un motor reductor eléctrico de al menos 1 Hp (Maria & Graterol, 2015).

Otro accesorio importante es el sistema de presurización, el cual requiere de un suministro de aire comprimido a una presión determinada dependiendo del sistema. En este caso se tiene una presión de entrada del aire de 6.2 bar. De igual forma, para que se puedan cubrir los requerimientos se recomienda un compresor de al menos 1 Hp. Cabe resaltar que normalmente cuando se adquiere el DAF, ya viene incluido todos estos accesorios. El tanque presurizado se instala básicamente para mantener durante un tiempo de retención determinado el agua a cierta presión deseada, tomando en cuenta que se le inyectó aire previamente y se presurizó con la bomba de recirculación, este tiempo de retención permite que el aire se termine de disolver en el agua para luego introducirse nuevamente al DAF y hacer flotar las partículas de sólidos suspendidos (Maria & Graterol, 2015).

En cuanto a la bomba de recirculación, esta se encarga de conducir el agua desde el efluente que ya fue tratada hasta nuevamente el proceso de clarificado luego de coagular y dosificar. Las bombas utilizadas para este proceso pueden ser de tipo centrífugas trifásicas y normalmente rondan los 3 HP, sin embargo, esto depende del caudal a recircular (D. Aguilar, 2014). Existen otros tipos de bombas como por ejemplo las KTM, las cuales son especiales para sistemas DAF ya que crea aguas

presurizadas sin la necesidad de compresores o al menos reduce los tanques grandes de saturación. Su funcionamiento consiste en succionar el agua residual, mezclarla mediante una cuchilla con aire aspirado del ambiente sin necesidad de compresor y disolver el gas, finalmente el fluido se presuriza y sale de la bomba. Puede generar burbujas de hasta 5 micrómetros. Este sistema permite ahorrar espacio y facilita el mantenimiento. Se tienen modelos con hasta 30 kW de potencia, recomendados para flujos de más de 60 m³/h (Nikuni America, 2019). Sin embargo, estos sistemas tienen la desventaja de que pueden no ser tan eficientes con la cantidad de aire requerido, por ende se prefiere utilizar un compresor que proporcione la cantidad necesaria para remover sólidos.

En general, estos son los requerimientos necesarios para el diseño de un DAF, sin embargo, está sujeto a proveedores y fabricantes que puedan abastecer la demanda necesaria. Con un equipo como el mencionado en este apartado, se lograría mejorar la capacidad del beneficio, por ende es beneficioso. El equipo, como norma de seguridad se diseña con un factor de 1.5 (Aguilar et al., 2014), lo cual indica que está 50 % sobredimensionado al menos, sin embargo, como se indicó anteriormente en el Cuadro 1, se asumió que todos los días el agua residual contenía 15 000 mg/L de sólidos suspendidos totales, no obstante, este valor se presentó solamente durante unos días en toda la cosecha, de esta forma se determina que también existe un sobredimensionamiento aparte del factor de seguridad.

Esto significa que al menos, el volumen de café procesado podría aumentarse un 50 % y aún así el equipo está en la capacidad para tratar el agua y desabastecer el sistema, por lo que este es el tipo de resultados que la empresa espera obtener al realizar una inversión de este tipo.

Cabe resaltar, que en picos altos de cosecha, se recomienda operar al máximo

la planta de tratamiento de aguas que incluye al DAF, esto para que no ocurra acumulación y que se tenga que desabastecer el agua residual extrayéndola con cisternas (situación habitual en el escenario actual de la empresa). Lo cual representa un costo también, ya que el servicio por recolectar agua sucia y tratarla cuesta aproximadamente setenta mil colones cada cisterna, y según datos de la empresa en el mes de noviembre y diciembre hay semanas que se extraen hasta 10 cisternas porque la planta de tratamiento no abastece debido a la acumulación excesiva de agua que no se logra tratar en un tiempo determinado. Por este motivo, el DAF pretende resolver esta situación y así no saturar tanto el sistema de tratamiento.

5.5. Disposición de lodos

Como se observa en el Cuadro 2 de resultados, se obtuvo una cantidad máxima de 460 kg/h de lodos, los cuales deben disponerse de forma adecuada. Actualmente, los lodos que salen del DAF contienen aproximadamente un 95 % de humedad, según un estudio realizado en la misma empresa, por lo que salen bastante líquidos.

Por esta razón, se sugiere utilizar un deshidratador de lodos que permita reducir esta humedad para que sea más fácil dispensar el lodo. Un deshidratador de lodos consiste en un equipo que se encarga de exprimir los lodos mediante un tornillo sinfín para extraer parte del agua restante que poseen los lodos. Con un equipo de estos, se espera que el porcentaje de humedad se reduzca a un 70 %, de esta forma, el agua que se extrae de los lodos se puede devolver al homogeneizador para su tratamiento y los lodos restantes se pueden utilizar ya sea como combustible para algún sistema de biogás o para su adecuada disposición.

Actualmente, en la empresa se deshidratan y posteriormente se empacan en sacos, los cuales se llevan a lechos de secado para terminar de extraer humedad y

seguidamente una compañía externa se los lleva para tratarlos. De igual forma se recomienda intentar utilizarlos como abono orgánico en cafetales de la misma plantación de café, ya que poseen alto contenido de nutrientes presentes en el mucílago del café que se recuperan en lodos secos. Sin embargo, es mejor realizar un estudio exhaustivo para analizar si los lodos repercuten de alguna forma en la contaminación ambiental o si su uso es seguro como insumo agrícola.

5.6. Diagrama de flujo de la PTAR y diagrama del DAF

En la siguiente Figura 28, se muestra el diagrama del DAF dimensionado acorde a las necesidades de la empresa. El mismo comprende todas las dimensiones descritas en las secciones anteriores, así como también en el Cuadro 2 y 3.

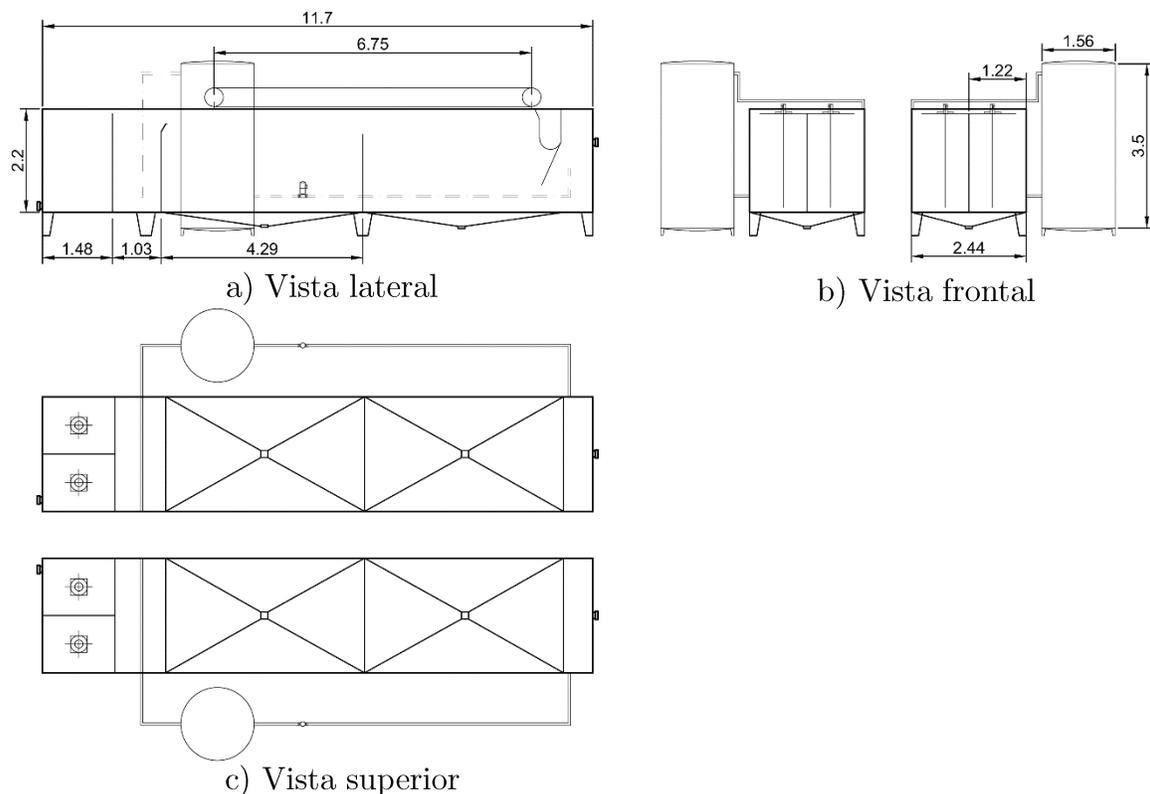
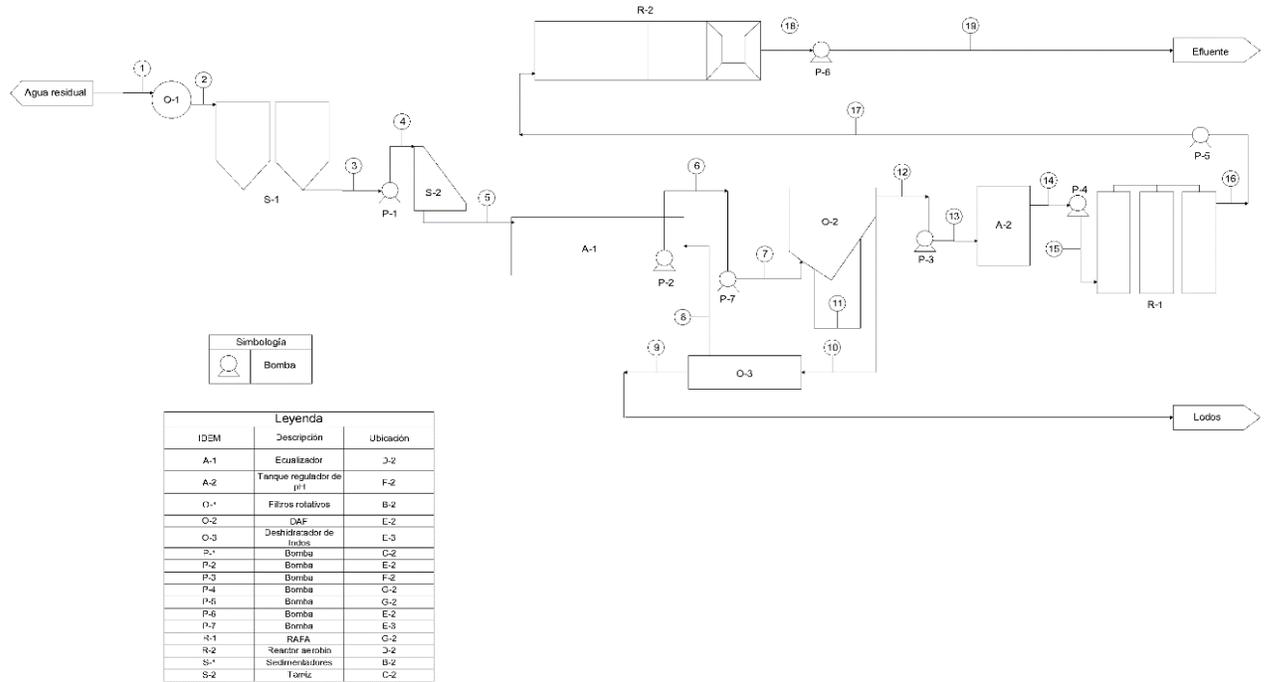


Figura 28. Diagrama del equipo DAF a) Vista lateral, b) vista frontal y c) vista superior (Elaboración propia).

En la Figura 29, se muestra el diagrama de flujo de todo el proceso de la

PTAR, el diseño es el que actualmente se encuentra en funcionamiento para la planta de tratamiento de aguas, con el DAF piloto implementado. Este diseño comprende todas las operaciones unitarias mencionadas en la sección 3.2 del proceso productivo actual de la empresa.

Como se muestra en la Figura 29, primeramente el agua residual entra a un filtro rotativo que separa partículas grandes que hayan en el agua, seguidamente pasa a unos sedimentadores que se encargan de quitar arenas resultantes del proceso de beneficiado. Posteriormente, pasa por un tamiz donde se terminan de eliminar partículas de brosa y contaminantes para seguir su curso hacia el ecualizador donde se terminan de homogenizar todas las aguas del proceso productivo. Luego, pasan al DAF y seguidamente a un tanque mezclador donde se agrega soda cáustica para regular pH. Finalmente pasan al RAFA donde se reduce la carga soluble que tenga el agua residual y al reactor aerobio para posteriormente salir al efluente que lleva el agua al cuerpo receptor.



Smbología	
	Bomba

Leyenda		
IDEM	Descripción	Ubicación
A-1	Ecuilizador	J-2
A-2	Tanque regulador de pH	F-2
O-1	Filtros rotativos	B-2
O-2	DAF	E-2
O-3	Deshidratador de lodos	C-3
P-1	Bomba	C-2
P-2	Bomba	E-2
P-3	Bomba	F-2
P-4	Bomba	C-2
P-6	Bomba	C-2
P-6	Bomba	E-2
P-7	Bomba	E-3
R-1	RAFA	C-2
R-2	Reactor aerobio	J-2
S-1	Sedimentadores	B-2
S-2	Flociz	C-2

Figura 29. Diagrama de Flujo del proceso de la PTAR.

CAPÍTULO 6

Costos de inversión asociados al diseño propuesto para el DAF

6.1. Metodología

Se realizaron cotizaciones del DAF considerando al menos dos proveedores diferentes, de acuerdo con las dimensiones propuestas en el objetivo anterior. Para este análisis, se consideraron los costos asociados a la inversión del equipo DAF y sus costos operativos durante la época de cosecha. Se consideraron diferentes escenarios de inversión tomando en cuenta varios bancos y tasas de interés, así como también escenarios de compra directa o leasing del equipo. Para llevar a cabo esto se realizará un cuadro comparativo entre todos los escenarios financieros. Al final, se recomendó el escenario más favorable desde el punto de vista financiero para la empresa.

6.2. Costo de inversión del equipo

Uno de los aspectos fundamentales a la hora de realizar un proyecto es estimar el costo de inversión, ya que esto permite evaluar si financieramente es rentable o no comprar el equipo propuesto. Por esta razón, se cotizó con dos empresas internacionales que fabricaran el equipo para así evaluar el precio de mercado aproximado que posee el DAF necesario para abastecer a la empresa. Cabe resaltar que los precios son de referencia y no significa que estas empresas sean las únicas que deben considerar para comprar el equipo, se requiere de una búsqueda amplia de más fabricantes y poder comparar entre ellos cual opción beneficia más en términos de calidad y precio. En el Cuadro 4 a continuación, se comparan ambos precios de los equipos y las principales características, de igual forma, ambas cotizaciones se encuentran en Anexos I, II, III y IV.

Como se muestra, en las cotizaciones las características principales son

similares, realmente lo que cambia es que en el caso de la compañía YiMei se contempló un flujo inicial de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ aunque se especificó con el fabricante que parte de ese flujo era recirculación, sin embargo en efectos de cotización se envió como un solo flujo pero se aclara que si se contempló la recirculación necesaria. De igual forma, el fabricante indica que el precio varía en cuanto al material que se utilice, ya que el acero inoxidable 304 a diferencia del 316L no contiene molibdeno, por lo que la aleación es un poco menos resistente a la corrosión y por ende más barata. La empresa YiMei solamente manejaba este tipo de acero (acero inoxidable 304).

También, se incluyen diferencias como por ejemplo en el tanque presurizado, ya que YiMei posee un tanque mucho más grande que Jinwantong, lo cual tiene sentido ya que el tanque presurizado dimensionado posee un volumen de 6.70 m^3 , mientras que estos tamaños cotizados son inclusive menores que la mitad del dimensionado.

A la hora de cotizar un equipo se debe contemplar que los fabricantes ya tienen estimadas ciertas medidas y con solo un flujo de entrada pueden dimensionar todo, sin embargo, es necesario primero dimensionar lo que se requiere para una operación adecuada y pasar esta información al fabricante para comprar un equipo que realmente sea acorde a lo requerido.

De igual forma, es interesante analizar como un mismo equipo puede tener muchas variaciones en el precio, ya que lo que es el material de fabricación influye mucho según lo comenta el fabricante. En general, ambos equipos cotizados incluyen el DAF, tuberías de recirculación, bombas, tanques de floculante y coagulante, agitadores, sistema de barrido, compresor, sistema de aireación, sistema dosificador de coagulante y floculante, tanque presurizado.

Cuadro 4. Comparación de precios y características de ambos fabricantes.

Características	YiMei Environment Project Co	Jinwantong Environmental Science And Technology Co
Capacidad entrada (m ³ /h)	80	35
Recirculación (m ³ /h)	0	70
Tamaño (m)	11.7 x 2.2 x 2.5	11.7 x 2.15 x 2.5
Material	ss304	316L
Tanque presurizado (m)	Φ 0.8 x 1.8	Φ 0.3 x 2.2
Bomba de recirculación (kW)	22	15
Tuberías (mm)	DN100	DN150
Rasquetas (kW)	0.75	0.55
Compresor de aire (kW)	7.5	3
Costo 2 DAF:	\$ 108,734.00	\$ 179,833.00
Costo Deshidratador lodos	\$ 35,760.00	\$ 53,333.00
Costo con transporte a Costa Rica	\$ 165,494.00	\$ 253,266.00

Entre ambos equipos cotizados, la recomendación técnica sería optar por el de la compañía Jinwantong, porque comprenden a profundidad los requerimientos del proceso de beneficiado de café y están dispuestos a hacer las modificaciones pertinentes, elaboraron la propuesta basada en necesidades técnicas especializadas, la atención al cliente fue mejor con profesiones técnicos brindando el servicio y

además utilizan un material mucho más resistente (aspecto de suma importancia para el tipo de agua residual con el que se trata). Las demás características de diseño consideradas por Jinwantong como tamaño de tubería y rasquetas no son críticas para la toma de decisión, excepto por el precio elevado y el tanque presurizado, el cual si se necesita dimensionarlo acorde a los requerimientos calculados en el Cuadro 2. Por lo tanto, se debe dejar a criterio de la empresa cual le parece una opción más adecuada.

6.3. Escenarios financieros

A la hora de comparar tasas de interés, se contemplaron 2 escenarios, el primero con un banco estatal (Banco de Costa Rica) y el segundo con un banco privado (BAC San José). El BCR solamente ofrece tasas para compra de equipo directamente, mientras que el BAC ofrece venta directa o leasing.

El leasing es una opción de tipo “renta” del equipo con el fin de no tener que comprar el equipo de una sola vez inicialmente, sino que se vaya probando durante el tiempo su rendimiento y así poder evidenciar si realmente la empresa desea o no comprar el activo. El leasing financiero es una opción que permite comprar el equipo al finalizar el periodo del leasing, mientras que el operativo por el contrario no.

De esta forma, se realizó el Cuadro 5 de manera comparativa para evidenciar las formas en las que se puede adquirir el equipo. Cabe resaltar, que para efectos del cálculo, las tasas brindadas por los bancos son de vehículos nuevos, ya que esta es la categoría que aplica en compra de equipo según información brindada por la entidad bancaria de manera presencial. Se consideró un plazo máximo de 8 años de financiamiento que es lo recomendable por la entidad bancaria, ya que por motivos de depreciación no se puede realizar a más tiempo. La vida útil de un activo de

acuerdo con las métricas de las instituciones bancarias puede rondar los 8 años a 10 años.

Cuadro 5. Escenarios financieros para la compra del equipo DAF según cada entidad bancaria.

Característica	Banco de Costa		BAC San José
	Rica		
Tipo de crédito	Prendario	Prendario	Leasing financiero
Tasa de interés	5.9% (inicial)	7.40% (inicial)	7.40% (inicial)
	8.5% (variable)	6.25% (variable)	6.25% (variable)
Periodo de tasa fija (meses)	1 - 24	1 - 24	1 - 36
Plazo (años)	8	8	8
Porcentaje de prima (%)	20	20	20
Cuota mensual para el equipo de Jinwanton (\$)	2621	3460	3581
Cuota mensual para el equipo de YiMei (\$)	1713	2268	2347
Diferencia promedio con respecto al BCR (%)	-	32.2	36.8

Nota: Toda la información obtenida se recopiló de manera personal debido a que en

la página web de las entidades bancarias no se especificaban las tasas de interés.

Como se muestra en el Cuadro 5, las tasas de interés son variables en todos los escenarios. El BCR, al ser un banco del estado, proporciona mejor financiamiento por lo que es la opción que se podría preferir dado que es la más favorable en términos del monto de las cuotas a pagar, sin embargo, debe considerarse que este pago debe hacerse total, no brindan opción de leasing en donde luego pueda renovarse el equipo.

Por otro lado, la opción del banco privado se muestra que ambas poseen un interés superior y en el caso del leasing se obtiene el interés más alto, con una tasa de hasta 8% fija durante 3 años. Esto significa que el leasing a pesar de ser una opción económicamente más cara, tiene la ventaja de que cada cierto tiempo el equipo podría renovarse o volverse a comprar otro con características necesarias. Si por alguna razón, el equipo que se adquiere a pesar de que se está diseñando todo a la medida no es funcional por motivos de aumento de caudal, corrosión del material o cualquier incidente que pueda ocurrir se podría cambiar por otro sin necesidad de tener que cancelar la totalidad de la deuda y volver a pagar por otro equipo desde cero.

En todos los escenarios se debe aportar una inversión inicial del 20% del equipo, esto debido a que así se establecen las condiciones por las entidades bancarias, por lo que este no es un punto para negociar entre ambas partes.

Se recomienda optar por el escenario del leasing, esto por motivos de que a pesar de que se paga más dinero, se tiene la opción de renovar el equipo en un corto tiempo sin deuda alguna que pueda quedar pendiente, lo cual permite ampliar la plata de tratamiento sin tener que realizar otra inversión desde cero, mientras que si se compra directamente el equipo, se adquiere la deuda de toda la inversión y esta

debe cancelarse se cambie de equipo o no.

Cabe resaltar, que aspectos de equipos siempre requieren de un adecuado mantenimiento que prologue su vida útil, aunque el fabricante mencione que la vida útil es 10 años, se debe contemplar que esto depende del uso que se le dé al equipo

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 7.1. El DAF piloto permitió conocer la eficiencia que podría tener un equipo de estos con un porcentaje promedio de 91.5% de remoción de sólidos suspendidos totales, esta información fue de utilidad para dimensionar una propuesta de diseño de un DAF con un caudal necesario de 33.5 m³/h.
- 7.2. Se encontró que la eficiencia de remoción de DQO para el DAF piloto fue desde los 23.7 % hasta 57.4 % siendo este último valor el mes de octubre, donde la cosecha aumentó.
- 7.3. El pH en una planta de tratamiento se considera un parámetro de poca variación, siempre mantuvo un rango de 3 – 4 en operaciones posteriores al equalizador. Como se mostró en ambos escenarios de cosecha, el pH no se veía afectado significativamente con la presencia del DAF piloto.
- 7.4. El diseño propuesto para el DAF se dividió en dos equipos por motivos de transporte, además de que se decidió instalar de forma paralela para que ambos funcionen simultáneamente, y en caso de que uno falle el otro pueda continuar abasteciendo la planta de tratamiento de aguas. Las dimensiones planteadas para cada equipo son de 11.7 m de largo, 2.4 m de ancho y 2.2 m de alto.
- 7.5. El DAF propuesto, posee un caudal de inicio de 17 m³/h con una recirculación de al menos 400% para así asegurar el buen rendimiento del equipo. Asimismo, se diseñó para tratar 15 000 mg/L de sólidos suspendidos totales, ya que este fue el principal valor pico de la cosecha, por lo que se esperaría recibir este tipo de resultados todas las cosechas y hasta mayores, dado que la capacidad

del beneficio con este equipo se incrementa exponencialmente.

- 7.6. Se concluye que se proyecta un aumento en el 50 % de la capacidad del beneficio, con posibilidad de extenderse para los meses de menor cantidad de cosecha, esto permite un mejor desarrollo económico de la empresa y por ende un beneficio para su estabilidad en el mercado.
- 7.7. Es recomendable para la empresa procesadora de café optar por personal más capacitado o ya sea capacitar al personal actual en temas relacionados a la operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas, esto con el fin de asegurar un adecuado funcionamiento de la PTAR y la toma adecuada de parámetros que permitan tener un análisis oportuno del agua residual.
- 7.8. Establecer un control más estricto sobre la toma de datos es de suma importancia considerarlo como recomendación para la empresa beneficiadora de café, se sugiere digitalizar en el momento todos los parámetros que se van tomando con el fin de no perder información valiosa para el análisis del agua residual.
- 7.9. Se recomienda optar por la opción de financiamiento mediante leasing por motivos de que si se desea renovar el equipo esto se pueda llevar a cabo en al menos 3 años, de esta forma no se dependería de un crédito que debe cancelarse hasta el final para poder vender el equipo y recuperar inversión.
- 7.10. Se recomienda realizar un estudio de prefactibilidad para aprovechar la energía proveniente de los lodos en biogás, esto a pesar de que puede ser un proceso costoso inicialmente a su vez puede traer beneficios a la empresa en términos monetarios y de aprovechamiento de energía para un futuro.

NOMENCLATURA

Mayúsculas

A	Ancho, m.
A _s	Área superficial, m ² .
C _s	Carga superficial, m ³ /m ² *día.
C _L	Solubilidad atmosférica, mL/L.
C _t	Solubilidad presión operación, mL/L.
C	Solubilidad saturación aire, mL/L.
K	Aire liberado, mL/L.
P _t	Presión de operación, mmHg.
P _v	Presión de vapor, mmHg.
P _l	Presión atmosférica, mmHg.
Q	Flujo, m ³ /h.
Q _r	Flujo de recirculación, m ³ /h.
S _f	Sólidos suspendidos finales, mg/L.
S _o	Sólidos suspendidos iniciales, mg/L.
U	Relación aire/sólidos, adim.
V	Volumen, m ³ .

Minúsculas

d	Diámetro, m.
f	Factor de seguridad
f _a	Fracción aire disuelto, adim.
h	Altura, m.
m	Lodos, kg.
t	Tiempo retención hidráulico, min.

Subíndices

flot	Flotación
------	-----------

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, D. (2014). *Diseño de un sistema de flotación por aire disuelto (F.A.D) para mejorar la calidad del agua residual de la industria láctea el ordeño y la corpabe* [Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8646/3/CD-5816.pdf>
- Aguilar, M. I., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. F. (2002). *Tratamiento Físico-Químico de aguas residuales: Coagulación - Flocculación* (1st ed.). Universidad de Murcia.
https://books.google.com.pe/books?id=8v1QBXPvhAUC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Aprobación de sistemas de tratamiento de aguas residuales Decreto No 39887-S-MINAE, (2016).
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=82487
- Cabildo Miranda, M. P., Claramunt, R., Cornago, M. P., Escolástico, C., Santos, S., Farrán, M. A., García, M. A., López, C., Pérez, J., Pérez, M., Gutiérrez, M. D., & Sanz, D. (2008). *Reciclado y tratamiento de residuos* (1st ed.). UNED.
<https://www.facebook.com/pages/Interfase->
- Campos, R. C., Pinto, V. R. A., Melo, L. F., Rocha, S. J. S. S. da, & Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. *Future Foods*, 4.
<https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- Díaz, M., Rivas, L., Fernández, D., Salazar, D., Miller, S., & la Maza, N. (2017). Selección de programa químico de tratamiento para aguas residuales oleosas. *Revista Centro Azúcar*, 44, 89–100.

<http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v44n2/caz10217.pdf>

Fanaie, V. R., Khiadani, M., & Ayres, T. (2019). Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry (PIV). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 575, 382–390. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2019.05.027>

Informe sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica. (2021). *Instituto Del Café de Costa Rica (ICAFFE)*. http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/Informe%20Actividad%20Cafetalera.pdf

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). (2015). *Glosario de Conceptos*. <https://www.aya.go.cr/ASADAS/documentacionAsadas/Glosario%20Formulario%20Unificado.pdf>

ISA. (2023). *FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)*. [https://isa.ec/flotacion-por-aire-disuelto-daf/#:~:text=El%20DAF%20se%20puede%20utilizar,de%2020%20a%2050%25\)](https://isa.ec/flotacion-por-aire-disuelto-daf/#:~:text=El%20DAF%20se%20puede%20utilizar,de%2020%20a%2050%25))

Lopez-Vazquez, C. M., Méndez, G. B., Carrillo, F. J. Cervantes., & García, H. A. H. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. IWA Publishing.

Maria, R., & Graterol, N. (2015). Diseño de una unidad de flotación con aire disuelto para la remoción de contaminantes de las aguas residuales generadas en una empresa manufacturera. *Revista Digital de Investigación y Postgrado de La Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre,”* 5(2),

- 777–796. <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve><http://redip.bqto.unexpo.edu.ve>.
- Méndez, J. M., Jiménez, B., & Salgado, G. (2002). Efecto del amoníaco en la estabilización alcalina de lodos residuales. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 1–8. <https://www.semanticscholar.org/paper/Efecto-del-amoniaco-en-la-estabilizaci%C3%B3n-alcalina-Contreras-Cisneros/64ab57298e8f34b16ec63c0e22bcd55948bc173c>
- Nikuni America. (2019). *KTM Bombas de microburbujas*. <http://www.nikuniamerica.com/spanish/s-daf>
- Pal, P. (2017). Industrial Water Treatment Process Technology. In *Industrial Water Treatment Process Technology*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810391-3.00001-1>
- Partner S.A. (2018). *Flotación por aire disuelto DAF*. <https://partnersa.cl/wp-content/uploads/2018/05/decant7.gif>
- Penagos Hermanos & Cía. S.A.S. (2020). *Manual técnico Ecoline 800*. https://www.mayeca.com/img/productos/pdfs/MANUAL_TECNICO_ECO_800.pdf
- Pimiento, K., & Cárdenas, M. J. (2020). Evaluación del tratamiento preliminar y primario para las aguas residuales del procesamiento industrial de alimentos en La Grita (Venezuela). *INGE CUC*, 17(1). <https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.01>
- Puerta-Quintero, G. I. (2000). Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. *Cenicafé*, 276, 1–8. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/561/1/avt0276.pdf>
- Quintero, J. J. G., Méndez, C. D. N., & Vianchá Sánchez, Z. (2017). Análisis de

buenas prácticas en el proceso de beneficio del café: experiencia de estudio en el municipio de Viotá (Cundinamarca, Colombia). *Ingeniería Solidaria*, 13(22), 121–136. <https://doi.org/10.16925/in.v13i22.1839>

Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601, (2006). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524

Reglamento para la producción industrialización y comercialización del café sostenible N° 30938-MAG, (2002). <http://www.mag.go.cr/legislacion/2003/de-30938.pdf>

Sainz, J. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. (1st ed.). Fundación EOI. <https://books.google.co.ve/books?id=r9aK7UttDU8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q=daf&f=false>

Soto, C. (2010). *Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen*. IICA. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/14124/BVE21011258e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Teamb S.A. (2019). *Sistema de aireación por aire disuelto (DAF)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://teamb.com.mx/wp-content/uploads/2019/07/SISTEMA-DAF.pdf>

Varnero, M. T. (2011). *Manual de biogás*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

APÉNDICES

APÉNDICE A: RESULTADOS

A.1. Cuadro de datos

Cuadro A 1. Cotización de ambos proveedores para la compra del equipo.

Características	YiMei Environment Project Co	Jinwantong Environmental Science And Technology Co
Capacidad entrada (m ³ /h)	80	35
Recirculación (m ³ /h)	0	70
Tamaño (m)	11.7 x 2.2 x 2.5	11.7 x 2.15 x 2.5
Material	ss304	316L
Tanque presurizado (m)	Φ 0.8 x 1.8	Φ 0.3 x 2.2
Bomba de recirculación (kW)	22	15
Tuberías (mm)	DN100	DN150
Rasquetas (kW)	0.75	0.55
Compresor de aire (kW)	7.5	3
Costo 2 DAF:	\$ 108,734.00	\$ 179,833.00
Costo Deshidratador lodos	\$ 35,760.00	\$ 53,333.00
Costo con transporte a Costa Rica	\$ 165,494.00	\$ 253,266.00

Cuadro A 2. Datos recopilados de entidades financieras para el costo de la inversión del equipo.

Característica	Banco de Costa		BAC San José
	Rica		
Tipo de crédito	Prendario	Prendario	Leasing financiero
Tasa de interés	5.9% (inicial)	7.40% (inicial)	7.40% (inicial)
	8.5% (variable)	6.25% (variable)	6.25% (variable)
Periodo de tasa fija (meses)	1 - 24	1 - 24	1 - 36
Plazo (años)	8	8	8
Porcentaje de prima (%)	20	20	20
Cuota mensual para el equipo de Jinwanton (\$)	2621	3460	3581
Cuota mensual para el equipo de YiMei (\$)	1713	2268	2347
Diferencia promedio con respecto al BCR (%)	-	32.2	36.8

Cuadro A 3. Resultados obtenidos de los parámetros más importantes del DAF y las principales dimensiones del equipo.

Parámetro	Valor	Referencia
Solubilidad a presión de operación (mL aire/L agua)	107.45	Ecuación A.1.
Solubilidad a presión atmosférica (mL aire/L agua)	14.83	Ecuación A.1.
Cantidad de aire liberado (mL aire/L agua)	95.02	Ecuación A.3.
Cantidad de lodo máximo (kg/h)	459.8	Ecuación A.4.
Área superficial del tanque flotación (m ²)	25.77	Ecuación A.5.
Fracción de aire disuelto a presión de operación	1.04	Ecuación A.2.
Dimensiones del equipo		
V prisma rectangular (m ³)	125.62	Ecuación A.6.
Ancho prisma rectangular (m)	4.87	Ecuación A.7.
Altura prisma rectangular (m)	2.20	Altura permitida en contenedor 40 ft.
Largo prisma rectangular (m)	11.7	Ecuación A.8.
Largo cámara de floculación y coagulación con respecto al largo del prisma (%)	12.7	
Largo cámara de burbujas con respecto al largo del prisma (%)	8.85	
Largo entre la cámara de burbujas y el inicio de las rasquetas con respecto al prisma (%)	9.6	
Largo de las rasquetas con respecto al largo del prisma (%)	59.6	
Largo de la abertura de lodos con respecto al prisma (%)	3.85	(Jinwantong, 2022)
Profundidad de la cámara de lodos con respecto a la altura del prisma (%)	39.47	
Profundidad de la división del efluente con respecto a la altura del prisma (%)	73.68	
Largo cámara del efluente con respecto al largo del prisma (%)	5.77	

Cuadro A 3 (Continuación). Resultados obtenidos de los parámetros más importantes del DAF y las principales dimensiones del equipo.

Parámetro	Valor	Referencia
Largo de cada pirámide con respecto al largo del prisma (%)	36.5	(Jinwantong, 2022)
Altura pirámide (m)	0.300	Altura permitida en contenedor 40 ft.
V pirámide (m ³)	2.09	Ecuación A.9.
V total cámara de flotación (m ³)	129.8	Ecuación A.10.
Recirculación (m ³ /h)	134	Ecuación A.11.
V tanque presurizado (m ³)	6.70	Ecuación A.6.
Relación diámetro/altura del tanque presurizado	0.44	(YiMei, 2022)
Diámetro del tanque presurizado (m)	1.56	Ecuación A.13.
Altura tanque presurizado (m)	3.51	Ecuación A.12.

Cuadro A 4. Resultados obtenidos del dimensionamiento ajustado del DAF.

Parámetro	Valor	Referencia
V prisma rectangular (m ³)	62.81	Ecuación A.6.
Ancho prisma rectangular (m)	2.44	Ecuación A.7.
Altura prisma rectangular (m)	2.20	Altura permitida en contenedor 40 ft.
Largo prisma rectangular (m)	11.71	Ecuación A.8.
Altura pirámide (m)	0.300	Altura permitida en contenedor 40 ft.
V pirámide (m ³)	1.04	Ecuación A.9.
V total cámara de flotación (m ³)	64.9	Ecuación A.10.
Recirculación (m ³ /h)	67.0	Ecuación A.11.
V tanque presurizado (m ³)	3.35	Ecuación A.6.
Diámetro del tanque presurizado (m)	1.24	Ecuación A.13.
Altura tanque presurizado (m)	2.79	Ecuación A.12.

A.3. Figuras de tendencia

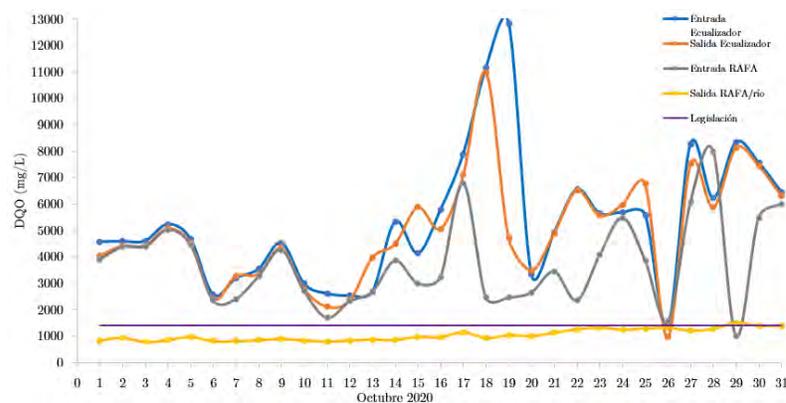


Figura A 1. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2020, cosecha 2020 – 2021.

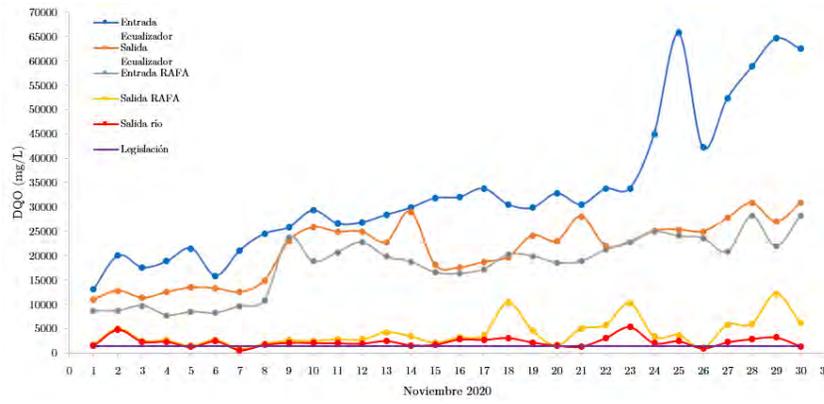


Figura A 2. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2020, cosecha 2020 – 2021.

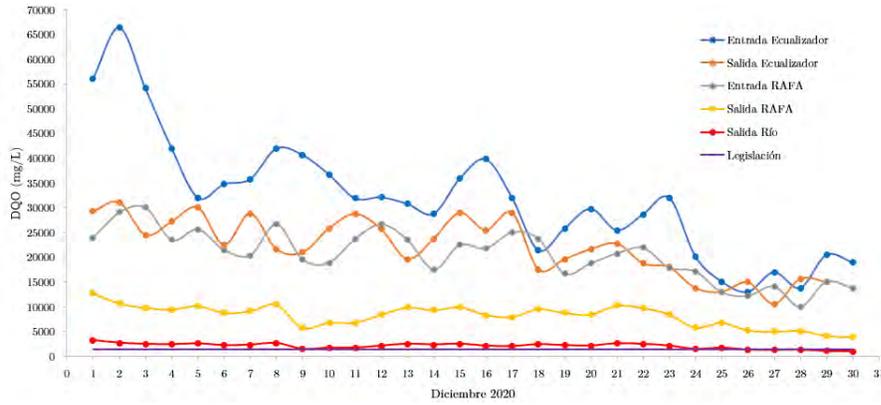


Figura A 3. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2020, cosecha 2020 – 2021.

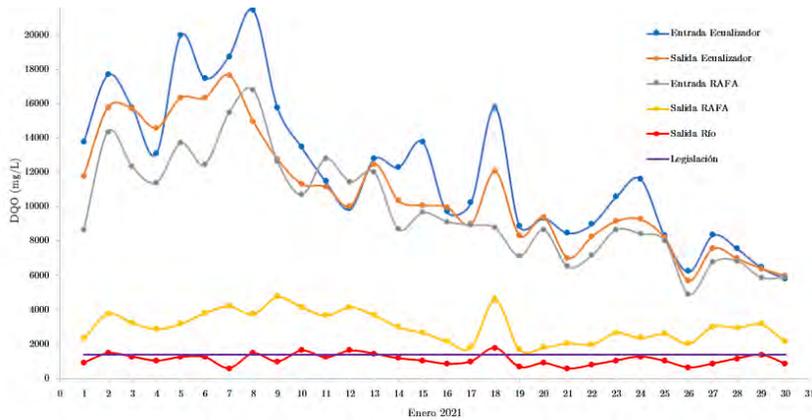


Figura A 4. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2021, cosecha 2020 – 2021.

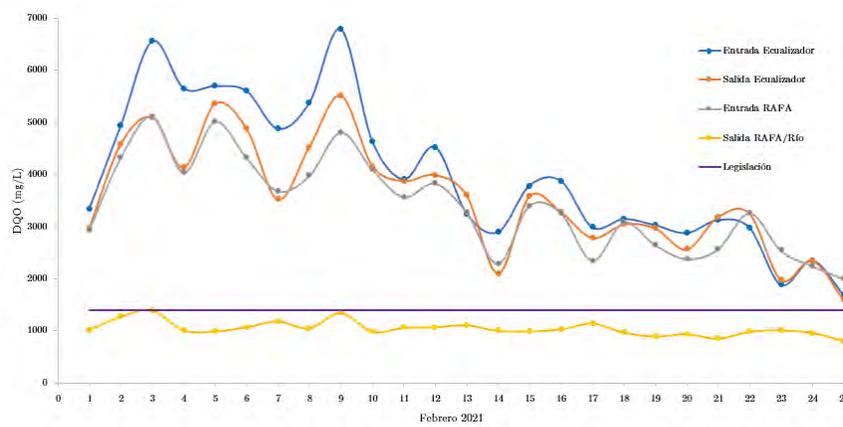


Figura A 5. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2021, cosecha 2020 – 2021.

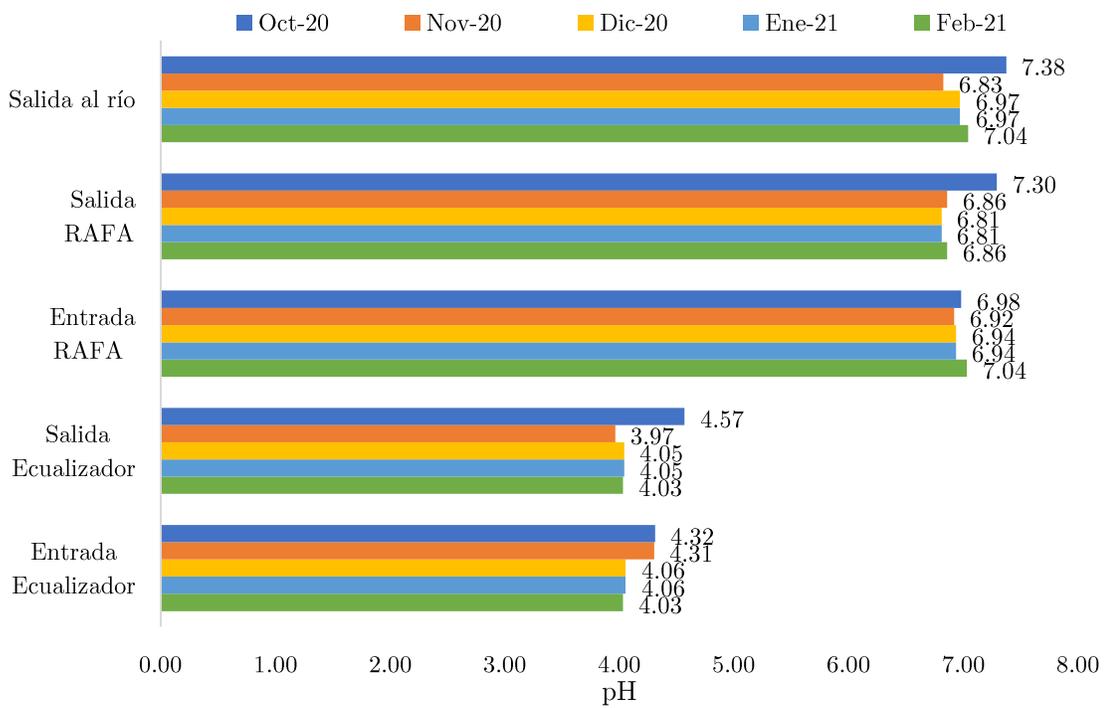


Figura A 6. Comportamiento del pH en promedio por cada mes de cosecha 2020 – 2021.

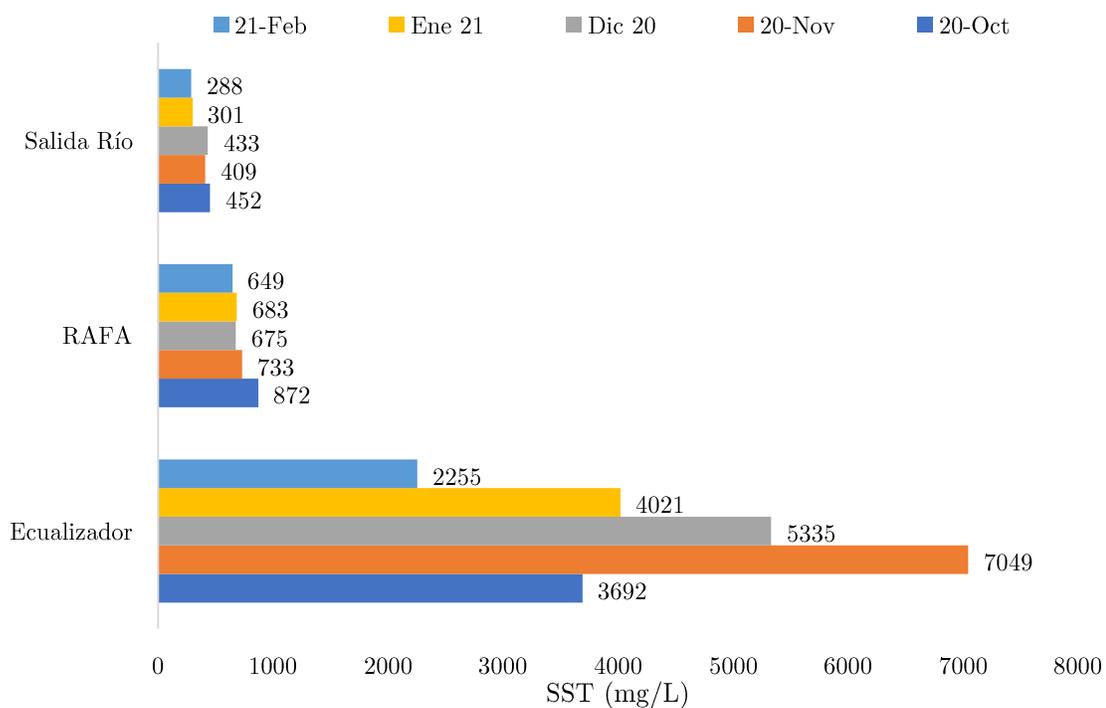


Figura A 7. Comportamiento del promedio de SST durante la cosecha 2020 – 2021.

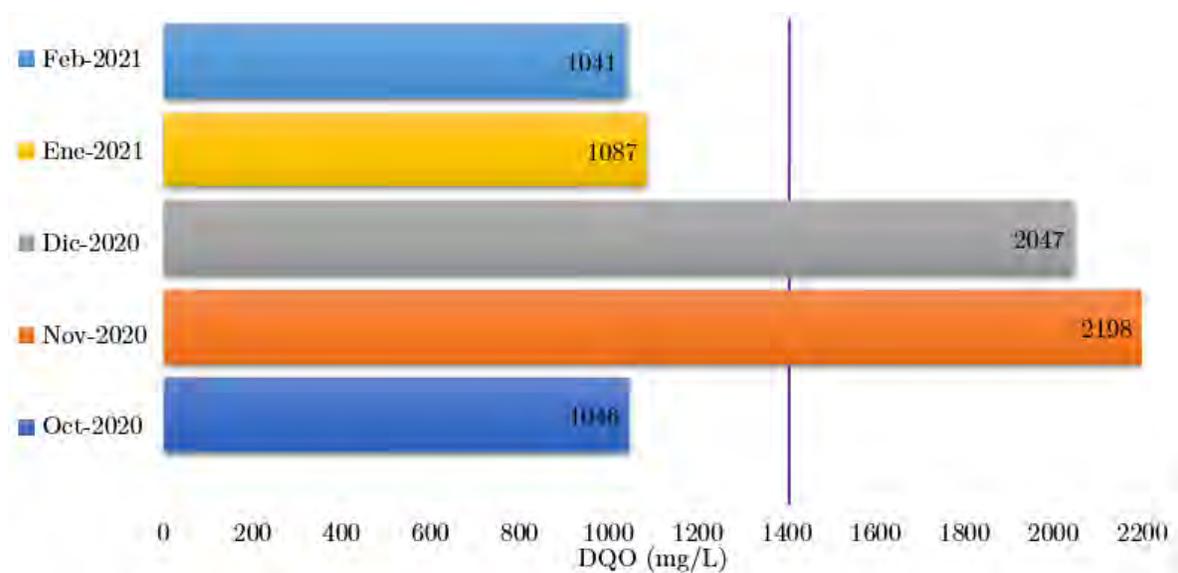


Figura A 8. Promedio de valores de DQO vertidos en cuerpo receptor en comparación con la legislación actual para la cosecha 2020 – 2021.

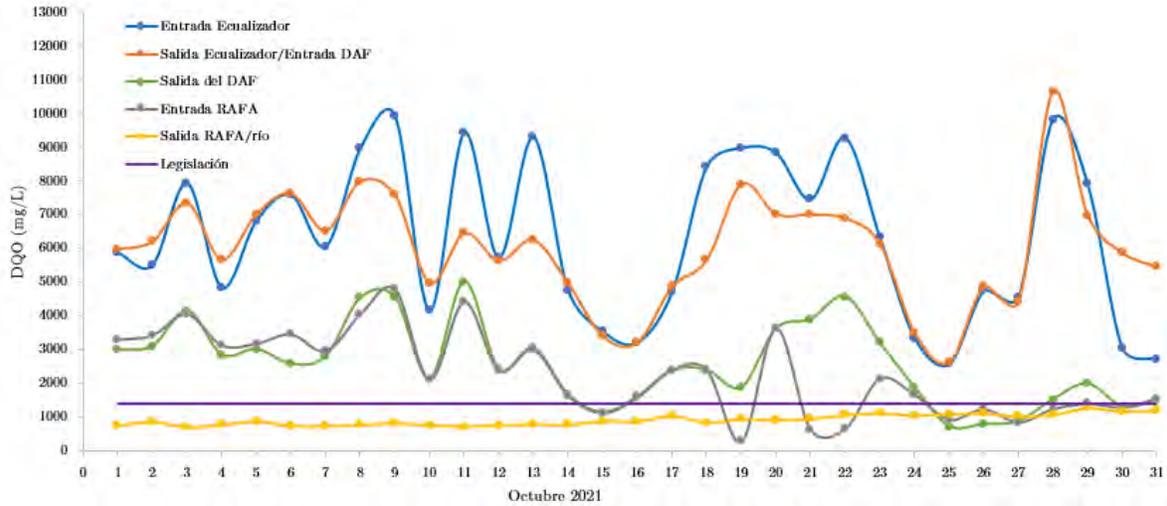


Figura A 9. Comportamiento del DQO para el mes de octubre 2021, cosecha 2021 – 2022.

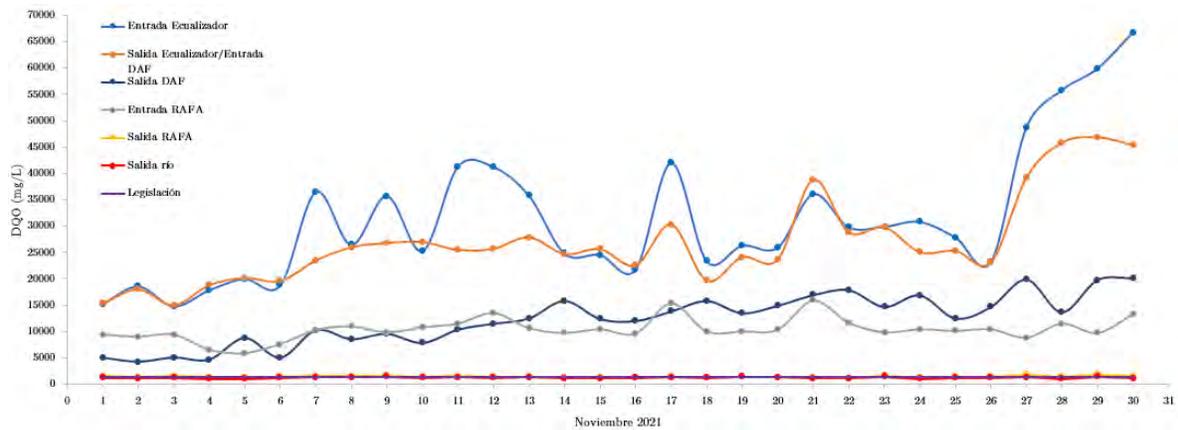


Figura A 10. Comportamiento del DQO para el mes de noviembre 2021, cosecha 2021 – 2022.

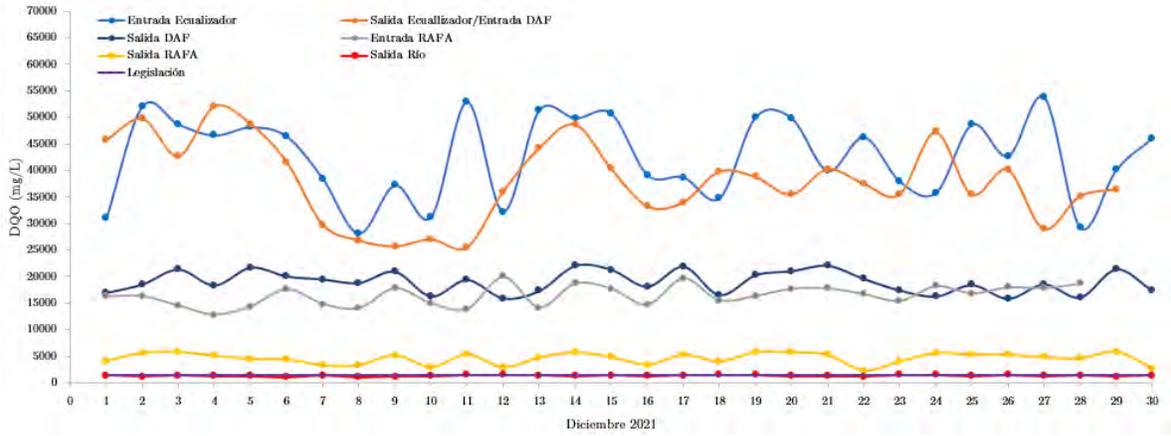


Figura A 11. Comportamiento del DQO para el mes de diciembre 2021, cosecha 2021 – 2022.

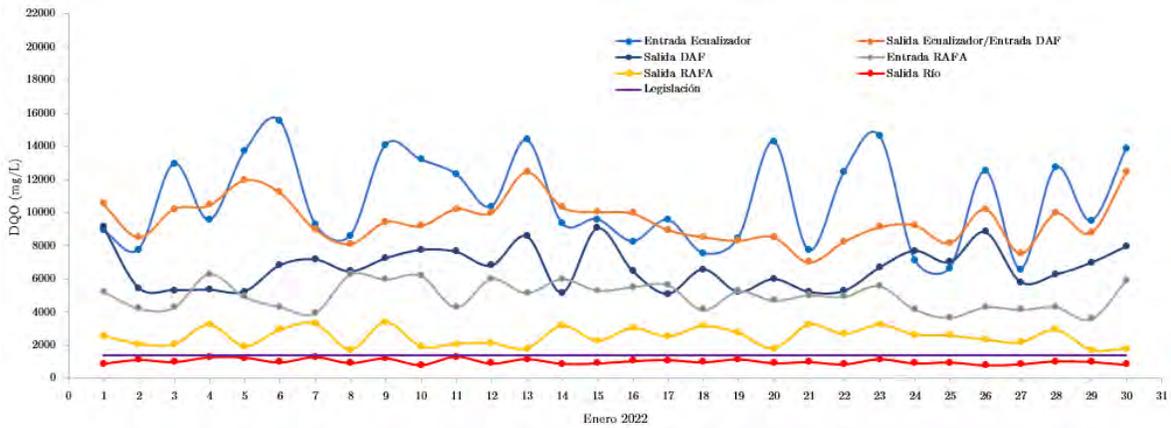


Figura A 12. Comportamiento del DQO para el mes de enero 2022, cosecha 2021 – 2022.

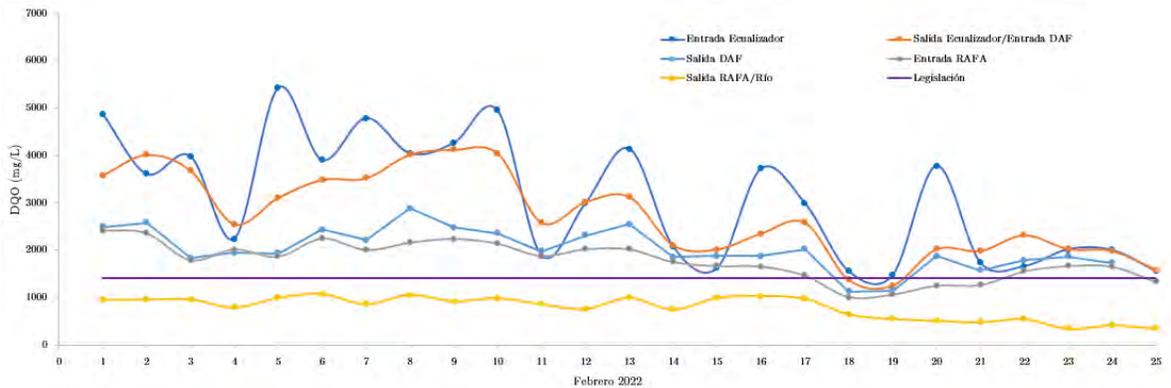


Figura A 13. Comportamiento del DQO para el mes de febrero 2022, cosecha 2021

– 2022.

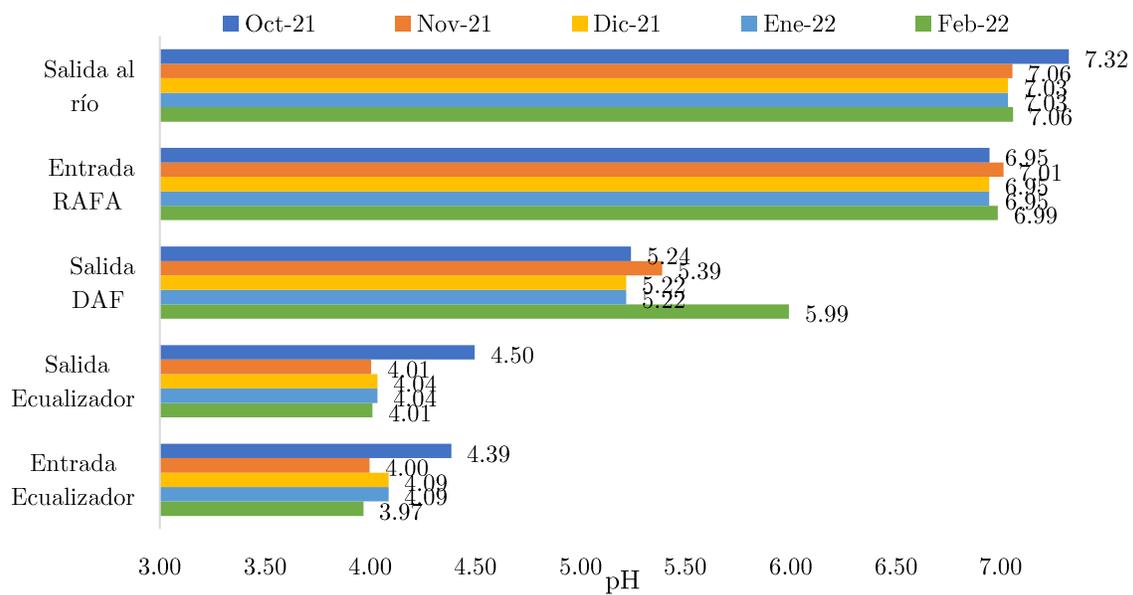


Figura A 14. Comportamiento del promedio de pH para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.

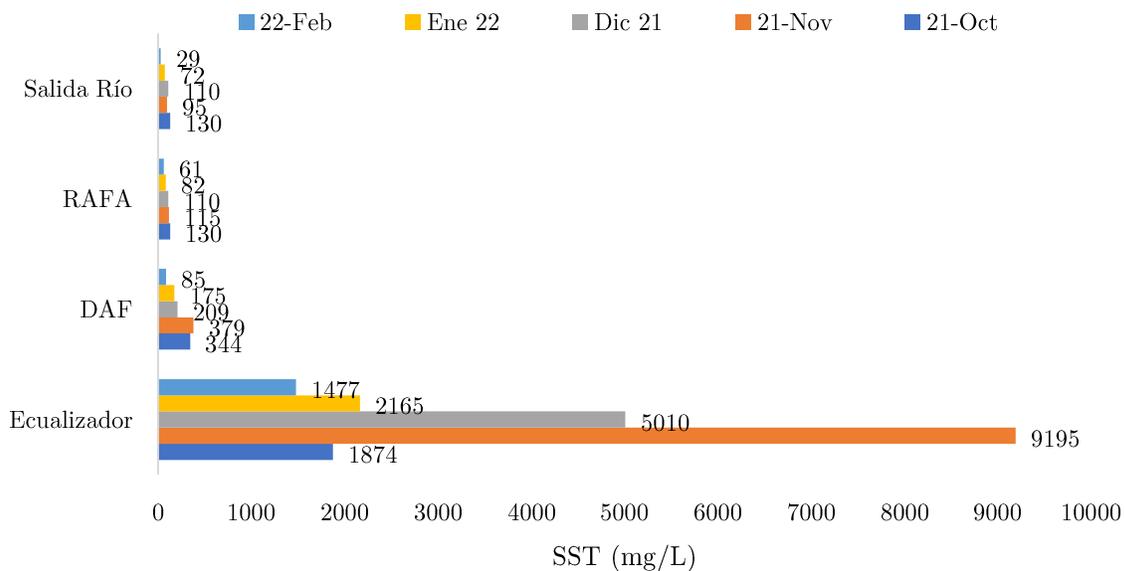


Figura A 15. Comportamiento del promedio de SST para la cosecha 2021 – 2022 al implementar el DAF.

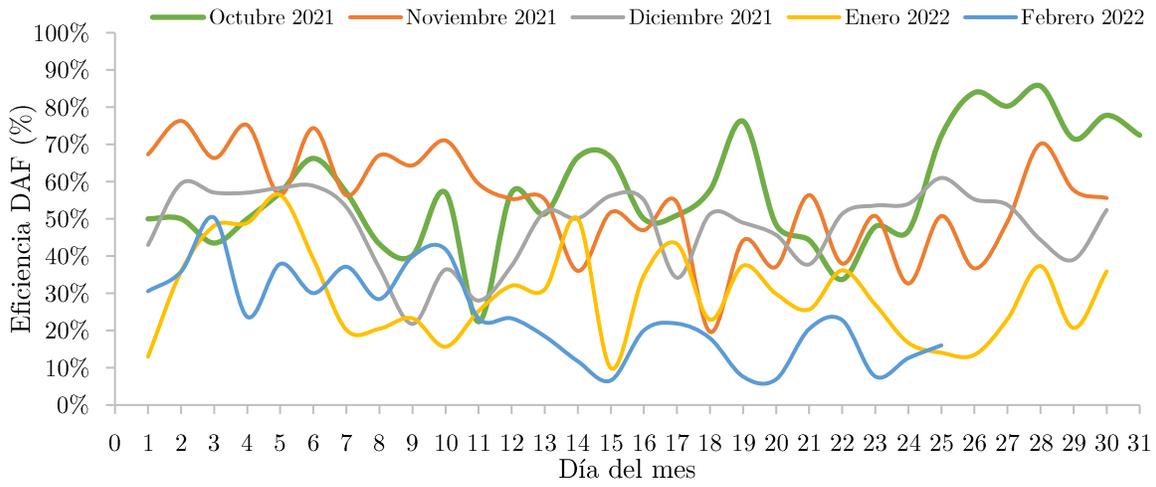


Figura A 16. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir del DQO para la cosecha 2021-2022.

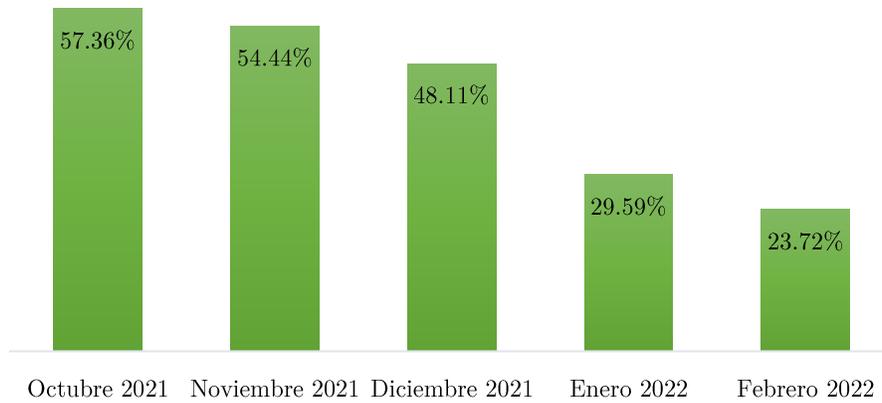


Figura A 17. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir del DQO para la cosecha 2021 – 2022.

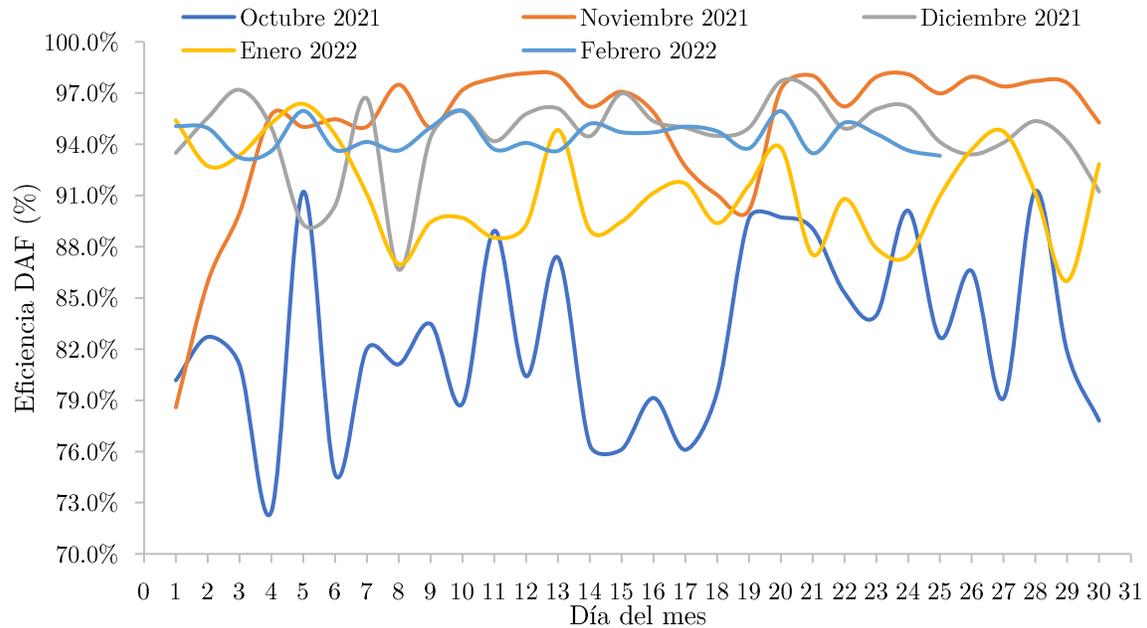


Figura A 18. Comportamiento gráfico de la eficiencia a partir de los SST para la cosecha 2021-2022.

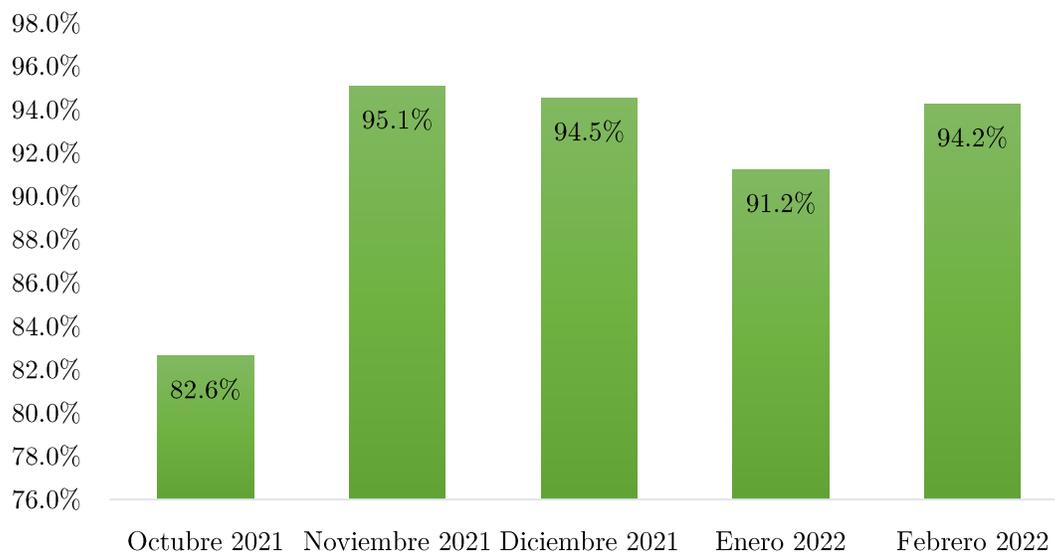


Figura A 19. Comportamiento del promedio de las eficiencias a partir de los SST para la cosecha 2021 – 2022.

EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO PRIMARIO

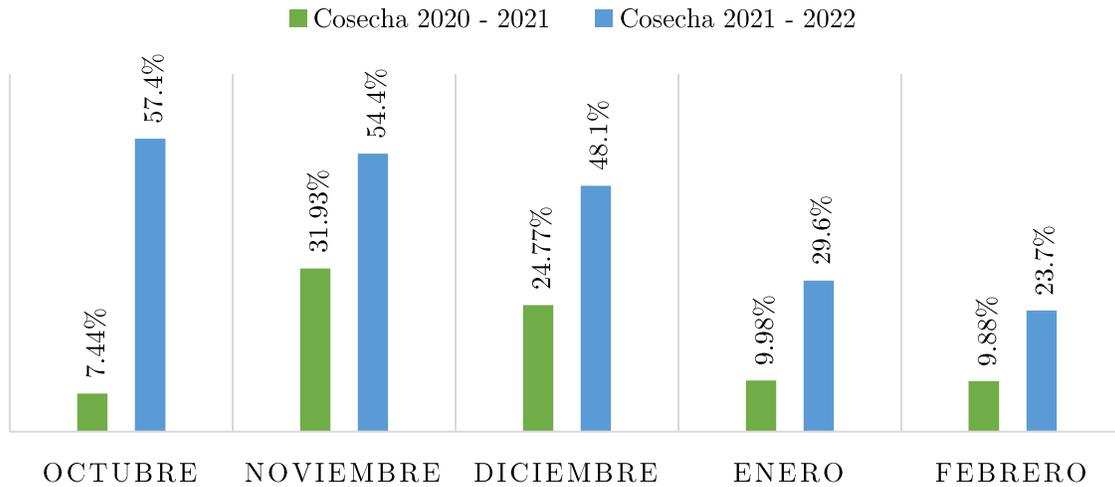


Figura A 20. Eficiencia comparativa entre ambas cosechas del tratamiento primario a partir del DQO.

APÉNDICE B: MUESTRA DE CÁLCULO

B.1. Cálculo de la solubilidad a la presión de operación.

Para el cálculo de la solubilidad a la presión de operación, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$C_t = \frac{C * (P_t - P_v)}{(760 - P_v)} \quad (\text{A.1})$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro 1, columna 2, filas 5, 10 y 11:

$$C_t = \frac{17.1 \text{ mL/L} * (4650 - 23.8) \text{ mmHg}}{(760 - 23.8) \text{ mmHg}} = 107.45 \text{ (mL/L)}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 2. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la solubilidad a presión atmosférica

tabulada en el Cuadro A.3, columna 2, fila 3.

A.2. Cálculo de la fracción de aire disuelto a presión de operación.

Para el cálculo de la fracción de aire disuelto a la presión de operación, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$fa = \frac{U * So * Q * (760 - Pv)}{C * d * Qr * (Pt - Pv - Pl - Pv)} \quad (A.2)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro 1, columna 2, filas 2, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14 y Cuadro A.3, columna 2, fila 16:

$$\begin{aligned} fa &= \frac{0.03mL/L * 15000 \text{ mg/L} * 33.5m^3/h * (760 - 23.8)mmHg}{17.1 \frac{mL}{L} * 1.18 \frac{mg}{L} * 134m^3/h * (4650 - 23.8 - 662.4 - 23.8)mmHg} \\ &= 1.04 \end{aligned}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 7.

A.3. Cálculo de la cantidad de aire liberado por el DAF.

Para el cálculo de la cantidad de aire liberado, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$K = \frac{C * fa * (Pt - Pv - Pl - Pv)}{(760 - Pv)} \quad (A.3)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro 1, columna 2, filas 5, 10, 11,

12 y Cuadro A.3, columna 2, fila 7:

$$K = \frac{17.1 \text{ mL/L} * 1.04 * (4650 - 23.8 - 662.4 - 23.8) \text{ mmHg}}{(760 - 23.8) \text{ mmHg}}$$

$$= 95.02 \text{ (mL/L)}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 4.

A.4. Cálculo de la cantidad de lodo máximo.

Para el cálculo de la cantidad de lodo máximo, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$m = (S_o - S_f) * Q \quad (\text{A.4})$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro 1, columna 2, filas 14 y 15:

$$m = \left(15000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - \frac{1275 \text{mg}}{\text{L}}\right) * \frac{33.5 \text{m}^3}{\text{h}} = 459.8 \text{ kg/h}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 5.

A.5. Cálculo del área superficial del tanque de flotación.

Para el cálculo del área superficial del tanque de flotación, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$A_s = \frac{Q + Qr}{C_s} \quad (\text{A.5})$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro 1, columna 2, filas 2, 8 y Cuadro A.3, columna 2, fila 16:

$$A_s = \frac{\left(33.5 \frac{m^3}{h} + \frac{134m^3}{h}\right) * 20h/día}{130 \text{ m}^3/\text{m}^2 * día} = 25.8 \text{ m}^2$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 6.

A.6. Cálculo del volumen del prisma rectangular

Para el cálculo del volumen del prisma rectangular, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$V_{prisma} = (Q + Qr) * t_{flot} * f \quad (\text{A.6})$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro 1, columna 2, filas 2, 7, 9 y Cuadro A.3, columna 2, fila 16:

$$V_{prisma} = (33.5 + 134) \frac{m^3}{h} * 30 \text{ min} * 1.5 = 125.6 \text{ m}^3$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 9. De la misma forma se obtiene el volumen del prisma rectangular acoplado a dos DAF solamente que dividiendo entre dos, este se encuentra en el Cuadro A.4,

columna 2, fila 2. Igualmente, para el volumen del tanque presurizado se utiliza la misma ecuación, pero con el flujo de recirculación y un tiempo de retención de 2 min, este resultado se encuentra en el Cuadro A.3, columna 2, fila 10 y Cuadro A.4, columna 2, fila 10.

A.7. Cálculo del ancho del prisma rectangular

Para el cálculo del ancho del prisma rectangular, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$A_{prisma} = \frac{V_{prisma}}{As} \quad (A.7)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro A.3, columna 2, filas 6 y 9:

$$A_{prisma} = \frac{125.6 \text{ m}^3}{25.8 \text{ m}^2} = 4.875 \text{ m}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 10. De la misma forma se obtiene el ancho del prisma rectangular acoplado a dos DAF solamente que dividiendo entre dos, este se encuentra en el Cuadro A.4, columna 2, fila 3.

A.8. Cálculo del largo del prisma rectangular

Para el cálculo del largo del prisma rectangular, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$L_{prisma} = \frac{V_{prisma}}{A_{prisma} * H_{prisma}} \quad (A.8)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro A.3, columna 2, filas 9, 10 y 11:

$$L_{prisma} = \frac{125.6 \text{ m}^3}{4.87 \text{ m} * 2.2 \text{ m}} = 11.7 \text{ m}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 12. De la misma ecuación se obtuvo el cálculo del largo del prisma rectangular mostrado en el Cuadro A.4, columna 2, fila 5.

A.9. Cálculo del volumen de la pirámide

Para el cálculo del volumen de la pirámide, se utiliza la siguiente relación (D. Aguilar, 2014).

$$V_{pirámide} = \frac{A_{prisma} * L_{pirámide} * h_{pirámide}}{3} \quad (A.9)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro A.3, columna 2, filas 10, 12, 21 y 22:

$$V_{pirámide} = \frac{4.87 \text{ m} * (11.7 \text{ m} * 36.5\%) * 0.3 \text{ m}}{3} = 2.09 \text{ m}^3$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 23. De la misma forma se obtiene el resultado para el volumen de la pirámide

acoplado a dos DAF mostrado en el Cuadro A.4, columna 2, fila 7.

A.10. Cálculo del volumen total cámara flotación

Para el cálculo del volumen total de la cámara de flotación, se realiza la siguiente suma:

$$V_{total} = V_{pirámide} * 2 + V_{prisma} \quad (A.10)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro A.3, columna 2, filas 9 y 23:

$$V_{total} = 2.09 \text{ m}^3 * 2 + 125.6 \text{ m}^3 = 129.8 \text{ m}^3$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 24. De la misma forma se obtiene el resultado para el volumen de la pirámide acoplado a dos DAF mostrado en el Cuadro A.4, columna 2, fila 8.

A.11. Cálculo de la recirculación del sistema

Para el cálculo de la recirculación del sistema, se realiza la siguiente multiplicación:

$$Recirculación = Q_{inicial} * Porcentaje \ a \ recircular \quad (A.11)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro 1, columna 2, filas 2 y 7 se obtiene:

$$Recirculación = 670 \frac{m^3}{día} * \frac{1 día}{20 h} * 400 \% = 134 m^3/h$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 25. De la misma forma se obtiene el resultado para la recirculación del sistema acoplado a dos DAF dividiendo el flujo inicial entre dos, este resultado se muestra en el Cuadro A.4, columna 2, fila 9.

A.12. Cálculo de la altura del tanque presurizado

Para el cálculo de la altura del tanque presurizado, se realiza la siguiente ecuación, la cual se deriva de una simple ecuación de volumen de un cilindro y de la relación de diámetro/altura del sistema presurizado:

$$h_{presurizado} = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{presurizado}}{\pi * (Relación\ diámetro/altura)^2}} \quad (A.12)$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro A.3, columna 2, filas 26 y 27 se obtiene:

$$h_{presurizado} = \sqrt[3]{\frac{4 * 6.7 m^3}{\pi * (0.44)^2}} = 3.51 m$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 29. Misma ecuación se utiliza para la altura de los dos DAF, este resultado se encuentra en el Cuadro A.4, columna 2, fila 12.

A.13. Cálculo del diámetro del tanque presurizado

Para el cálculo del diámetro del tanque presurizado, se realiza la siguiente ecuación a partir de la relación de diámetro/altura del sistema presurizado:

$$d_{\text{presurizado}} = 0.44 * h_{\text{presurizado}} \quad (\text{A.13})$$

De esta forma, utilizando los datos del Cuadro A.3, columna 2, filas 27 y 29 se obtiene:

$$d_{\text{presurizado}} = 0.44 * 3.51 \text{ m} = 1.56 \text{ m}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 2, fila 28.

Misma ecuación se utiliza para la altura de los dos DAF, este resultado se encuentra en el Cuadro A.4, columna 2, fila 11.

APÉNDICE B: DIAGRAMA DE FLUJO

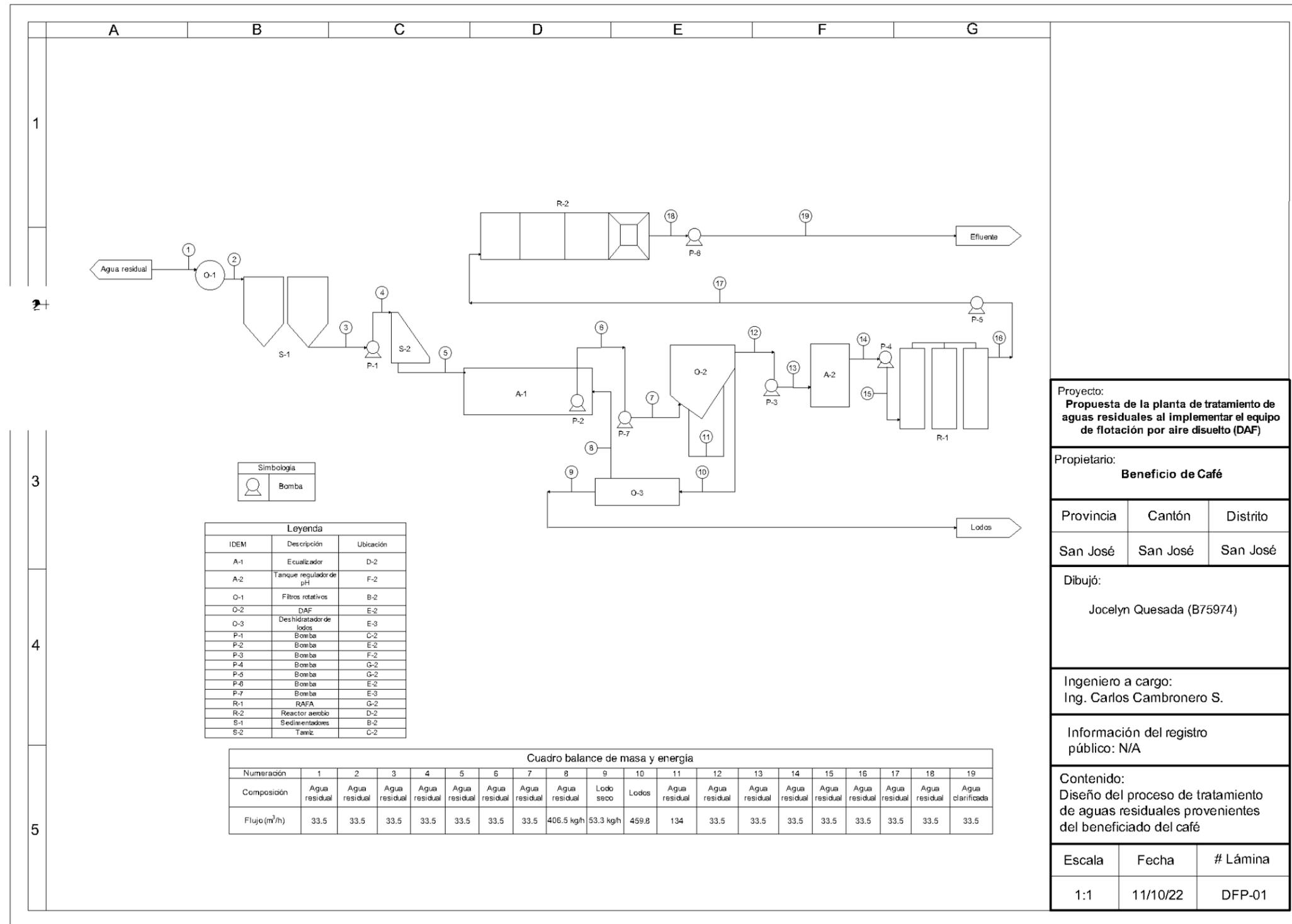


Figura A 21. Diagrama de flujo del proceso de la PTAR.

APÉNDICE C: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO



EMPRESA

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Planta de Tratamiento de Aguas

VERSIÓN 1

REALIZADO POR
Jocelyn Quesada Amaro



Contenido

Introducción	3
Objetivo.....	3
¿Qué hacer en caso de falla?.....	3
Sección de Seguridad	5
Información general sobre peligros.....	5
Equipo de protección	7
Instrucciones importantes	8
Sección de Operación.....	9
Descripción del proceso.....	9
Operación del sistema	10
Operación de las bombas	14
Análisis químico del agua residual	14
Sección de Mantenimiento	15
Descripción de tipos de mantenimientos	15
Intervalos de mantenimientos.....	16
Pasos para seguir en todo proceso de limpieza general	17
Tuberías.....	18
Plan de emergencias	18
Conclusión.....	20

Introducción

El presente Manual de operación y mantenimiento tiene como propósito contar con una guía clara y específica que garantice la óptima operación y desarrollo del sistema de tratamiento de agua residual en la empresa. Comprende en forma ordenada, secuencial y detallada las operaciones de los procedimientos a seguir para cada actividad laboral, promoviendo el buen desarrollo de la planta de tratamiento y asegurando la calidad del agua en el efluente,

Es importante señalar, que este documento está sujeto a actualización en la medida que se presenten variaciones en la ejecución de los procedimientos, en la normatividad establecida, en la estructura orgánica de la empresa, o bien en algún otro aspecto que influya en la operatividad de este, con el fin de cuidar su vigencia operativa.

Por favor tómese el tiempo para leer cuidadosamente este documento para garantizar la operación segura y adecuada de su sistema. Si tuviera alguna pregunta después de leer este documento o si necesita más información, por favor no dude que contactar a nuestra oficina en Costa Rica. De igual forma, si ocurre alguna emergencia, favor comunicarse inmediatamente al 9-1-1, y apenas se pueda, avise al personal a cargo.

Objetivo

Instruir al personal encargado de la gestión de la planta de tratamiento acerca de la adecuada operación y mantenimiento del sistema con el fin de garantizar una operación segura y adecuada para la planta de tratamiento de aguas residuales.

¿Qué hacer en caso de falla?

Ante cualquier eventualidad, tenga a mano el número telefónico del personal

a cargo o bien, debe conocer como encontrar la salida de emergencia más cercana. Al final de este documento, se detalla un plan de emergencia a seguir en caso de alguna eventualidad que requiera desalojar al personal.

Usted deberá también llamar a su supervisor o encargado, si nota alguno de los siguientes eventos:

- ✓ Si los inodoros o algún otro componente del sistema de aguas se obstruyen o se devuelve dentro de la estructura.
- ✓ Olores anormales dentro o alrededor de la estructura, o de cualquier origen del sistema de aguas.
- ✓ Cloaca apareciendo en otras superficies donde no debería salir agua, esto puede indicar que haya alguna fuga en el sistema.
- ✓ Mal funcionamiento o sonido extraño al arrancar una bomba, agitador o compresor de la planta de tratamiento de aguas.
- ✓ Cualquier situación en la que crea conveniente parar el sistema de tratamiento de aguas debe comunicarlo a su superior.

Sección de Seguridad

La sección de seguridad indica las precauciones básicas que deben tenerse a la hora de operar y dar mantenimiento al sistema. Además, se identifican situaciones de peligro y advertencia a tomar en cuenta. Lea y entienda las normas de precaución básicas que aparecen en la sección de seguridad antes de operar, efectuar mantenimiento o reparar el sistema.

La mayoría de los accidentes relacionados con la operación, el mantenimiento o la reparación de la planta se debe a que no se tienen las precauciones y reglas básicas de seguridad. Con frecuencia, se puede evitar un accidente si se reconoce la situación que puede ser peligrosa antes de que ocurra el percance. Todo el personal debe estar alerta a la posibilidad de peligros, Se debe tener la capacitación necesaria, los conocimientos y las herramientas para realizar estas funciones correctamente.

No opere el equipo ni realice ningún trabajo de mantenimiento o reparación hasta que haya leído y entendido toda la información referente a operación y mantenimiento.

Se proporcionan avisos y advertencias de seguridad en este manual y en el producto químico que se requiere para operar la planta y los equipos, como coagulantes y floculantes. Si no se presta atención a estas advertencias de peligro, pueden ocurrir lesiones.

Los peligros se identifican con el “Símbolo de Alerta de Seguridad” seguido por palabras como “PELIGRO”, “ADVERTENCIA” o “PRECAUCIÓN”.

Información general sobre peligros

Por favor lea y siga las precauciones listadas abajo, así como las que se encuentren dentro del Manual del Propietario. Si tiene cualquier pregunta con

respecto a la seguridad u operación de su sistema, por favor contacte a su superior o bien si es una emergencia llame al 9-1-1.

IMPORTANTE: Todo trabajo debe cumplir con los códigos y regulaciones eléctricas, mecánicas y códigos de construcción.



PELIGRO

Siempre desconecte el sistema de alimentación eléctrica antes de dar servicio o mantenimiento a los equipos. No hacerlo puede resultar en un shock eléctrico, causando serias heridas o muerte. Todo trabajo debe cumplir con los códigos de construcción, eléctricos y mecánicos.



PELIGRO

Si tuviera cualquier contacto con agua residual, por favor quítese la ropa contaminada y limpie en forma intensa cualquier área del cuerpo o ropa expuesta con agua y jabón. Para minimizar el peligro de enfermedad consulte con un médico.



ADVERTENCIA

Por favor asegúrese de que todos los equipos que componen el sistema de tratamiento de aguas no sobrepasen los niveles máximos de capacidad, ya que esto puede ocasionar derrames grandes difíciles de controlar.



ADVERTENCIA

Reporte inmediatamente cuando alguna de las bombas no se encuentre funcionando, ya que esta debe remplazarse lo antes posible para no frenar la planta de tratamiento de aguas. Además, el funcionamiento inadecuado de las bombas puede causar derrames en el sistema.



ADVERTENCIA

Por favor asegure un acceso libre al sistema en todo momento; ya que es de suma importancia poder acceder a todo el equipo cuando sea necesario o en caso de que ocurra alguna emergencia.

Equipo de protección

A la hora de realizar la operación y el mantenimiento al sistema, se debe utilizar equipo de protección, esto con el fin de preservar la seguridad de la persona que brinda el servicio de mantenimiento, por esta razón se debe cumplir con lo siguiente:

- ✓ Casco, anteojos de protección y cualquier otro equipo de protección que se requiera.
- ✓ No lleve ropa o artículos de joyería holgados que puedan engancharse en el equipo.
- ✓ Mantenga el sistema libre de material extraño, quite la basura, aceite, herramientas y cualquier artículo de la superficie de los tanques.
- ✓ Utilice guantes a la hora de realizar mantenimiento.
- ✓ Chaleco de seguridad para que la persona sea visible ante los demás.
- ✓ Botas para proteger los pies o zapatos de seguridad es necesario.
- ✓ Identificación visible de la persona, que sea alguien con conocimientos en el mantenimiento y operación del sistema.
- ✓ Cuando trabaje con químicos, trate de utilizar mascarilla, de esta forma se asegura no inhalar vapores que pueden afectar la vía aérea.



Instrucciones importantes

Para asegurarse el mejor rendimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales provenientes del café:

NO utilice o descargue ninguno de los siguientes productos en alguno de los equipos que pertenecen a la planta de tratamiento de aguas:

- ✓ Productos Cáusticos usados para desbloquear las tuberías.
- ✓ Productos a base de petróleo, pinturas, solventes, entre otros.
- ✓ Detergente anti-bacterial.
- ✓ Pesticidas.
- ✓ Efluentes de un sistema de suavizamiento de aguas.
- ✓ Grandes cantidades de productos blanqueadores.
- ✓ Aceite o grasas (automotor o de cocina, entre otros.)
- ✓ Cera o resinas.
- ✓ Productos de tratamiento para tanques Sépticos.
- ✓ Todo tipo de objetos no-biodegradables.



CUIDADO

La descarga de cualquiera de los productos mencionados anteriormente, en el sistema, puede destruir la masa bacteriana del RAFA, responsable del tratamiento secundario del agua; por consiguiente, ocasionar que el sistema no trabaje adecuadamente.

Para el propósito de inspección del sistema por parte del encargado, este debe estar accesible en todo momento. Es responsabilidad del propietario asegurar el acceso a todas las etapas del sistema.

Sección de Operación

En esta sección se incluyen los aspectos mas importantes a tomar en cuenta a la hora de operar el sistema de tratamiento de aguas. Es de carácter obligatorio para el encargado de la operación del sistema leer esta sección detenidamente y realizar las consultas o dudas a su supervisor a cargo.

Descripción del proceso

Se cuenta actualmente con filtros rotativos que permiten eliminar residuos de brosa o demás que se hayan ido por la tubería de agua. Seguidamente, se pasa a unos sedimentadores donde se sedimentan los lodos. Se pasa por un tamiz finalmente para luego descargarse en el equalizador.

Como tratamiento primario se realiza la homogenización de efluentes proveniente del proceso de beneficiado de café. Se considera como un tratamiento primario en las instalaciones de la empresa; sin embargo, debería ser un pretratamiento. En este proceso, se mezclan y homogenizan los efluentes provenientes de todos los procesos productivos que generan aguas residuales que deben tratarse, con esto se logra regular el caudal de las aguas residuales, la carga de sólidos en suspensión y el DQO. Para llevar a cabo esta operación se utiliza un tanque homogeneizador o equalizador con aireación constante.

Luego del homogeneizador, se tienen dos equipos encargados de la parte biológica del sistema. Un reactor anaerobio y otro aerobio. El reactor anaerobio se caracteriza por no tener participación de oxígeno en su interior, ya que las bacterias que se reproducen para eliminar la materia orgánica no lo requieren. Se utilizan microorganismos mesófilos en este reactor, los cuales son responsables de desintegrar

la materia orgánica presente en el agua residual. Algunas veces se utiliza cal en el proceso para controlar el pH y que este sea cercano a neutro; sin embargo, no es un proceso habitual.

Además del reactor anaerobio, se tiene un sistema aerobio, en este tratamiento la materia orgánica se degrada y se oxida en especies inorgánicas originando a su vez nuevos microorganismos. Este sistema involucra 3 secciones, en donde el agua pasa primero a través de la primera y por gravedad baja a la siguiente hasta llegar a la última. Este sistema tiene dos aireadores por sección excepto por la última que no posee ninguno. El sistema aireado solamente se utiliza en picos altos de cosecha según disposiciones mencionadas por el personal de la empresa.

A continuación, se muestra en la siguiente Figura 1 las diversas partes del sistema con las respectivas secciones.

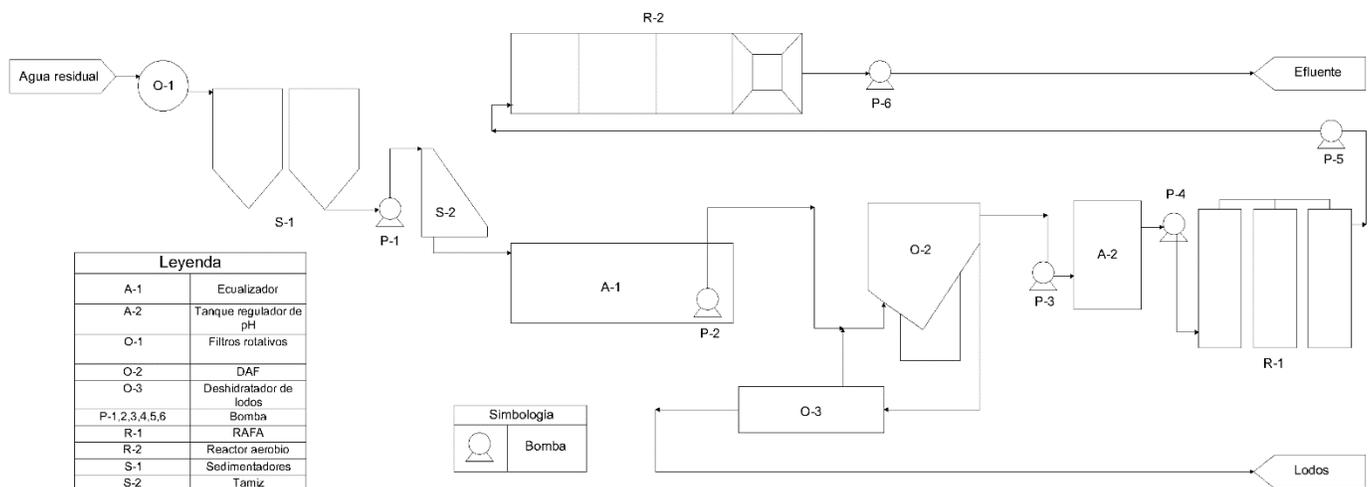


Figura 1. Descripción del sistema de tratamiento de aguas en la empresa (Elaboración propia).

Operación del sistema

La planta de tratamiento de aguas de la empresa requiere de al menos 3 operarios que tengan conocimiento en la operación de sistemas de aguas, ya que la

planta tiene una extensión considerable y posee alta demanda de agua en picos altos de cosecha.

Primeramente, para la operación del filtro rotativo y el tamiz se requiere de al menos 1 persona que controle el proceso, esto involucra fijarse que el agua siga su curso y que no se desborde, que no haya fugas, limpiar el equipo para quitar lodo o exceso de mucílago cada cierto tiempo. De igual forma, con los sedimentadores, se deben habilitar de acuerdo con la demanda que haya, de esta forma, hay días que puede que se necesite habilitar 1 u 2 dependiendo de la cantidad de agua utilizada.

Los sedimentadores en particular, se deben limpiar cada cierto tiempo cuando al vaciarse se logre ver lodo en el fondo, este lodo es recomendable estarlo limpiando para que no siga contaminando el agua que viene entrando nuevamente proveniente del beneficiado de café. Asimismo, se debe cuidar que el nivel no sobrepase lo adecuado, ya que sino se producen derrames y puede ser peligroso caminar alrededor de los equipos, por lo que esto limita el paso a revisión y control del sistema de tratamiento de aguas.

En cuanto al ecualizador, es importante igualmente revisar el nivel, que no sobrepase lo estipulado porque sino perjudica otras áreas productivas del beneficio. De igual forma, se debe controlar que el equipo de aireado presente en el tanque esté funcionando adecuadamente, si no es así, debe reportarlo inmediatamente a su superior para que arregle el problema.

El DAF, es uno de los equipos que proporciona gran eficiencia en remoción de sólidos suspendidos, por ende aumenta la eficiencia de tratamientos posteriores a él.

Este equipo requiere de una operación más controlada, ya que tiene muchos sistemas eléctricos de bombas que deben revisarse cada cierto tiempo. Además, el DAF requiere de un buen control en cuanto a pruebas de jarras para que de esta

forma se logre la dosis adecuada de coagulante y floculante de modo que la operación del equipo sea óptima. Asimismo, los químicos que conlleva el uso de este tratamiento deben prepararse con antelación cuando se van acabando, por lo que esto involucra estar pendiente de cuando queda y demás. En la sección de mantenimiento se especifica como debe limpiarse el equipo. Al menos una vez al día debería apagarse y limpiarse para así optimizar el sistema. A continuación, en la siguiente ecuación 1 se presenta la fórmula utilizada para calcular la cantidad de flujo requerido para una dosis determinada de coagulante.

Primeramente, es importante conocer que los parámetros recomendados por el proveedor es diluir a un 5% el coagulante que viene en presentación líquida y a un 0.1% el floculante que viene en presentación sólida (polvo), estas concentraciones pueden variar dependiendo de la carga del agua residual y de la necesidad de remoción de sólidos, sin embargo, como ejemplo se plantean estas condiciones. Una vez realizadas las diluciones de ambos componentes se calculaba de la siguiente forma el volumen a agregar de coagulante/floculante para una determinada dosis comprobada mediante la prueba de jarras.

$$Q_{Agregar} = \frac{Q_{Tratar} * D}{C * 10000} \quad (1)$$

Donde,

$Q_{agregar}$ = Caudal dosificado por la bomba de coagulante/floculante, L/h.

Q_{tratar} = Caudal de entrada al DAF, L/h.

D = Dosis de floculante/coagulante, ppm

C = Concentración de coagulante/floculante, %.

De igual forma, para obtener la dosis respectiva se utiliza la misma ecuación 1 sin embargo sustituyendo ambos caudales por volumen, de modo que el volumen a

agregar sería los mL de coagulante/floculante utilizados para tratar 500 mL de agua residual que es lo que normalmente entran en la prueba de jarras y de la ecuación se despeja el valor de D asociado a la dosis necesaria que se requiere para tratar el agua residual. Esto se muestra de forma más clara en la ecuación 2.

$$D = \frac{V_{Agrega} * C * 10000}{V_{Tratar}} \quad (2)$$

De esta forma, si por ejemplo se requirió de 1 mL de coagulante al 5% para tratar 500 mL de agua residual en la prueba de jarras entonces la dosis sería de 100 ppm. De igual forma si para el floculante se necesitó de la misma cantidad de producto al 0.1% entonces la dosis sería de 2 ppm y así sucesivamente cada vez que se realice la prueba de jarras. De igual manera, a modo de ejemplo para la ecuación 5, para una dosis de coagulante de 100 ppm al 5%, tratando 6000 L/s, se requiere agregar de coagulante 12 L/s para abastecer la dosis necesaria, este valor se modifica en la bomba según su capacidad. Lo mismo sucede para obtener el caudal necesario de floculante.

Los lodos provenientes del DAF, se deben deshidratar para eliminar el alto porcentaje de humedad que tienen, esto involucra estar pendiente del equipo cada cierto tiempo y vigilar que la dosis de floculante que se utiliza en el deshidratador sea la adecuada. Esto se calcula igualmente con una prueba de jarras.

Seguidamente, con respecto al RAFA, se debe tener cuidado que tampoco se rebalse el equipo, además de que las bacterias son en cierto modo organismos delicados que requieren de cierta temperatura y pH, por lo que se deben estar controlando estos parámetros para saber si los microorganismos se encuentran operando adecuadamente. De igual forma, en el caso del pH, se logra neutralizar utilizando carbonato de calcio o cal, este producto lo que hace es que aumenta el pH hasta un valor cercano a 7, debe utilizarse con moderación para no sobrepasar el

valor del pH.

Con el reactor aerobio, se debe tener en cuenta la capacidad, se debe supervisar que esta no se sobrepase y que por ende el agua se desborde. Además, como posee aireadores, se debe revisar que estos se encuentren operando adecuadamente y que realicen la función respectiva. Asimismo, es importante revisar que como hay varias secciones, el agua debe estar siguiendo el curso respectivo que es a favor de la gravedad y hacia el efluente final.

Finalmente, se debe considerar que es necesario tomar muestra de agua en todos los puntos del sistema, desde el sedimentador hasta el reactor aerobio, tanto en entradas y salidas de cada equipo. Esto con el fin de que se logre evidenciar la carga orgánica que se va eliminando en cada etapa y como puede mejorarse el proceso día a día.

Operación de las bombas

La bomba de aire supe oxígeno al sistema de tratamiento de aguas. Cuando está en operación, la bomba emite un sonido de vibración baja. Si la bomba no está operando normalmente, no se escuchará la vibración y se podrá notar que el sistema es poco eficiente. La eficiencia de un sistema se puede lograr obteniendo los parámetros de DQO, SST y pH adecuados tanto de la entrada como de la salida de un equipo, con estos datos se obtienen resultados analizables que permiten conocer qué tan eficiente está trabajando un sistema.

Análisis químico del agua residual

Un análisis químico es el conjunto de técnicas y procedimientos empleados en muchos campos de la ciencia para identificar y cuantificar la composición química de una sustancia mediante diferentes métodos. En este caso, el agua residual debe someterse a análisis que permitan verificar la calidad del agua en el efluente, esto

para asegurar que el tratamiento se está realizando de manera adecuada.

Se sugiere realizar análisis periódicos del agua residual en los diferentes puntos del sistema, de al menos los siguientes parámetros:

- ✓ pH.
- ✓ Demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_{5,20}$).
- ✓ Demanda química de oxígeno (DQO).
- ✓ Sólidos sedimentables.
- ✓ Sólidos suspendidos totales.
- ✓ Grasas y aceites.

Estos análisis permiten conocer a profundidad si el sistema está funcionando adecuadamente y en caso de que no sea así, permite un panorama de que es lo que está pasando. Estos análisis deben realizarse periódicamente, de preferencia, todos los días en los que se opere el sistema de tratamiento de aguas.

Sección de Mantenimiento

La sección de mantenimiento constituye una guía de como brindar el servicio adecuadamente para la correcta limpieza del sistema. Las instrucciones paso a paso se describirán en esta sección para que el usuario ubicado en la empresa pueda llevar a cabo el mantenimiento de forma adecuada y eficiente. El servicio recomendado debe realizarse según los intervalos de mantenimiento sugeridos, ya que estos tiempos dependen del agua residual de la empresa.

Descripción de tipos de mantenimientos

Existen varios tipos de mantenimiento, se mencionan los principales:

- ✓ Mantenimiento preventivo: Se realiza con el fin de reducir la frecuencia y el impacto de los fallos en un sistema, es un conjunto de actividades como inspecciones regulares, pruebas, reparaciones y otras programadas con antelación. Tiene la desventaja de que pueden realizarse cambios innecesarios implicando asimismo costos importantes de mano de obra.
- ✓ Mantenimiento correctivo: Se encarga de reparar una avería que ya se produjo. Este sistema es aplicable cuando el equipo es complejo o en sistemas que resulta prácticamente imposible predecir fallos. Tiene el inconveniente de que el fallo puede darse en cualquier momento sin previo aviso.

Se debe tomar en cuenta, que cualquier tipo de mantenimiento involucra coste económico y tiempo, por lo que es parte de la logística de la empresa o residencia coordinar los momentos para hacerlo.

Intervalos de mantenimientos

El intervalo de mantenimiento va a depender del agua residual que se esté tratando. Se recomienda realizar el mantenimiento todos los días, en el caso de los sedimentadores, se recomienda hacerlo de día por medio para respetar el tiempo de retención promedio que estos tienen. Para el equalizador, al ser un equipo tan grande, se recomienda hacerlo antes y después de cada cosecha, de esta forma se asegura que una misma cosecha va a tener un agua residual similar.

En el caso del DAF, el mantenimiento preferiblemente debe realizarse todos los días, de modo que se debe apagar, quitar toda el agua, limpiar por dentro el equipo y volver a llenar. Esto asegura que el equipo tenga una vida útil prolongada y que el metal se conserve adecuadamente, de igual forma sucede con el deshidratador, se recomienda vaciarlo y limpiarlo todos los días.

En cuanto al RAFA, al ser tan grande es un poco complicado hacerle mantenimiento total además de que posee microorganismos que también afectan a la hora de limpiar, ya que estos son de cuidado y si no se les trata adecuadamente se puede morir, por eso, sucede muy similar al ecualizador, se debe hacer antes y después de cada cosecha, de esta forma se asegura una homogeneidad en las aguas residuales. Debe limpiarse los excesos de calcio que pueda quedar en las tuberías.

Finalmente, en el caso del reactor aerobio, se debe contemplar su limpieza de igual forma antes y después de cada cosecha, ya que al igual que el ecualizador y el RAFA, son equipos que cuesta vaciarlos del todo y a su vez es difícil si se vacía volver a llegar a una capacidad estable.

Todo el sistema que involucra máquinas eléctricas como bombas, compresores y demás si deben tener el mantenimiento respectivo para estos equipos, ya que debe prevenirse que fallen debido a que esto puede ocasionar un colapso en el sistema y que de esta forma se deje de recibir café, lo cual no es beneficioso para la empresa, por lo que rápidamente se deben cambiar a bombas de reserva y seguir operando normalmente.

Pasos para seguir en todo proceso de limpieza general

La forma más común de realizar el mantenimiento de un equipo es limpiarlo cada cierto tiempo, esto incluye remover lodos o grasas que van a estar separadas del agua residual, por ende se facilita su limpieza.

Para realizar la limpieza, deben seguirse estos pasos:

- ✓ Utilice el equipo de seguridad recomendado antes de iniciar la limpieza.
- ✓ Suba al tanque que va a realizar limpieza con los implementos necesarios para limpiar como escoba, manguera, bomba de succión, entre otros.

- ✓ Evalúe el estado del recipiente, verifique que no hayan fugas o grietas que puedan afectar el desempeño del equipo.
- ✓ Si debe remover el lodo, introduzca con cuidado una pala o algún artículo que le permita remover todo.
- ✓ Deposite la grasa o lodos en otro recipiente o sáquelos con una bomba de succión.
- ✓ Deseche adecuadamente los lodos, no los tire a la basura.
- ✓ Puede ayudarse de una manguera para remover restos de lodo que hayan quedado en las paredes del tanque.
- ✓ Si tiene alguna duda consulte con su superior.

Tuberías

Una tubería es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos. Se suele elaborar con materiales muy diversos. También sirven para transportar materiales que, si bien no son propiamente un fluido, se adecuan a este sistema: hormigón, cemento, cereales, documentos encapsulados, otros. Sin importar el tipo de tubería, siempre es importante mantener las tuberías rotuladas y con la dirección del flujo. Además, es necesario comprobar el estado de estas cada cierto tiempo o si hay alguna fuga que pueda afectar al sistema. Si nota algo extraño, debe informarlo al departamento de mantenimiento o a su superior para resolver el problema.

Plan de emergencias

Un plan de emergencias, como lo define la Comisión Nacional de Emergencias, es el producto de una serie de análisis, observaciones y evaluaciones planificadas,

dirigidas y calendarizadas en un documento, que tiene como fin servir de guía para las fases de prevención, mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación, acciones que deben llevarse a cabo frente a situaciones de emergencia, o de inminente desastre, provocadas por la vulnerabilidad que presentan las personas, las edificaciones o los sistemas frente a las amenazas propias de la naturaleza, como pueden ser los sismos, las inundaciones, los huracanes, actividad volcánica, deslizamientos, o bien provocados por actividades realizadas por el hombre como son los incendios, los derrames de productos peligrosos y las explosiones. A continuación, en la Figura 2 se detalla un croquis del beneficio en estudio, con el fin de que se logren visualizar los puntos de reunión y las salidas de emergencia más cercanas a tomar en cuenta para los operarios.

Como se muestra en la Figura 2, hay 3 puntos de reunión importantes a considerar. El primero está ubicado afuera, donde se recibe el café, en este punto pueden ubicarse las personas que trabajan en el procesamiento del café. En el punto 2 ubicado por la entrada principal, se pueden ubicar las personas de las oficinas y las que están por el parqueo además de la parte del DAF junto con el ecualizador y el reactor aerobio. Por último, en el punto 3 se ubican las personas de las operaciones de secado, silos y del RAFA. En este punto es importante aclarar que se debe usar casco en todo momento, por lo que es responsabilidad de cada persona utilizarlo.



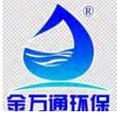
Figura 2. Croquis de la empresa para visualizar salidas de emergencia.

Conclusión

Este manual de operación y mantenimiento resulta indispensable, ya que permite ser una guía especializada de como se opera adecuadamente el sistema de tratamiento de aguas y como debe ser el mantenimiento adecuado para preservar la vida útil del sistema. Se le recuerda al usuario seguir esta guía al pie de la letra y en caso de alguna duda debe contactar a su supervisor a cargo.

ANEXOS

I. Anexo 1. Cotización Jinwantong DAF:



Qingdao Jinwantong Environmental Science And Technology Co., Ltd.

43, Zangnan Road, Zangma Town, Qingdao, Shandong, CN

The Quotation

NO.:STE2022920

Date:September 20, 2022

Air flotation machine oil separation equipment quotation

TDAF- II -34					
Name	Classification	Specifications	QTY	Power	Remarks
				(kw)	
host	Air flotation chassis 35m ³ /h	TDAF- II -17 11.7m*2.15m*2.5m	2sets	/	Plate thickness 5mm material 316L
	Stirring Motor Component	YE2-80M1-4	4sets	1.5	Mixer material 316L
Dissolved gas part	releaser	DV- II	8sets	/	304ss
	Dissolved air pump	LVS64-3-1-15KW, Q=70m ³ /h,H=50m	2sets	15	Material of overcurrent parts is 316L, frequency conversion control
	Dissolved gas tank	Φ 300*2200mm	2sets	/	material 316L
	Air compressor	V-0.36/8	2sets	3	Domestic high quality
	Gas line instrument	Multiple specifications	2sets	/	Domestic high quality
Scraper	Scraping reducer	NMRV-50-100-0.55kw	2sets	0.55	Frequency Control

part	Nylon sprocket	MC-11-250	8pcs	/	MC nylon/ss304
	nylon chain	pitch-63.5	48m	/	MC nylon
	transmission shaft	ϕ 50	2sets	/	ss304
	scraper	Non-standard package	10sets	/	304ss/oil resistant rubber
	Bearing / Seat	Φ 40 (UCP208)	8sets	/	
Platform section	Including ladder and guardrail	800*11700mm	1set		Carbon steel anti-corrosion
Sludge tubes	tubes	DN150	1set		Materail 316L
control	Integrated distribution box	Auto control	2sets	/	Schneider Electric Devices
Standard Parts	Flanges, screws, bolts, nuts, gaskets, etc.		2sets	/	/
EXW PRICE	US\$ 179,833.00				
CIF Costa Rica PRICE(2X 40HQ)	US\$194,433.00				

II. Anexo 2: Cotización Jinwantong deshidratador lodos:

DL-403 type Stacked screw sludge dewatering machine technical parameters

Name	Stacked screw sludge dewatering machine	
Type	DL403	
Dehydration treatment type	screw propulsion extrusion	
Absolutely dry mud handling capacity	240-480 Kg / h	
Equipment size	L4780mm × W2520mm × H2280mm	
net weight	5400kg	
Total power	8.9kw	
Main equipment configuration	Item	Specifications
Stacked screw	diameter x length	DN400mm × L3100mm

sludge dewatering machine body	quantity	3 groups
	Lamination	Fixing ring: integral ring piece, thickness 3mm, material: SS304 cold rolled steel
		Swimming ring: integral ring piece, thickness 3mm, material: SS304 cold rolled steel
	Filtration and Dewatering Gap Gaskets	All use finishing gaskets, accuracy $\pm 0.02\text{mm}$, material: SS304
	Mud outlet back pressure device	The elastic back pressure mechanism can automatically adjust the mud clearance according to the inner cavity pressure.
	support plate	Material: SS304, Thickness: 10mm
	Cover type	Gas spring support cover
Assembly type	The main body is designed in sections, which is convenient for later maintenance, and the double-layer design of the support plate ensures the stable operation of the equipment.	
screw shaft	diameter x length	$\phi 350\text{mm} \times \text{L}3022\text{mm}$
	quantity	3pcs
	blade	Thickness: concentration section 6mm, dehydration section 8mm
	material	SS304
	Processing technology	After welding, the whole is finished, and the blades are strengthened by supersonic spraying.
	hardness	1100HV
sump	size	$\text{L}2110\text{mm} \times \text{W}2060\text{mm} \times \text{H}530\text{mm}$
	material	SS304
	plate thickness	3mm
	Filtrate outlet	DN200 flange(JB/T81-94, PN1.0MPa)
floculation mixing box ☑	size	$\text{L}2000\text{mm} \times \text{W}1000\text{mm} \times \text{H}1350\text{mm}$
	quantity	1set
	material	SS304, plate thickness: 4mm
	capacity	2.5m^3

	agitator	QTY:1 set Materail: SS304
	Sewage inlet	DN80 flange(JB/T81-94, PN1.0MPa)
	Overflow	DN150 flange(JB/T81-94, PN1.0MPa)
	Dosing port	DN50 flange(JB/T81-94, PN1.0MPa)
	vent	DN150 flange(JB/T81-94, PN1.0MPa)
Body bracket	size	L4000mm×W2180mm×H1240mm
	quantity	1set
	material	SS304, Thickness: side 8mm, support10mm
Helical shaft geared motor	Motor Power	1.5kw
	Protection class	IP55
	Insulation class	F class
	quantity	3sets
	Reducer brand	Suncheon or equivalent
Stirring shaft gear motor	Motor Power	2.2kw
	Protection class	IP55
	Insulation class	F class
	quantity	2sets
	Reducer brand	Suncheon or equivalent
flushing device	Type	Conical water column
	pressure	0.2MPa
	Rinse water inlet	DN50inner wire(G2")
	nozzle	Material: SS304, Quantity: 48
	sprinkler pipe	Material: SS304, Size: DN15
The electromagnetic valve	Specification	DN50
	quantity	1pcs
	material	SS304
	brand	Domestic high quality
Level Switch	model	HS-3A
	material	Engineering plastics
	size	φ 60
	brand	Kaikun
Electrical control	material	carbon steel spray

cabinet	Main component brands	Chint
	Inverter brand	ABB or Schneider
	Function	Realize automatic, manual and remote control of dehydrator.
Remarks: The company reserves the right to change the design of the technical parameters listed above.		
EXW price :US\$53,333.00		

NO.	Name	QTY	Unit price	Total EXW price
1	TDAF- II -34	2sets	US\$ 89,916.50	US\$ 179,833.00
2	DL-403 type Stacked screw sludge dewatering machine	1set	US\$53,333.00	US\$53,333.00
3	Sub-total			US\$233,166.00
4	CIF caldera 2x40HQ+1X20GP	3sets		US\$253,226.00

III. Anexo 3: Cotización YiMei DAF:



YIMEI Qingdao YiMei Environment Project Co.,Ltd

Add: NO.386,Hai Bin Five Road, Huangdao,Qingdao city,China Email:sherryzhou@qingdaoyimei.com

80m3/h Dissolved air flotation units quotation

Model	Treatment capacity (m3/h)	Equipment dimension (m)			dissolved air vessel size (mm)	circulating pump (Kw)	Equipment total weight (Kg)	Scraper Power (kw)	Air compressor (kw)	Inlet/outlet (mm)	unit price (USD)
		Length	Width	Height							
YMRF-80	80	11.7	2.2	2.5	Φ800X1800	22kw	3500	0.75	7.5	DN100	54367.00
2sets daf cost:USD108734 (ss304 material)											
Shipping charges to caldera costa rica:USD16000 (load on 2*40ft container)											
CIF caldera costs rica price: USD 124734 (2sets load on two 40ft container)											
Note: Flocculating coagulation reaction tank size :1x2.2x2.5m (daf body:10.7*2.2*2.5m)											

Trade Term:

MOQ: 1 SET

Loading Port: Qingdao port

Delivery Term: 30working days from receive the Prepayment

Payment Terms: 30% TT Prepayment, 70% TT before delivery

Seri	Item	Qty	Remark
1	Main tank body	1	Carbon steel epoxy anti-corrosion painting
2	Dissolved air system	1	Dissolved air tank · air compressor · dissolved air pump · pipeline · valve · instrument · switch etc.
3	discharge slugging system	1	Scraper plate · motor · reducer · chain · Gear etc.
4	cleaning water system	1	Carbon steel antiseptic, cleaning water chamber room, pipeline, flange etc.
5	Electric control cabinet	1	Ss304 Outdoor rain proof, IP55, Schneider electrical accessories
6	Flocculant dosing system	2 sets	PE tank, mixer, dosing pump
7	PH adjust system	1 set	PH meter, dosing pump, PE tank
8	Flocculating reaction tank mixer	2 pcs	Famous brand in china
9	Ladder	1 set	
10	bottom tapered funnel and legs		

DAF picture:



IV. Anexo 4: Cotización YiMei deshidratador de lodos:



Qingdao Yimei Environment Project Co.,Ltd Add: No 386,Hai Bin Five road, Jiaonan,Qingdao
 Email: sherryzhou@qingdaoyimei.com Whatsapp:+8613969623585

Quotation of 403 type screw press and 2000L auto dosing system

Equipment list :

Product List (Supply scope)				
Item	Model	Qty.	Image	Unit price
screw press dehydrator-YMDL403 (stainless steel 304)	YMDL-403 (DS treat capacity 120-540kg/h , 24m3/h 20000mg/L)	1		US\$ 29550
Screw sludge pump	G50-1	1		US\$ 980.00
Dosing pump CNP brand	GB1500L	1		US\$ 1280.00
Automatic chemical dosing system	JYJ-2000L (stainless steel 304)	1		US\$ 3950.00
Unit price:USD35760				
FOB Qingdao price: USD 36110 (load on one 20ft container)				
Shipping charges to caldera costa rica price:USD5000				
Total cost , CIF caldera costa rica price: USD 40760				

YMDL403 detailed parameter:

Model	YMDL-403
Capacity (kg-DS/hr)	Absolute Dry mud 120 ~ 600kg/h. Solid concentration: 20000mg/L, capacity:24m3/h

set environment

suitable	-10°C ~ +40°C
----------	---------------

humidity scope	Maxi 90%RH
altitude	elevation below 1000m
electric power	3ph 440V 50Hz or others customized voltage
water supply pressure	0.1 ~ 0.2MPa

item		specification
External dimension		L5000×W2200×H2290 [mm]
total power		4.4[kW]
weight		≈3100kg
power supply		440V/50Hz 3phase
screw press main body	Quantity	3 set
	Control mode	Each set fold screw main body can separated start stop operating; it also can implement invert rotating maintenance mode.

	back pressure plate	With the keyway milling on the shaft, the top bolt and shaft are designed in plane top plane to increase stressed area and prevent the plate from destroying the fastening force due to axial rotation.	
	material	concentration section : SS304 Dehydration section : SS304 gasket : SS304	
spiral shaft	size	40×3100[mm] ,blade thickness :6mm	
	Quantity	3pcs	
	material	SS304	
Reducer	model	TSAF88R58-435- YVP1.1	zhejiang
	specification	IP54 ,speed .0-4.2 rpm	
	power	1.1kw*3	
Flocculating mixing tank	size	L1000×W1000×H460[mm]	
	volume	About 1400[L]	
	material	SS304,Thickness: 2-2.5mm	

	additional	Curves guiding device, reach to save chemicals.
Mixing motor in Flocculating mixing tank	model	TR58-69 1.1
	Protection grade	IP54
	power	1.1[kW]
washing device	type	Cone water column
	pressure	0.2MPa
	Washing water inlet	DN20
	nozzle	material : nylon · quantity : 27pcs
	spraying pipe	SS304, DN20
Electric control cabinet IP54	material	carbon steel spraying plastics
	Electric parts	CHINT
	frequency converter	
	size	W 700×H 800×D 260 [mm]

operating parameter

- feeding sludge solid concentration : 2000mg/L-50000mg/L
- mud water content: 75%- 85%
- clear liquid solid concentration: about 0.5‰
- solids phase recovery rate : about 90%
- operating mode : manual or automatic
- reducer motor : guarantee period 1 year

- fixed ring service life: ≥ 5 years
- floating ring service life : ≥ 4.5 years
- spiral shaft service life : ≥ 11 years
- spiral shaft rotating speed can be adjust,scope is 1.0—4r/ min

Picture of screw press :

