

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS
CORRIENTES DE AGUA QUE DESCARGAN EN LA PISCINA DE
CONTRAINCENDIOS DE LA PLANTA DE AGUA DEL DEPARTAMENTO DE
SERVICIOS INDUSTRIALES EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA DE
ECOPETROL S.A

DIANA PAOLA OSORIO ARCINIEGAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2018

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS
CORRIENTES DE AGUA QUE DESCARGAN EN LA PISCINA DE
CONTRAINCENDIOS DE LA PLANTA DE AGUA DEL DEPARTAMENTO DE
SERVICIOS INDUSTRIALES EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA DE
ECOPETROL S.A

DIANA PAOLA OSORIO ARCINIEGAS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR

HERNANDO GUERRERO AMAYA

PhD en Electroquímica y ciencia, Ingeniero Químico

CODIRECTOR

DAVID ALEXANDER PEREZ ESPINOSA

Msc en Ingeniería Química, Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, mi hermano y mi familia por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

A mi novio y mis compañeros de carrera, quienes vivieron conmigo este camino y me brindaron su apoyo y cariño.

A mis profesores y maestros, por sus enseñanzas tanto profesionales como personales.

A ECOPETROL S.A. por darme la oportunidad de incursionar en la industria y crecer como persona.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	16
1.1. Objetivo general	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA.....	17
2.2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
2.3. PRINCIPIOS CIENTÍFICOS	18
2.3.1. Procesos físicos y químicos	18
2.3.2. Análisis fisicoquímicos del agua	19
3. METODOLOGÍA	21
3.1. Fase 1: Conocimiento básico de los procesos de la planta de agua.	21
3.2. Fase 2: Caracterización fisicoquímica de las corrientes	22
3.3. Fase 3: Definición de alternativas	22
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
4.1. Fase 1. Conocimiento básico de los procesos de la planta de agua	23
4.2. Fase 2. Caracterización físico-química de las corrientes.....	24
4.3. Fase 3. Planteamiento de las alternativas de solución.....	26
4.3.1. Agua de rechazo de ósmosis inversa.....	26
4.3.1.1. Primera alternativa	26
4.3.1.2. Segunda alternativa.....	28
4.3.2. Lodos de ultrafiltración	30
4.3.2.1. Primera alternativa	30
4.3.2.2. Segunda alternativa.....	34
4.3.2.3. Tercera alternativa.....	35
4.3.3. Agua de retrolavados de filtros de arena y antracita	37
4.3.3.1. Alternativa de recuperación para la U-850	37
4.3.3.2. Alternativa de recuperación para la U-830	38
4.3.4. Agua de toma muestras y agua de enfriamiento	40

4.3.5. Agua de la piscina BA-5404	42
4.3.5.1. Primera alternativa	42
4.3.5.2. Segunda alternativa.....	44
5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica general de las corrientes de desecho de los procesos.....	24
Tabla 2. Comparación de la concentración de las especies en el río y en los lodos	25
Tabla 3. Caracterización general del agua mezclada para restitución	26
Tabla 4. Tabla comparativa de las alternativas de solución.	30
Tabla 5. Caracterización de la mezcla, del agua clarificada y de los lodos de ultrafiltración.	31
Tabla 6. Características de la muestra resultante y del río.....	34
Tabla 7. Tabla comparativa de las alternativas de solución	37
Tabla 8. Caracterización del agua cruda y de los retrolavados	39
Tabla 9. Caracterización de agua de toma muestras, enfriamiento de los AA y filtrada.....	41
Tabla 10. Tabla de datos de agua clarificada, de la piscina BA-5404 y su mezcla	43
Tabla 11. Tabla de datos de agua ultrafiltrada, piscina BA-5404 y la mezcla de estas corrientes	44
Tabla 12. Tabla comparativa de las alternativas de solución	44
Tabla 13. Valores de guías y ventanas operativas de los parámetros físicoquímicos del agua cruda.	55
Tabla 14. Valores de guías y ventanas operativas para los parámetros físicoquímicos del agua industrial.....	55
Tabla 15. Valores de guías y ventanas operativas para los parámetros físicoquímicos del agua filtrada.	55
Tabla 16. Valores de guías y ventanas operativas para los parámetros físicoquímicos del agua desmineralizada.	55
Tabla 17. Valores de calidad del agua de restitución a las torres según el reporte presentado por Lipesa.....	56

Tabla 18. Valores de calidad del agua de recirculación de las torres según el reporte presentado por Lipesa.	56
Tabla 19. Información de las corrientes para el balance general de agua	57
Tabla 20. Información de las corrientes residuales de los procesos de planta de agua.	57
Tabla 21. Tarifas de Servicios Industriales.....	58
Tabla 22. Condiciones de operación de las corrientes de desecho de los procesos.	59
Tabla 23. Caracterización del agua de la piscina de contraincendios	59
Tabla 24. Caracterización de los lodos de ultrafiltración	60
Tabla 25. Caracterización del agua de la piscina BA-5404	60
Tabla 26. Caracterización de agua del colector de los toma muestras sin la corriente del río	61
Tabla 27. Caracterización del agua de rechazo de ósmosis inversa.....	61
Tabla 28. Caracterización del agua de retrolavados de los filtros	62
Tabla 29. Caracterización del agua clarificada	62
Tabla 30. Caracterización del agua de Río	63
Tabla 31. Caracterización del agua filtrada y ultrafiltrada.....	63
Tabla 32. Masa de las especies analizadas en el agua captada.....	68
Tabla 33. Masa de las especies analizadas en el agua clarificada	69
Tabla 34. Masa de las especies analizadas en los lodos.....	69
Tabla 35. Caracterización del agua mezclada para restitución	70
Tabla 36. Caracterización del agua mezclada para restitución (Makeup)	70
Tabla 37. Número de ciclos de la torre aplicando la alternativa de recuperación...	71
Tabla 38. Valor de la turbiedad en el tiempo durante el retiro de lodos.....	77
Tabla 39. Pruebas de filtración con diferentes tipos de filtros.	79
Tabla 40. Condiciones de diseño y operación del filtro	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases de la metodología	21
Figura 2. Diagrama de bloques de la planta de agua.....	23
Figura 3. Comparación de la alcalinidad del agua clarificada y la mezcla realizada de agua de rechazo de ósmosis inversa.	27
Figura 4. Comparación de la dureza del agua clarificada y la mezcla realizada. ...	27
Figura 5. Balance de agua de las torres	28
Figura 6. Balance de masa	30
Figura 7. Comparación del pH entre el agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.	31
Figura 8. Comparación de la turbiedad entre el agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.	32
Figura 9. Comparación de la alcalinidad del agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.	32
Figura 10. Comparación de la dureza del agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.	33
Figura 11. Comparación de la dureza entre el agua del río y los lodos de ultrafiltración.	35
Figura 12. Comparación de la alcalinidad del agua del río y los lodos de ultrafiltración.	35
Figura 13. Comparación de la dureza del agua filtrada y los lodos de ultrafiltración	36
Figura 14. Corridas de turbiedad de los filtros de la U-850	38
Figura 15. Corridas de turbiedad de los filtros de la U-830	39
Figura 16. Balance de masa	41
Figura 17. Comparación de la dureza del agua clarificada y el agua de la piscina BA-5404	43
Figura 18. Resultados de análisis microbiológicos de la mezcla RO+CL (a) y agua clarificada (b).....	64

Figura 19. Resultados de análisis microbiológicos de los lodos de UF (a) y agua clarificada (b).....	65
Figura 20. Resultados de análisis microbiológicos del agua de la piscina BA-5404, (a) y del agua clarificada (b).....	65
Figura 21. Resultados de análisis microbiológicos del agua de la piscina BA-5404, (a) y del agua filtrada, (b).	66
Figura 22. Volumen de control para el balance másico de las plantas de agua U-800 y U-850.....	67
Figura 23. Balance de agua de las torres	72
Figura 24. Condiciones del agua de rechazo de ósmosis.....	74
Figura 25. Diseño de la nueva unidad de ósmosis inversa	75
Figura 26. Resultados de la simulación	76
Figura 27. Plot plan de las líneas de la segunda alternativa	78
Figura 28. Línea de tiempo de la prueba a realizar.....	80
Figura 29. Porcentaje de llenado del pozo claro durante el retrolavado	81
Figura 30. Diagrama de la nueva alineación	82

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Descripción de los procesos de planta de agua.....	49
ANEXO B: Valores de Guías de control y Ventanas operativas	55
ANEXO C: Caracterización del agua clarificada, filtrada, ultrafiltrada y corrientes residuales	57
ANEXO D: Condiciones de operación de las corrientes residuales	59
ANEXO E: Análisis microbiológicos de las corrientes residuales	64
ANEXO F: Análisis de los lodos de clarificación	67
ANEXO G: Caracterización del agua mezclada como restitución.....	70
ANEXO H: Análisis del funcionamiento de las torres de enfriamiento	71
ANEXO I: Simulación de la nueva unidad de ósmosis inversa	74
ANEXO J: Registro de la turbiedad de los lodos de ultrafiltración	77
ANEXO K: Plot plan de la segunda alternativa	78
ANEXO L: Pruebas de filtración y condiciones de operación del filtro	79
ANEXO M: Registro de Prueba en campo para el agua de retrolavados	80
ANEXO N: Plot plan de la alternativa para el lavado de filtros.....	82

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS CORRIENTES DE AGUA QUE DESCARGAN EN LA PISCINA DE CONTRAINCENDIOS DE LA PLANTA DE AGUA DEL DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A.*

AUTOR: DIANA PAOLA OSORIO ARCINIEGAS**

PALABRAS CLAVE: Clarificación, filtración, ultrafiltración, ósmosis inversa, parámetros fisicoquímicos.

DESCRIPCIÓN:

El agua es un recurso clave en los procesos de la Refinería de Ecopetrol S.A, en especial para la generación de vapor y producción de agua potable; sin embargo, para su uso es necesario acondicionar su calidad. El agua sufre procesos de clarificación, filtración, ultrafiltración, suavización, ósmosis inversa y potabilización para poder cumplir con los estándares de calidad deseado. Al aplicar estos procesos se originan corrientes de aguas residuales. El Departamento de Servicios Industriales Refinería, utiliza dichas corrientes provenientes de los sistemas de filtración, ultrafiltración, osmosis inversa y sistemas de apoyo, para la red de contraincendios de la Refinería de Barrancabermeja, no obstante, se realizará una modernización del sistema de contraincendios, para el cual se creará una nueva infraestructura de almacenamiento. Debido a esto, las corrientes de agua residuales ya no serán la fuente de alimentación de este sistema y se dejará de utilizar la actual piscina de almacenamiento. Por lo tanto, se plantearon alternativas de reutilización factibles, partiendo de la caracterización de los parámetros fisicoquímicos como dureza, alcalinidad, pH, entre otros, medidos a las corrientes residuales para recuperar estos efluentes dentro de los mismos procesos que se llevan a cabo en la planta de agua, con base en los rangos de calidad del agua permitidos para cada procedimiento.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD Hernando Guerrero Amaya

ABSTRACT

TITLE: ALTERNATIVES EVALUATION FOR THE REUSE OF WATER STREAMS DISCHARGED IN THE FIRE-FIGHTING POOL FROM THE WATER PLANT IN THE DEPARTMENT OF INDUSTRIAL SERVICES BARRANCABERMEJA ECOPETROL REFINERY S.A *

AUTHOR: DIANA PAOLA OSORIO ARCINIEGAS**

KEY WORDS: Clarification, filtration, ultrafiltration, reverse osmosis, physicochemical parameters

DESCRIPTION:

Water is a key resource in the Refinery processes Ecopetrol S.A. mainly for steam generation and production of potable water. However, it is necessary to adapt the water's quality in order to be used as needed. Water undergoes processes of clarification, filtration, ultrafiltration, softening, reverse osmosis and purification to reach the desired quality standards. When those processes are applied, wastewater streams are originated. The Industrial Refinery Services Department uses coming streams from filtration systems, ultrafiltration, reverse osmosis and support systems as a source for the Barrancabermeja Refinery firefighting system. Nevertheless, a modernization of the firefighting system will be carried out to use a new storage infrastructure. Therefore, wastewater streams will no longer be the feed stream for this system and the refinery will stop using the current storage pool. For this reason, feasible reuse alternatives were proposed starting from the characterization of physicochemical parameters such as hardness, alkalinity, pH, among others. It is measured from the waste streams to recover the effluents within the same processes that are carried out in the water plant according to the water quality ranges allowed for each procedure.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD Hernando Guerrero Amaya

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural muy importante para el desarrollo de los procesos que se llevan a cabo en la Refinería de Barrancabermeja. Debido al uso desmedido de este recurso y a la contaminación del agua, las fuentes de origen han reducido significativamente su cantidad. De allí la importancia de utilizar eficientemente y desarrollar oportunidades de ahorro del agua, en especial en los procesos industriales que consumen grandes volúmenes, y así poder construir un ciclo cerrado de esta valiosa materia prima.

Actualmente la Refinería de Ecopetrol S.A capta aproximadamente 10000 gpm del río Magdalena, que son tratados para adaptar las condiciones del agua a los procesos en los cuales se va a utilizar, como en la generación de vapor, el sistema de enfriamiento y producción de agua potable. Partiendo de que en cada tratamiento que se le aplica al agua se genera una corriente de residual, es importante considerar hacia dónde verter o cómo tratar este volumen para con ello reducir el consumo y el impacto ambiental. En este momento las aguas residuales procedentes de las etapas de filtración, ultrafiltración y ósmosis inversa se descargan en una piscina, donde se aprovecha este volumen para el sistema de contraincendios de la refinería, debido a la creación de un nuevo sistema para la red de contraincendios se dejará de utilizar dicha piscina. Por lo tanto, se plantean alternativas de reúso, evaluando los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos de la caracterización de los efluentes, para de esta manera, poder recuperarlos dentro de los mismos procesos que se desarrollan en la planta de agua, asimismo se analizan los posibles efectos que puedan tener en el proceso y el impacto en la calidad del agua producida en las diferentes etapas de tratamiento.

1. OBJETIVOS

1.1.OBJETIVO GENERAL

Definir alternativas para reutilizar las corrientes de agua que se almacenan en la piscina de contraincendios de la planta de aguas de la refinería de Ecopetrol S.A.

1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Conocer los procesos que se desarrollan en la planta de aguas con el fin de establecer las corrientes residuales a recuperar.
2. Determinar la calidad de las corrientes residuales generadas en los procesos de tratamiento de planta de aguas.
3. Identificar la viabilidad de las opciones de reúso de los efluentes que se vierten a la piscina de contraincendios.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA

Ecopetrol S.A. es la principal compañía petrolera en Colombia, dedicada al desarrollo de actividades comerciales e industriales relacionadas con la exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de hidrocarburos, sus derivados y productos. La Refinería de Barrancabermeja tiene una capacidad de carga de 250.000 barriles por día. Genera el 75 por ciento de la gasolina (corriente y extra), combustóleo, diésel, Jet-A, ceras, bases lubricantes, polietileno, aromáticos, asfaltos y disolventes.

El Departamento de Servicios Industriales Refinería es el encargado de producir y suministrar gas, vapor, electricidad, aire y agua a la Refinería. Se captan aproximadamente 10000 gpm de agua del río Magdalena y se someten a tratamientos de clarificación, filtración, potabilización, ultrafiltración, suavización y ósmosis inversa. En las unidades que componen la planta de agua del departamento se produce agua potable, desmineralizada, entre otras. En las calderas se produce vapor de 150 y 400 psi. Al mismo tiempo se genera electricidad a través de los Turbogeneradores y el Turbogas.

2.2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El Departamento de Servicios Industriales utiliza como materia prima agua del río Magdalena, que es tratada por diferentes métodos con el fin de adaptar su calidad para la generación de vapor y energía y, asimismo, producir agua potable para los usuarios. Actualmente las corrientes residuales procedentes de los procesos de filtración, ultrafiltración, ósmosis inversa y de sistemas de apoyo son almacenadas en la piscina de contraincendios del departamento la cual se ha destinado provisionalmente para la red de contraincendios de la Refinería.

Gracias a la creación de un plan de mejoramiento, se diseñó un nuevo sistema en donde se contempla una nueva infraestructura de almacenamiento, dejando fuera de uso la actual piscina. Además de esto, el agua a utilizar será tomada de otra fuente, por lo que es importante determinar alternativas de recuperación y reúso del agua que sean factibles para el departamento y sus procesos de manera que generen ahorro de agua y energía para lograr una producción más limpia. Adicionalmente, se desea crear sistemas cerrados de reciclaje del agua con cero descargas para la conservación de los recursos y protección del medio ambiente promoviendo el desarrollo sostenible.

2.3. PRINCIPIOS CIENTÍFICOS

2.3.1. Procesos físicos y químicos. Para poder utilizar del agua es necesario aplicar procesos para mejorar su calidad.

El proceso de **clarificación** elimina la turbiedad y el color al agua captada. Esta se compone a su vez de tres etapas: la primera de ellas es la coagulación, en la cual ocurre la desestabilización química de las partículas por medio de la adición de coagulantes. Posteriormente se le adiciona un floculante que ayuda a formar coágulos mayores¹. La última etapa es la sedimentación, en la cual los sólidos suspendidos en el líquido son separados de este por acción de la fuerza gravitacional².

Mediante la **filtración** se terminan de retirar los sólidos suspendidos y disminuir la turbiedad. Este proceso consiste en la separación de las partículas y

¹ ANDÍA, Yolanda. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico tratamiento de agua, coagulación y floculación. Perú, SEDAPAL. 2000.

² FERNÁNDEZ, Sebastian Ignacio. Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. 2015

microorganismos, que no han sido retenidos en los procesos anteriores mediante el uso de un lecho de arena y antracita que las retiene³.

El agua filtrada ingresa a los trenes de **ultrafiltración** que utilizan membranas, fabricadas de polímeros sintéticos, para separar materiales disueltos de bajo peso molecular por acción de un diferencial de presión⁴.

Gracias al proceso de **suavización** se remueven sales de calcio y magnesio disueltas en el agua mediante una resina de zeolitas, que tiene la capacidad de eliminar selectivamente los iones disueltos, mantenerlos temporalmente y cederlos de nuevo frente a una solución regenerante⁵.

El proceso de **ósmosis inversa** consiste en separar los sólidos disueltos de las moléculas de agua ya que las membranas están compuestas de polímeros especiales que permiten el paso de las moléculas de agua mientras se retienen la mayoría de otros tipos de moléculas⁴.

2.3.2. Análisis fisicoquímicos del agua. Para verificar la efectividad de cada proceso y la calidad del agua, es necesario realizar periódicamente análisis fisicoquímicos de los principales parámetros de control.

La **turbiedad** [NTU] es un efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua y que puede ser ocasionada por la presencia de una gran variedad de materiales en suspensión. La medición de la turbiedad sirve para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda y la efectividad de los procesos de clarificación y filtración⁶.

³ ARBOLEDA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogotá D.C, McGraw-Hill. 2000.

⁴ CHEREMISINOFF, Nicholas. HANDBOOK OF WATER AND WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES. Butterworth-Heinemann. 2002

⁵ DUARTE V. Efraín Antonio, VIZCAÍNO S. Carlos Mario. Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial. Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad de La Salle. Bogotá D. C. 2015

⁶ ROMERO, Jairo. Calidad del agua. 3 ed. E. Colombiana de Ingeniería. 2009.

El **color** [$\frac{mg}{L}$ de Pt] del agua se debe a la presencia de iones de hierro y manganeso, desechos orgánicos y algunos residuos industriales. Su medida determina la eficiencia del proceso de clarificación⁶.

La **conductividad** [$\frac{\mu S}{cm}$] es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica y está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua. Por lo tanto, la conductividad eléctrica está relacionada con la cantidad total de sólidos disueltos en el agua (TDS)⁶.

La **alcalinidad** [$\frac{mg}{L}$ de $CaCO_3$] permite regular los cambios de pH producidos por la adición de ácidos y se debe generalmente a la presencia de compuestos como bicarbonatos, carbonatos, e hidróxidos. La determinación de la alcalinidad es importante en los procesos de coagulación, ablandamiento y corrosión⁷.

La **dureza** [$\frac{mg}{L}$ de $CaCO_3$] es el contenido de sales de calcio y magnesio en el agua. Se toma como un indicador de la capacidad incrustante del agua y es importante medir su valor en el agua desmineralizada para corroborar la eficiencia de las membranas de ósmosis⁶.

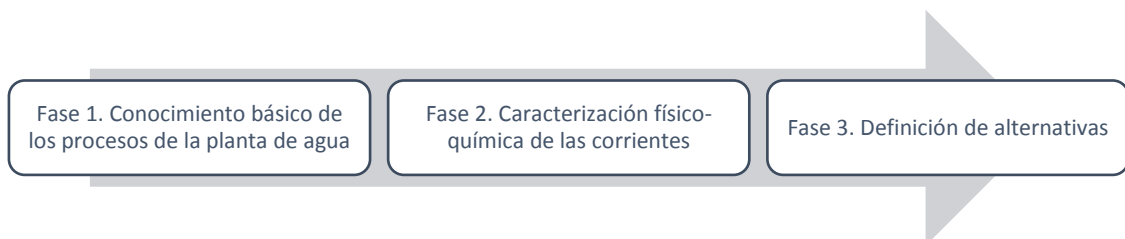
El **pH** indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una sustancia y representa las características ácidas o alcalinas del agua. Además, es importante controlarlo para evitar el deterioro de las membranas, ya sea de ultrafiltración u ósmosis inversa⁶.

⁷ METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales tratamiento vertido y reutilización. Volumen I Tercera edición. McGraw Hill. España.1996

3. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se especifican las fases de la metodología que se seguirá para realizar el proyecto y cumplir con el objetivo general planteado.

Figura 1. Fases de la metodología



3.1. FASE 1: CONOCIMIENTO BÁSICO DE LOS PROCESOS DE LA PLANTA DE AGUA.

Para cumplir el primer objetivo específico planteado se realizó un estudio de los manuales de operación de las unidades de proceso que componen la planta de agua⁸, facilitados por la empresa Ecopetrol S.A. [ANEXO A]; los reportes de la empresa asociada Lipesa S.A. y los informes de desempeño mensuales de las plantas⁹. Mediante las visitas de campo a la planta, se reconoció el funcionamiento de los procesos y equipos de clarificación, filtración, potabilización, ultrafiltración, ósmosis inversa, torres de enfriamiento y sistema contraincendios a cargo del departamento, así mismo, se identificó las corrientes residuales de proceso y los vertimientos. Se realizó el balance de agua general tomando como referencia los datos obtenidos a través de la herramienta PI¹⁰. Este programa es un complemento del software Excel®, mediante el cual se actualizan automáticamente los valores registrados por los medidores que se encuentran

⁸ ECOPETROL S.A. Manual de Descripción de Procesos de La unidad de Servicios Industriales Refinería (PSI). 2014. ECOGRB-PSI-MDPU-CA02.R/03/04.

⁹ ECOPETROL S.A. Informe Desempeño Plantas de Aguas mes a mes. (2018).

¹⁰ ECOPETROL S.A. Diagrama de Bloques Área Refinería Tratamiento de Agua Cruda Operación Normal. 2010. GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-209.

instalados en la planta, para así, llevar un seguimiento de las variables de control que son presentados en una hoja de cálculo¹¹.

3.2. FASE 2: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS CORRIENTES

Para llevar a cabo el segundo objetivo específico se fijó puntos de muestreo y se recolectaron las muestras de las diferentes corrientes residuales de cada proceso a intervenir. Se realizaron análisis de pH, turbiedad, alcalinidad, dureza, color, sílice, conductividad, microbiológicos entre otros, con la ayuda de la empresa aliada de químicos Lipesa S.A y el laboratorio del Departamento de Servicios Industriales. Asimismo, se determinaron parámetros como flujo volumétrico, frecuencia, temperatura y presión de los efluentes; se reconoció el factor problema a tratar de cada corriente analizada y se caracterizaron los lodos de clarificación para verificar el cumplimiento de la norma.

3.3. FASE 3: DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS

Finalmente, para desarrollar el tercer objetivo específico, se analizaron los resultados de la caracterización físicoquímica y los parámetros adicionales de las corrientes. Con base en lo anterior, se plantearon alternativas para reutilizar los efluentes. Se identificó el impacto de las iniciativas en los procesos mediante el seguimiento y control de las variables operacionales. Se consultaron en la plataforma RIS (*Refinery Information System*)¹², los valores de las guías y las ventanas operativas como marco de referencia de la calidad del agua de cada proceso, [ANEXO B]. Se realizó una prueba en campo de una alternativa y se especificó los cambios en la filosofía operacional. Se consultó los valores de costo de los diferentes tipos de agua producida [ANEXO C]. Se realizó una simulación en el software LewaPlus®, el cual permite la planificación de sistemas

¹¹ ECOPETROL S.A. Diagrama grande de control (DGC) tratamiento de aguas.

¹² ECOPETROL S.A. RIS – Reporte Rondas, Analista U-850, Registro de parámetros Físicoquímicos del agua. <http://ris80.gcb/integracion/AccesoRis/MainRIS.aspx>

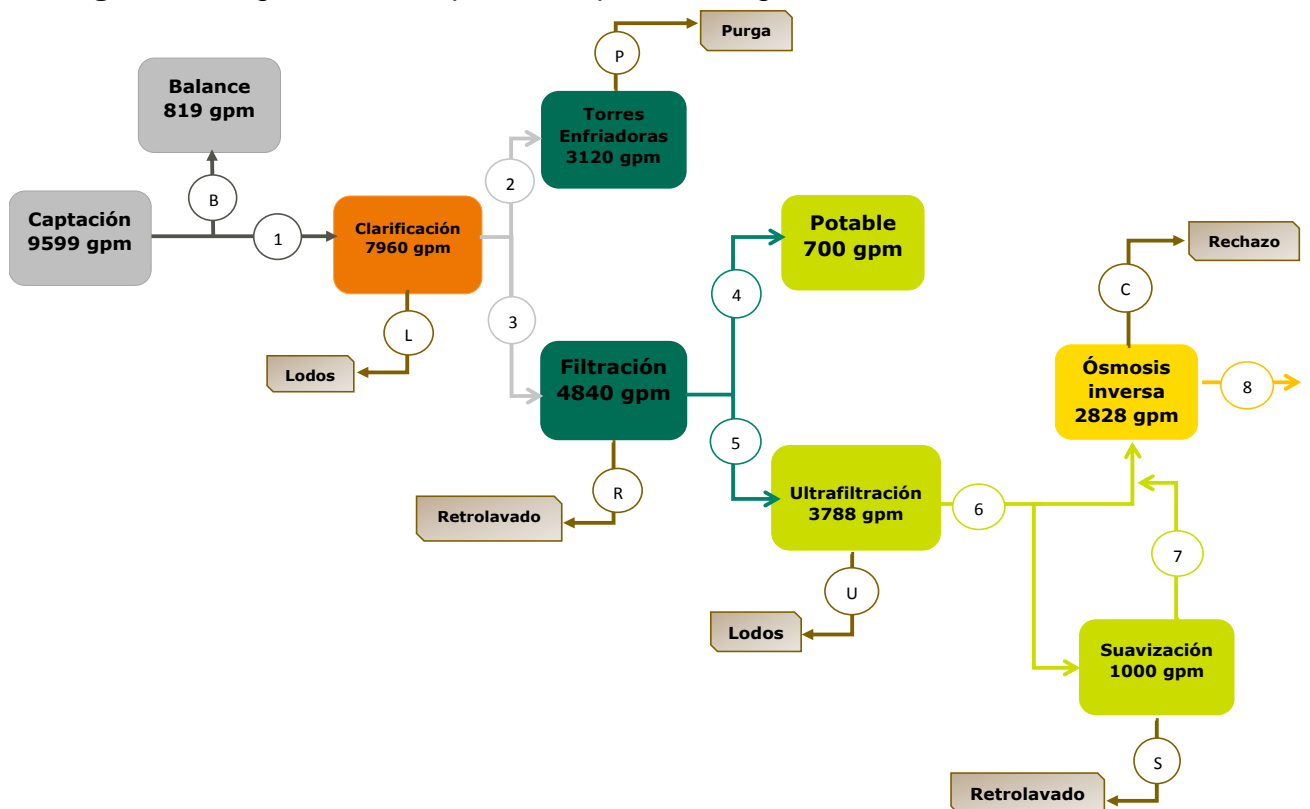
ósmosis inversa (RO) para configuraciones de procesos exclusivas solo con la tecnología de productos Lewabrane®.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. FASE 1. CONOCIMIENTO BÁSICO DE LOS PROCESOS DE LA PLANTA DE AGUA

En la Figura 2 se presenta el respectivo diagrama de bloques de los procesos y el balance de agua de la planta de agua del Departamento de Servicios Industriales, que se realizó tomando como referencia los datos registrados en la herramienta PI, con el fin de conocer la cantidad de flujo con el que opera cada proceso y determinar el volumen de agua que se debe recuperar [ANEXO C].

Figura 2. Diagrama de bloques de la planta de agua



4.2. FASE 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LAS CORRIENTES

Se realizó un registro de la caracterización de las diferentes corrientes a tratar durante 2 semanas. [ANEXO D] Adicionalmente se caracterizó el agua clarificada, filtrada y ultrafiltrada. También se presentan los valores obtenidos de los análisis microbiológicos de cada corriente y su influencia en los procesos. [ANEXO E]

En esta fase se analizó la caracterización de las corrientes a intervenir presentada en la Tabla 1 y se especificó los parámetros más relevantes de cada corriente a tener en cuenta al momento de definir las alternativas de reúso. También se consideraron los parámetros presentados en la Tabla 22.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica general de las corrientes de desecho de los procesos

Parámetro	Agua piscina BA-800	Agua de rechazo de RO	Lodos de UF	Agua de retrolavado de filtros	Agua piscina BA-5404	Agua toma muestras	Agua enfriamiento
pH	8,1	8,1	8,1	7,7	8,3	8	7,8
Turbiedad (NTU)	30	0,1	20	60 – 480	0,2	1,3	1,8
Alcalinidad (ppm)	159	203	57	55	81	55	51
Dureza (ppm)	178	255	93	86	89	48	80
Color (ppm)	269	8	121	180 - 800	10	12	45
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	410	524	138	129	202	123	134
Sílice (ppm)	42	58	13	46	26	13	15

- ✓ Agua de la piscina BA-800: El alto contenido de dureza y de alcalinidad sumado al gran volumen de almacenamiento de la piscina, hace difícil tratar la mezcla de todas las corrientes que descargan allí, por lo tanto es mejor individualizar las corrientes.
- ✓ Agua de rechazo de RO: El parámetro que dificulta la recuperación de esta corriente es el alto contenido de dureza que posee, y que su flujo es constante.
- ✓ Lodos de UF: En esta corriente, el valor de la turbiedad es clave al momento de determinar una alternativa de recuperación, así mismo, el contenido de dureza que posee.

- ✓ Agua de retrolavados de filtros de arena y antracita: Esta corriente en particular tiene un rango de turbiedad encuentra entre 60 – 300 NTU, en consecuencia, es importante considerarlo al plantear una iniciativa de reúso.
- ✓ Agua de la piscina BA-5404: En este flujo de agua el valor de la dureza es apropiado valorarlo.
- ✓ Agua toma muestras y agua de enfriamiento: La mezcla de corrientes que conforman este efluente hace que los valores de sus parámetros fisicoquímicos demuestren que se puede reusar en otros procesos.

En la Tabla 2, se encuentran los resultados para cada especie según el balance másico de los contaminantes fisicoquímicos presentes en los lodos del proceso de clarificación, con el fin de establecer el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015. [ANEXO F] Todos los valores reportados a excepción de los SST tienen signo negativo, lo cual se traduce en que el contenido en el río es mucho mayor que el vertido por los lodos.

Tabla 2. Comparación de la concentración de las especies en el río y en los lodos

Especie	Concentración [mg/l]		Valor máximo (Resolución)
	Lodos	Río	
Al [mg/L]	-11,730	3	3
Ca [mg/L]	-14,064	NA	NA
Cu [mg/L]	-0,006	1	1
Fe[mg/L]	-5,210	3	3
Mg [mg/L]	-2,348	NA	NA
Mn [mg/L]	-0,034	NA	NA
Na [mg/L]	-5,248	NA	NA
P [mg/L]	-0,189	NA	NA
S [mg/L]	-4,556	NA	NA
Si [mg/L]	-28,604	NA	NA
Zn [mg/L]	-0,046	3	3
SST [mg/L]	509,222	NA	NA

NA: no aplica o no se encuentra especificado en la norma

El contenido de aluminio, calcio, magnesio, manganeso, sodio, fósforo, azufre, y silicio, no se encuentran especificados dentro de la normatividad. Para las especies

cobre, hierro y zinc, los valores obtenidos son aceptados por la norma, ya que la concentración reportada en los lodos es menor que la del río, es decir, la masa vertida es menor a la masa captada, generando una acumulación en el clarificador y cierto contenido en el agua clarificada.

4.3. FASE 3. PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

4.3.1. Agua de rechazo de ósmosis inversa. Se presentan las alternativas planteadas para la corriente de rechazo del proceso de ósmosis inversa.

4.3.1.1. Primera alternativa. La alternativa que se plantea para recuperar el efluente de rechazo de ósmosis inversa, es adicionar esta corriente al cabezal de agua de restitución para las torres de enfriamiento, normalmente el agua de restitución es agua clarificada y se envían aproximadamente 3100 gpm. Se mezclaron 90 ml de agua de rechazo y 220 ml de agua clarificada, proporción que se estimó gracias al balance de agua, para conocer las condiciones en las cuales ingresaría a las torres¹³.

En la Tabla 3 se detallan los resultados de la mezcla. Los valores de pH, turbiedad, y color, se encuentran dentro del rango operacional de las torres, además, al comparar su caracterización con la del agua clarificada, se evidencia que solo varían los parámetros de dureza, alcalinidad y conductividad [ANEXO G].

Tabla 3. Caracterización general del agua mezclada para restitución

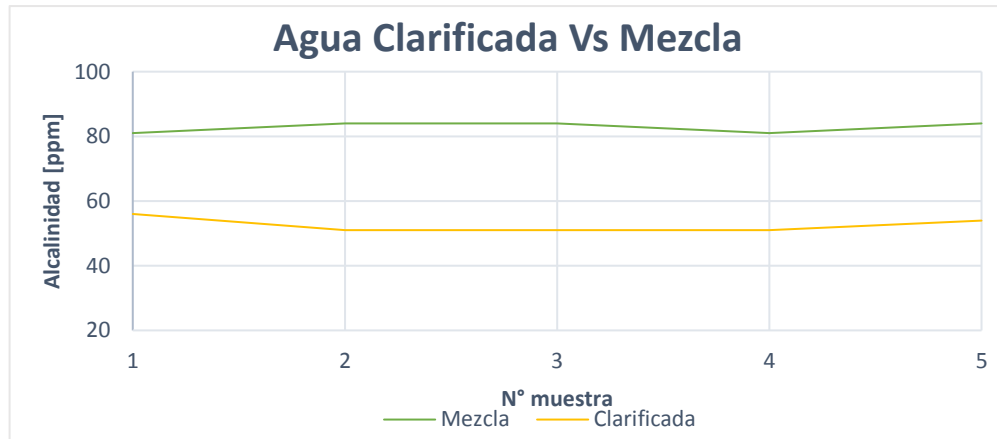
Parámetro	pH	Turbiedad NTU	Alcalinidad [ppm]	Dureza [ppm]	Color [ppm]	Conductividad [µs/cm]	Sílice [ppm]
Mezcla	7,9	3,3	84	120	36	304	22
Clarificada	7,9	4,8	54	75	43	134	15

De la Figura 3 se puede deducir que los valores de alcalinidad del agua clarificada se encuentran entre 50 ppm y 60 ppm, mientras que los de la mezcla están en un

¹³ ECOPETROL S.A. Descripción proceso de RO. 2010. 09009-D-TR-0001.

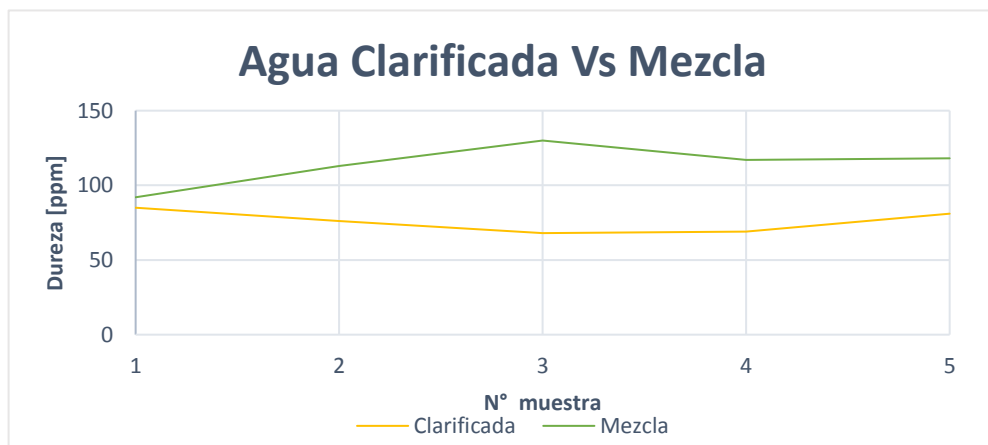
rango de 80 ppm a 85 ppm, sin embargo, sus valores son menores a 150 ppm, que es el valor máximo aceptado para el agua de restitución de las torres.

Figura 3. Comparación de la alcalinidad del agua clarificada y la mezcla realizada de agua de rechazo de ósmosis inversa.



En la Figura 4 se demuestra que los valores de dureza del agua clarificada son menores que los de la mezcla, lo cual representará una disminución en los ciclos de operación, un aumento de concentración en las torres de enfriamiento y un aumento en la frecuencia de las purgas. El valor máximo de dureza permitido en el agua de restitución de las torres es de 150 ppm.

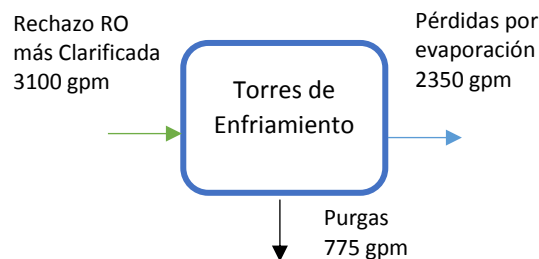
Figura 4. Comparación de la dureza del agua clarificada y la mezcla realizada.



Balance de masa

En la Figura 5 se representa el balance de agua de las torres de enfriamiento. De los 900 gpm que ingresarían al cabezal de agua clarificada, solo 694 gpm se recuperarían como agua de enfriamiento para las torres, es decir 364.766 Kgal/año¹⁴.

Figura 5. Balance de agua de las torres



El rango operacional de las torres es de 4 a 8 ciclos de concentración, pero es deseable operar con un valor intermedio y así evitar que se concentre la torre, aumentando el contenido de dureza y conductividad en el agua. Al disminuir el número de ciclos se incrementará el flujo de agua en las purgas. Se realiza un análisis del funcionamiento de las torres de enfriamiento [ANEXO H]¹⁵.

Para un número de 4 ciclos, con una concentración inicial de dureza de 120 ppm de C_aCO_3 en el agua de restitución, se obtiene una concentración de 480 ppm en el agua de recirculación, el valor máximo aceptado de concentración de dureza es de 500 ppm en el agua de recirculación.

4.3.1.2. Segunda alternativa. La iniciativa que se propone es enviar la corriente de rechazo de ósmosis concentrada en sales a una nueva unidad de ósmosis inversa¹⁶, con el fin de producir agua que se combine con el agua

¹⁴ ECOPETROL S.A. Descripción proceso de RO. 2010. 09009-D-TR-0001.

¹⁵ ECOPETROL S.A. Filosofía de operación de las torres de enfriamiento. Barrancabermeja. 2001.

¹⁶ SUNG Hee Joo, BERRIN Tansel. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review. Journal of Environmental Management. Elsevier Ltd.150 322-335. 2015.

ultrafiltrada y alimentar a la actual unidad de ósmosis, para así, prescindir del proceso de suavización, de igual manera, se evitarían todos los costes operativos y acciones de mantenimiento que se requieren para producir agua suavizada. Al mismo tiempo reducir el volumen de agua de rechazo para un posterior tratamiento de cristalización o unión de esta corriente con la salida de PTAR.¹⁷¹⁸

Se realizó una simulación en conjunto con la empresa Mathiesen, quien facilitó el software LewaPlus®. Este simulador se utilizó para predecir la configuración de la unidad de ósmosis inversa, la operación del sistema y la calidad del agua permeada y de rechazo. Las condiciones del agua de rechazo de RO como alimentación a la nueva unidad de ósmosis inversa fueron: Dureza de 200 ppm, sílice 59 ppm, 1051 ppm de TDS, una presión de 124 psi y 900 gpm, se espera una recuperación del 75%.

Mediante la simulación se obtuvo como resultado que el volumen de concentrado disminuye de 900 gpm a 225 gpm, con un valor de dureza de 795 ppm. Se recuperarán 675 gpm que se mezclarán con el agua de alimentación de la actual unidad de ósmosis. El permeado obtenido reporta una conductividad de 22 µs/cm, una dureza de 1,6 ppm y una concentración de 1,049 ppm de sílice [ANEXO I]. La nueva mezcla de agua combinada ingresaría con un valor de 60 ppm, considerando que actualmente el agua ingresa con un valor de dureza de aproximadamente 62 ppm, es factible prescindir del proceso de suavización.

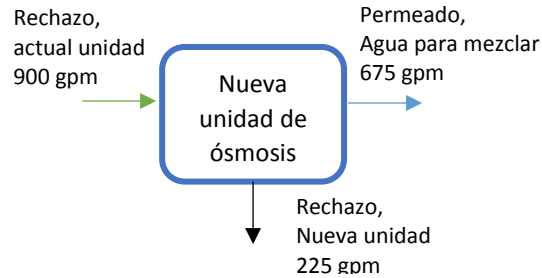
Balance de masa

En la Figura 6 se observa el balance de agua en el cual se recuperaran 675 gpm de la corriente de rechazo.

¹⁷ SUBRAMANI, Arun; JACANGELO, Joseph G. Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. Separation and Purification Technology. Elsevier Ltd.122 472–489. 2014.

¹⁸ A. PEREZ GONZALEZ, A.M. URTIAGA, R. IBAÑEZ, I. ORTIZ. State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates, water research 46 267- 283. Universidad de Cantabria.2012.

Figura 6. Balance de masa



En la Tabla 4 se comparan las dos alternativas planteadas evaluadas en cuatro ámbitos, razones por las cuales, la alternativa número dos sería la más factible, ya que se evitaría correr el riesgo de alterar el funcionamiento de las torres y la calidad del agua para el sistema de enfriamiento debido a que el contenido de dureza puede provocar incrustaciones y que la torre se concentre debido al aumento de la conductividad.

Tabla 4. Tabla comparativa de las alternativas de solución.

Agua de rechazo de ósmosis inversa	Primera alternativa	Segunda alternativa
Posibles inconvenientes	Concentración de las torres, disminución de los ciclos.	Agua de rechazo con una concentración de 800 ppm de dureza.
Galones recuperados	694 gpm	675 gpm
Costo de implementación	Medio	Alto
Beneficio	Ahorro de \$1.907.363.505 al año de agua clarificada	Eliminar proceso de suavización

4.3.2. Lodos de ultrafiltración. Se presentan las alternativas planteadas para la corriente residual del proceso de ultrafiltración.

4.3.2.1. Primera alternativa. La alternativa que se plantea es alinear la corriente de lodos de ultrafiltración hacia los pozos claros de los clarificadores de la U-850. Se realizó una mezcla de 25 ml de lodos de UF y 225 ml de agua clarificada, asemejando la proporción de agua entre los dos efluentes si se distribuye en dos pozos claros (60% llenos).

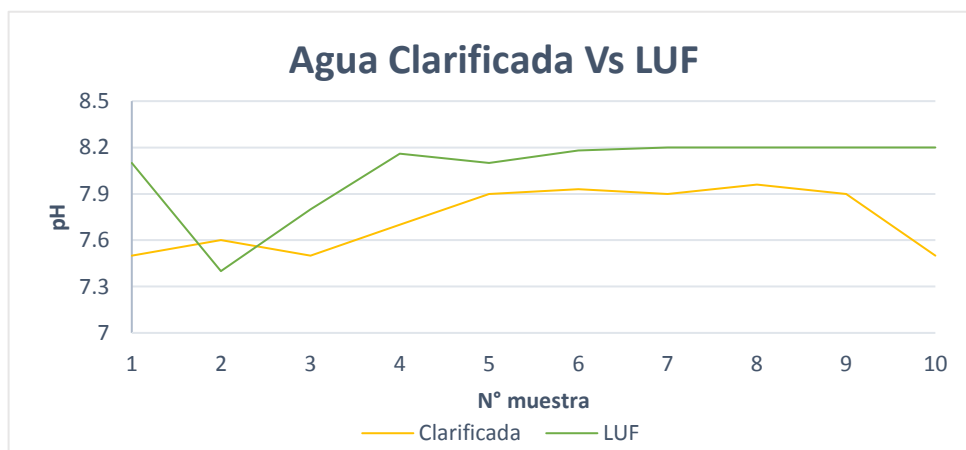
Los resultados obtenidos en la Tabla 5, demuestran que al realizar la mezcla de los dos tipos de agua, los valores de pH, alcalinidad y conductividad son iguales a los del agua clarificada. Los valores de turbiedad se encuentran dentro del valor máximo de la ventana operativa del agua clarificada que es 10 NTU, los cuales, pueden disminuir si se distribuye el flujo en los pozos claros de tres clarificadores, además, depende del nivel de llenado en que se encuentre el pozo. Se realizó un registro a los valores de la turbiedad a través del tiempo que dura la extracción de lodos (10 min) para determinar su comportamiento. [ANEXO J].

Tabla 5. Caracterización de la mezcla, del agua clarificada y de los lodos de ultrafiltración.

Parámetro	Mezcla	Clarificada	LUF
pH	7,7	7,7	8,1
Turbiedad (NTU)	5,4	4,8	20
Alcalinidad (ppm)	57	54	57
Dureza (ppm)	83	75	93
Conductividad (ppm)	129	134	121

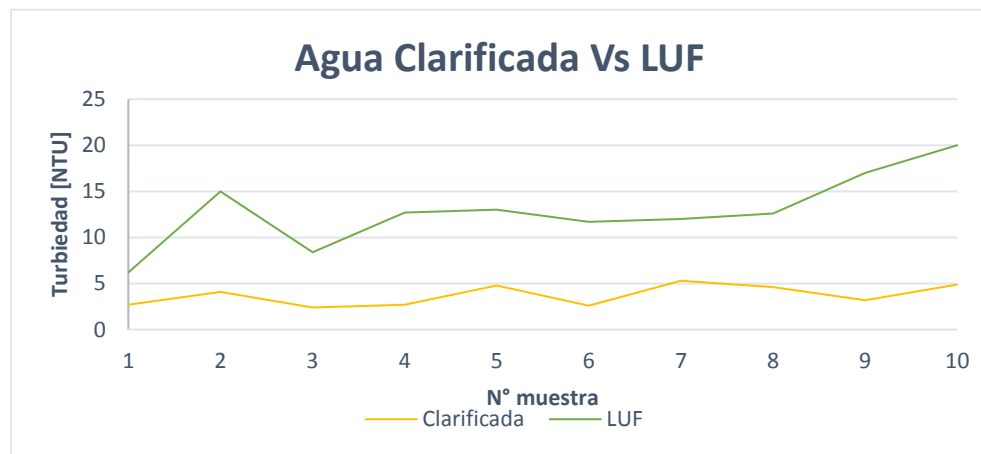
En la Figura 7 se evidencia que el comportamiento del pH de los lodos y del agua clarificada se encuentra dentro de un rango similar, además, su valor es menor que 8,5, el valor máximo de la guía de control, por lo tanto, no presentará un impacto en los posteriores procesos.

Figura 7. Comparación del pH entre el agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.



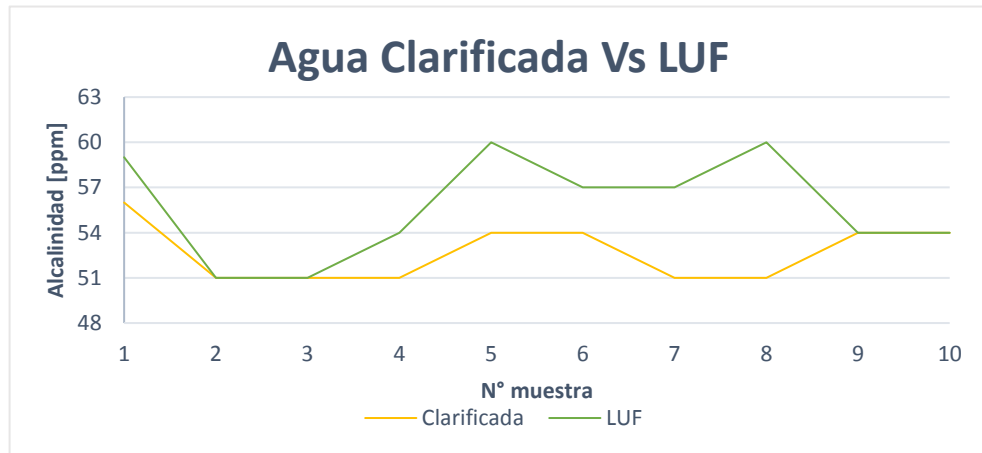
En la Figura 8 se analiza la variación de la turbiedad de los lodos de ultrafiltración. Sus valores se encuentran por encima de los del agua clarificada, de igual modo, en ocasiones se presenta una infracción al valor de la ventana operativa del agua clarificada (10 NTU) por lo tanto, no se puede afirmar que no se afectará el proceso de clarificación ni la calidad del agua para procesos posteriores. No obstante, si la corriente se divide en varios clarificadores podría diluirse y disminuir la turbiedad.

Figura 8. Comparación de la turbiedad entre el agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.



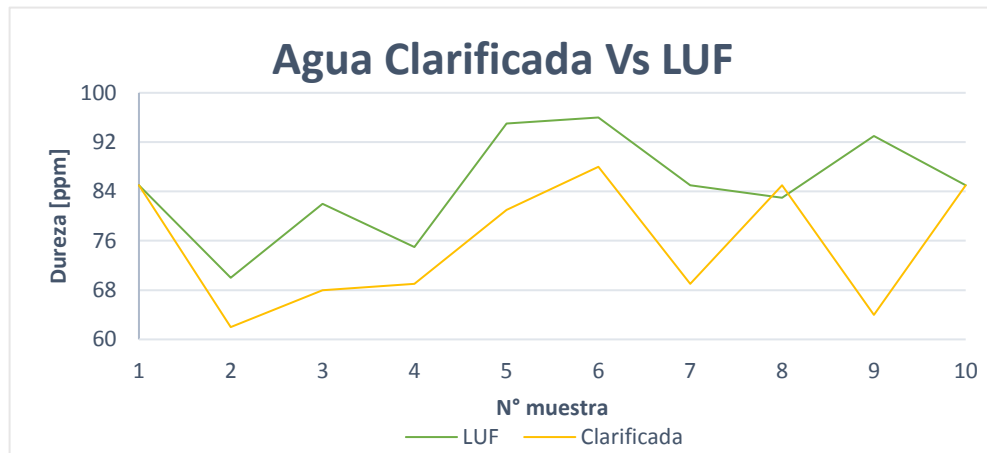
En la Figura 9 se registra la tendencia de la alcalinidad de los lodos de ultrafiltración, se evidencia que sus valores son mayores que los del agua clarificada, sin embargo, su valor se encuentra dentro de la guía de control, que es 95 mg/l C_aCO_3 , por lo tanto no se verá afectada la calidad del agua ni creará depósitos en las tuberías.

Figura 9. Comparación de la alcalinidad del agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.



Al comparar los valores de dureza del agua clarificada y de los lodos de ultrafiltración obtenidos en la Figura 10 se determina que si bien en su comportamiento se presentan picos crecientes que llegan hasta valores de 95 ppm, en general su comportamiento se mantiene dentro del mismo rango del agua clarificada, por lo tanto, al hacer la mezcla su valor se encontrará dentro del valor de la guía de control.

Figura 10. Comparación de la dureza del agua clarificada y los lodos de ultrafiltración.



4.3.2.2. Segunda alternativa. Se propone descargar los lodos provenientes de ultrafiltración en la zona de reacción de los clarificadores de la U-850 y así pasar por el proceso de clarificación para mejorar su turbiedad. [ANEXO K]. Se realizó una mezcla de 150 ml de lodos de UF y 240 ml de agua de río, asemejando la proporción de los flujos, un flujo de 1100 gpm de lodos que ingresará a la zona de reacción de un clarificador para mezclarse con un flujo de aproximadamente 1800 gpm de agua de río que es lo que normalmente trabaja un clarificador¹⁹.

En la Tabla 6 se consignan los valores obtenidos de los análisis realizados. De los parámetros que se midieron, el más importante es la dureza, debido a que podría concentrar el proceso y causar posibles inconvenientes, el valor que se obtuvo en la mezcla se encuentra dentro de la guía de control y podría incluso disminuir si se divide el flujo de los lodos en más de un solo clarificador.

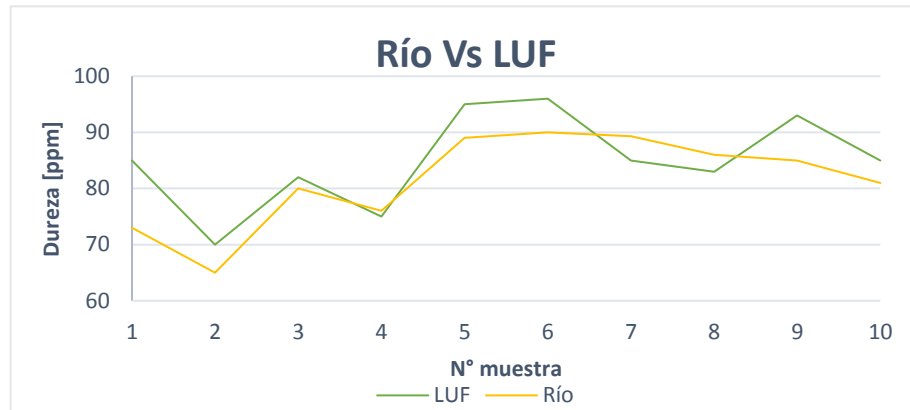
Tabla 6. Características de la muestra resultante y del río

Parámetro	pH	Alcalinidad [ppm]	Dureza [ppm]
Mezcla	8	57	85
Río	7,7	54	75

En la Figura 11 se encuentra la trazabilidad de los valores de dureza en los lodos, los cuales están por encima de los del río, sin embargo, la guía de control tiene un valor límite de 150 ppm, por lo tanto, la dureza de los lodos es aceptable para recuperarlos en el proceso de clarificación sin causar incrustaciones.

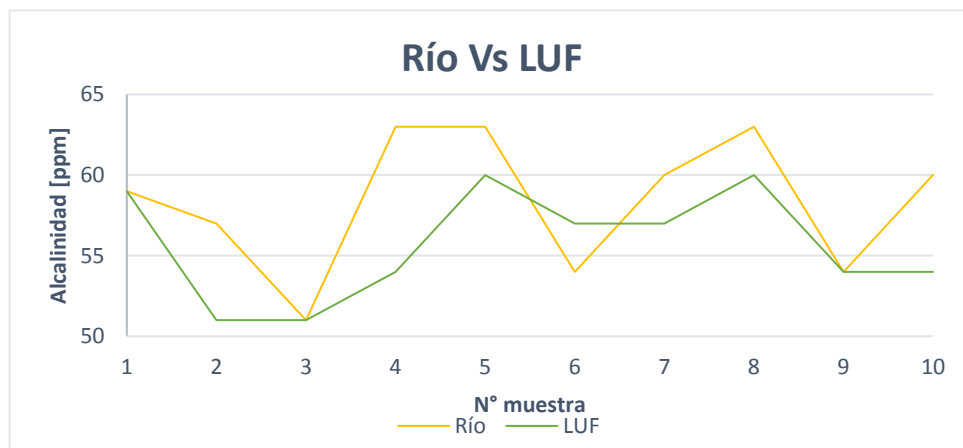
¹⁹ ECOPEL S.A. Descripción proceso de UF (2010). 09009-D-TR-0002.

Figura 11. Comparación de la dureza entre el agua del río y los lodos de ultrafiltración.



En la Figura 12 se registra la tendencia de la alcalinidad de los lodos de ultrafiltración, la cual presenta valores menores que los del agua del río, sin embargo, por lo general se encuentran en el rango de 55 ppm a 60 ppm, dentro del cual también se mantiene el agua de río, además, no superan las 120 ppm, el valor máximo de la guía de control, por lo tanto no alterarán la clarificación del agua.

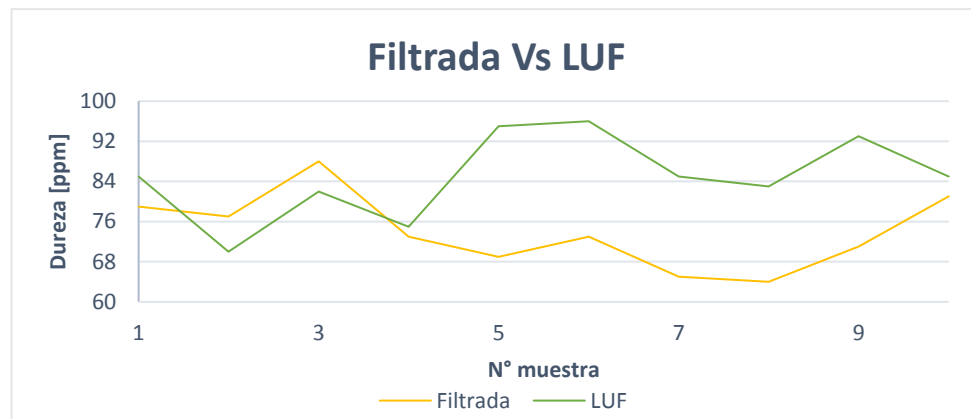
Figura 12. Comparación de la alcalinidad del agua del río y los lodos de ultrafiltración.



4.3.2.3. Tercera alternativa. Se plantea diseñar un filtro que disminuya el valor de la turbiedad a los lodos y se pueda recuperar como agua filtrada e ingresarlo nuevamente al proceso de ultrafiltración. Para ello se realizaron pruebas de filtración al vacío, con el fin de determinar el tamaño de poro adecuado para ajustar la calidad del agua. En la Tabla 39 se consignan los valores obtenidos, de los cuales fue

escogido el que tiene 0,45 µm de tamaño de poro. En la Tabla 40 se especifican las condiciones de diseño y operación del filtro. [ANEXO L] En la Figura 13 se determina que los valores de dureza de los lodos de ultrafiltración se encuentran por debajo del valor máximo de la guía de control de agua filtrada, que es 130 ppm, por lo tanto, no concentrará el proceso de ultrafiltración²⁰.

Figura 13. Comparación de la dureza del agua filtrada y los lodos de ultrafiltración



Balance de masa

$$1100 \text{ gpm} * 6 \text{ min} = 6600 \text{ gal} * \frac{2 \text{ veces}}{\text{día}} = 13200 \frac{\text{gal}}{\text{día}} * \frac{365 \text{ día}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ Kgal}}{1000 \text{ gal}} = 4818 \frac{\text{Kgal}}{\text{año}}$$

Con el funcionamiento de los tres trenes de ultrafiltración, la cantidad de lodos drenados al día es de 39600 galones en total.

En la tabla 7 se realiza la comparación de las tres alternativas planteadas. Teniendo en cuenta los parámetros analizados, en especial la turbiedad y la dureza, se determina que la segunda propuesta es la más factible, debido a que no genera riesgos en la operación, adicionalmente su costo es bajo y se recupera en su totalidad el flujo de agua. Asimismo, al realizar la multiplicación de los Kgal/año por

²⁰ BART VAN DER BRUGGEN, LIESBETH LEJON, CARLO VANDE CASTEELE. Reuse, Treatment, and Discharge of the Concentrate of Pressure-Driven Membrane Processes. Laboratory for Environmental Technology, Department of Chemical Engineering, W. de Croylaan 46, B-3001 Heverlee, Belgium.2003

el costo de cada tipo de agua se encuentra el valor que se ahorrará en producir cada tipo de agua.

Tabla 7. Tabla comparativa de las alternativas de solución

Lodos de ultrafiltración	Primera alternativa	Segunda alternativa	Tercera alternativa
Posibles inconvenientes	Violación de la guía de control de la turbiedad	Ninguno establecido	Afectación de membranas
Galones recuperados	39600 gal	39600 gal	39600 gal
Costo de implementación	Bajo	Bajo	Medio
Beneficio	Ahorro de \$72.270.000 al año como agua clarificada	Disminución del valor de captación y ahorro de \$17.445.978 al año.	Ahorro de \$79.497.000 al año como agua filtrada

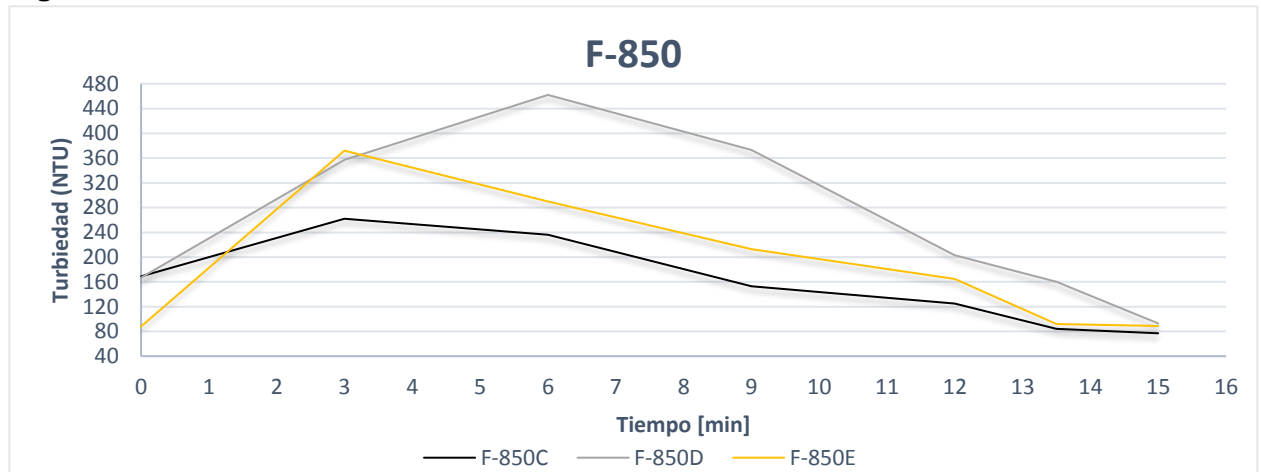
4.3.3. Agua de retrolavados de filtros de arena y antracita. Se presentan las alternativas planteadas para la corriente residual del proceso de filtración.

4.3.3.1. Alternativa de recuperación para la U-850. La alternativa que se plantea es enviar esta corriente a la zona de reacción de los clarificadores. En la U-850 se pudo utilizar una tubería en desuso para direccionar el flujo de los retrolavados de los filtros hacia la zona de reacción de los clarificadores²¹, motivo por el cual, se realizó una prueba en campo para evaluar el impacto que puede tener en el proceso de clarificación, esta prueba resultó factible. [ANEXO M]. La variable que se controló fue la turbiedad del agua durante el tiempo de residencia del agua en el clarificador, la cual siempre fue menor que el valor de la guía de control (10 NTU). Al no afectar la calidad del agua clarificada con la adición del flujo de los lavados, se creó un ciclo cerrado y cero descargas en el proceso de filtración, por lo tanto, se adoptó este procedimiento para la operación de la planta. En la Figura 14 se registran las corridas de turbiedad de algunos de los filtros de la U-850, que se realizaron con el fin de conocer su comportamiento y el rango de turbiedad durante el tiempo del lavado, el cual es menor al rango de turbiedad del agua del

²¹ ECOPEPETROL S.A. Diagrama (P&ID) área refinería Planta de Agua Filtración U-850. (2010). GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-103

río. Debido a la compatibilidad de parámetros como pH, alcalinidad, dureza y conductividad entre el agua del río y la de los retrolavados, se garantiza que la calidad del agua clarificada no cambiará sus propiedades fisicoquímicas²².

Figura 14. Corridos de turbiedad de los filtros de la U-850

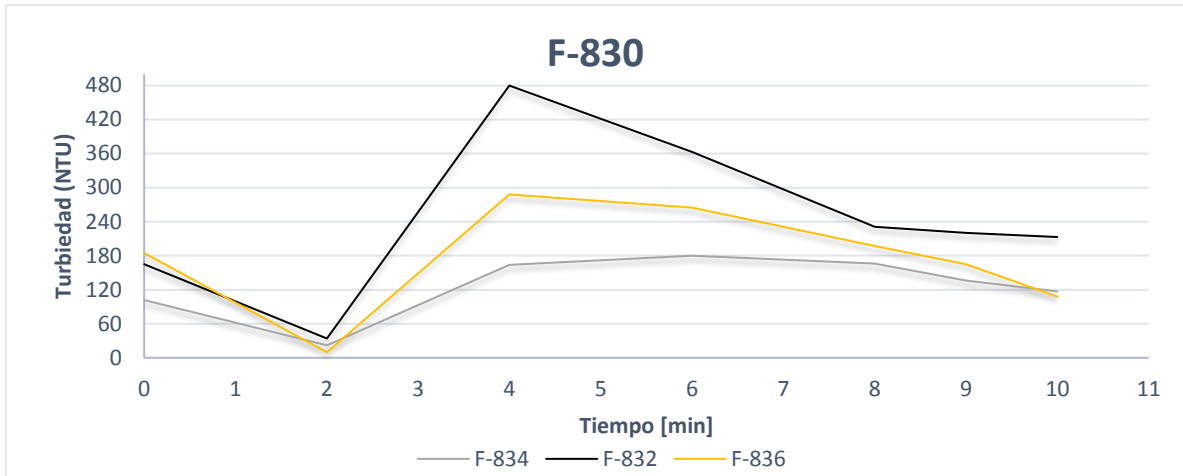


4.3.3.2. Alternativa de recuperación para la U-830. La alternativa que se plantea es enviar el flujo de los retrolavados de los filtros a la zona de reacción de los clarificadores de la U-800. En la Figura 15 se analiza la tendencia de las corridas de turbiedad y se determina que su rango de turbiedad (60 NTU – 480 NTU), se encuentra dentro del mismo de los filtros de la U-850, con los cuales se realizó la prueba. Esto quiere decir que, de igual manera es factible enviar este flujo a la zona de reacción y así crear un ciclo cerrado recuperando el agua²³.

²² TRILLOS, Jorge Ivan. Evaluación del uso del agua en las áreas de refinación de crudos y petroquímica de la GCB. Universidad Industrial de Santander. 2002

²³ ECOPETROL S.A. Diagrama (P&ID) área refinería Planta de Agua centralizada Filtración y Potabilización de agua. (2010). GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-106.

Figura 15. Corridos de turbiedad de los filtros de la U-830



En la Tabla 8 se registran los resultados obtenidos de la caracterización de las dos corrientes. Sus valores de pH y alcalinidad son iguales. Asimismo, se determinó que la calidad del agua de los retrolavados es superior que la del río, por lo tanto, es factible implementar esta alternativa de recuperación.

Tabla 8. Caracterización del agua cruda y de los retrolavados

Parámetro	Río	Retrolavados
pH	7,7	7,7
Turbiedad (NTU)	150 - <10000	60 - 480
Alcalinidad(ppm)	54	55
Dureza(ppm)	75	86
Conductividad ($\mu s/cm$)	150 - 250	129
Sílice (ppm)	15	32

Balance de masa

$$\begin{aligned}
 & \text{Lavado de filtros } U - 850 \\
 & \frac{700gal}{min} * 15min = 10500gal * \frac{5filtros}{día} \\
 & \qquad \qquad \qquad = \frac{52500gal}{día}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Lavado de filtros } U - 830 \\
 & \frac{900gal}{min} * 10min = 9000gal * \frac{8Filtros}{día} * \\
 & \qquad \qquad \qquad = \frac{72000gal}{día}
 \end{aligned}$$

Ahorro estimado

$$72000 + 52500 = 124500 \frac{\text{gal}}{\text{día}} * \frac{365 \text{días}}{\text{año}} * \frac{1 \text{Kgal}}{1000 \text{gal}} = \frac{45.443 \text{Kgal}}{\text{año}} * 1207 \frac{\$}{\text{Kgal}} = 54.849.701 \frac{\$}{\text{año}}$$

Se disminuirá 45.443 Kgal al año al valor de captación del río, este valor se calcula con base a una frecuencia de lavado de 24h para cada filtro, por lo tanto, esta cantidad puede aumentar dependiendo de las circunstancias de la operación y la frecuencia de lavado. Se generaría un ahorro de \$54.849.701 anuales, al no tener que transportar desde del río este volumen de agua.

4.3.4. Agua de toma muestras y agua de enfriamiento. La alternativa que se plantea es realizar el retrolavado de los filtros de la U-850 con el agua que se almacena en la piscina BA-855 y dejar de usar agua filtrada para esta operación. Se implementó una tubería en PVC para que descargue en la piscina BA-855 todos los efluentes de toma muestras procedentes del cuarto de análisis de la U-850 y se construyó una tubería en acero al carbón que transporta el agua de enfriamiento de los aires acondicionados de la U-850 hacia la BA-855 para así aprovechar este volumen de agua.²⁴

Se realizó una caracterización de estas dos corrientes para evaluar la calidad del agua y su factibilidad en el proceso de lavado de filtros, vale aclarar que la muestra se tomó manteniendo cerrada la válvula del efluente de agua de río. En la Tabla 9 se demuestra que los parámetros fisicoquímicos, en especial la alcalinidad, el pH, la conductividad y el contenido de sílice del agua de los toma muestras y el agua de enfriamiento no presenta una diferencia frente a los valores de agua filtrada con que se lavan los filtros, por lo tanto, se puede reemplazar el agua filtrada para realizar esta acción.

²⁴ TRILLOS, Jorge Ivan. Evaluación del uso del agua en las áreas de refinación de crudos y petroquímica de la GCB. Universidad Industrial de Santander.2002

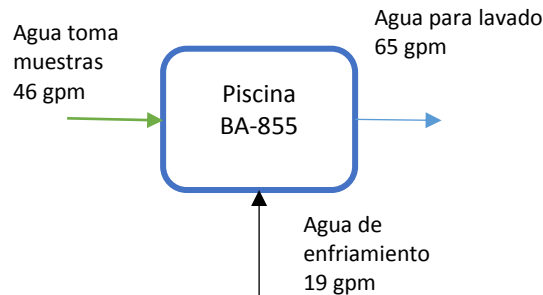
Tabla 9. Caracterización de agua de toma muestras, enfriamiento de los AA y filtrada

Parámetro	Toma muestras	Agua Enfriamiento	Filtrada
pH	7,75	7,85	7,68
Turbiedad (NTU)	1,4	1,8	0,2
Alcalinidad (ppm)	54	51	48
Dureza (ppm)	48,7	81,1	68
Color (ppm ptco)	20	20	6
Conductividad ($\mu s/cm$)	120	134	134
sílice (ppm)	14,2	15,4	16

Balance de masa

En la Figura 16 se presenta el balance de agua, con el cual se determina que si se utiliza este flujo de agua para lavar los filtros se recuperan 34.164 Kgal al año.

Figura 16. Balance de masa



La piscina BA-855 con solo agua de los toma muestras se llena en aproximadamente 4 horas, un tiempo relativamente largo para alcanzar a lavar todos los filtros de U-850 durante el día. Por lo tanto, se le adicionó el flujo de agua de enfriamiento de los aires acondicionados, con lo cual se redujo el tiempo de llenado a 2.5 horas.

Al disminuir el tiempo de llenado de la BA-855 la frecuencia de lavado de los filtros disminuiría a 15 h, con lo cual se mejoraría la superficie del lecho, evitando que se creen filtraciones en él. Además, se crea un ciclo cerrado al enviar este volumen de agua hacia la zona de reacción de los clarificadores.

Para evitar tener que lavar filtros cada vez que se llene la piscina BA-855, se puede construir una tubería auxiliar a la tubería principal de lavado, hacia los pozos claros de los clarificadores de U-850 [ANEXO N].

Ahorro estimado

$$65 \frac{gal}{min} * \frac{60min}{h} * \frac{24h}{día} * \frac{365días}{año} * \frac{1Kgal}{1000gal} = \frac{34.164Kgal}{año} * \frac{5500\$}{Kgal} = \frac{187.902.000\$}{año}$$

Al lavar los filtros con el agua de los toma muestras y de enfriamiento se genera un ahorro de \$187.908.000 al año. De igual forma, se dejarían de utilizar 34.164 Kgal/año de agua filtrada que servirá para la producción de agua desmineralizada.

4.3.5. Agua de la piscina BA-5404. En la unidad de UF/RO se encuentra ubicada la piscina BA-5404, donde se realiza la limpieza de las membranas, cuando no se realizan limpiezas, la piscina recibe el agua de los medidores en línea de pH y conductividad del permeado y el concentrado de cada paso y etapa de los trenes de ósmosis inversa.

Balance de masa

$$200 \frac{gal}{min} * 30min = 6000 gal * 2 = 12000 \frac{gal}{día} * \frac{365días}{año} * \frac{1Kgal}{1000gal} = \frac{4380Kgal}{año}$$

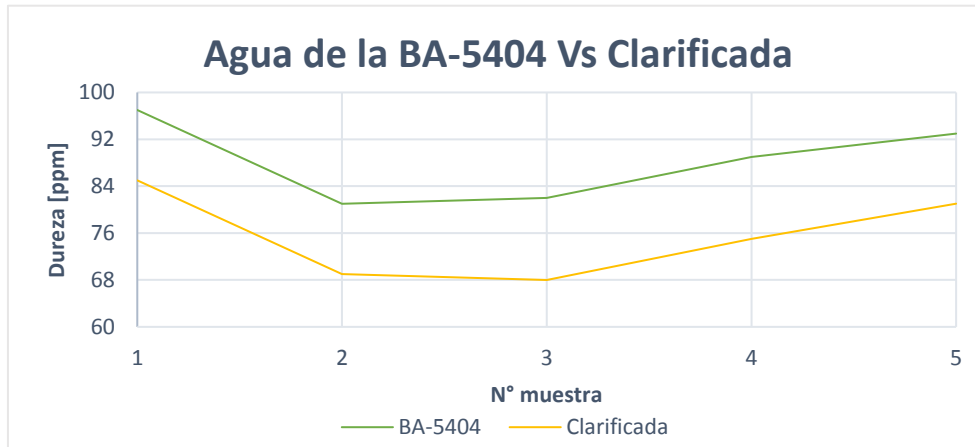
4.3.5.1. Primera alternativa. La propuesta que se plantea es enviar el agua de la BA-5404 a los pozos claros de los clarificadores de la U-850. Se realizó una mezcla de 250 ml de agua clarificada con 50 ml de agua de la piscina BA-5404, simulando la proporción de las dos corrientes, asumiendo que el pozo claro se encuentra un 60% lleno. Los resultados obtenidos en la Tabla 10 demuestran que el pH, la alcalinidad y la conductividad son parámetros que en los dos tipos de agua son similares, es decir, el agua de la mezcla cumple con los valores de las variables de las guías de control del agua clarificada.

Tabla 10. Tabla de datos de agua clarificada, de la piscina BA-5404 y su mezcla

Parámetro	Clarificada	BA-5404	Mezcla
pH	7,4	8,4	7,8
Turbiedad (NTU)	7,2	0,3	-
Alcalinidad (ppm)	51	75	54
Dureza (ppm)	69	89	73
Conductividad ($\mu s/cm$)	130	195	140

En la Figura 17 se analiza el comportamiento del contenido de dureza en el agua clarificada y el agua de la piscina BA-5404, por lo cual se concluye que aunque el rango de dureza del agua de la piscina es mayor que la del agua clarificada, no representará un impacto en el proceso, debido a que se encuentra dentro del valor máximo de la guía de control 150 ppm, adicionalmente, el volumen de agua de la piscina es solo el 5% del volumen del pozo claro, por lo tanto su aporte de dureza se mezclará con el del agua clarificada sin aumentar su valor.

Figura 17. Comparación de la dureza del agua clarificada y el agua de la piscina BA-5404



4.3.5.2. Segunda alternativa. Se plantea ingresar este volumen de agua a uno o distribuirla en los tres trenes de ultrafiltración. Se realizó la mezcla de las dos corrientes, simulando la proporción de los 6000 gal que entrarían a un tren con capacidad de 58700 galones. Su caracterización se registra en la Tabla 11 y se compararon sus parámetros fisicoquímicos con los del agua ultrafiltrada. Se determinó que su calidad no representará inconvenientes para el proceso, debido a que no se identifica una diferencia en sus parámetros de pH, turbiedad, dureza, conductividad y sílice de los dos tipos de agua.

Tabla 11. Tabla de datos de agua ultrafiltrada, piscina BA-5404 y la mezcla de estas corrientes

Parámetro	Ultrafiltrada	BA-5404	Mezcla
pH	7,7	8,4	7,8
Turbiedad (NTU)	0,2	0,3	-
Alcalinidad(ppm)	51	75	-
Dureza(ppm)	73	89	77
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	127	195	128
Sílice (ppm)	17	-	17

En la Tabla 12 se comparan las dos alternativas planteadas. La primera iniciativa es la más factible, debido a que no se afectaría la operación normal de los procesos, se recupera el mismo número de galones que en la otra alternativa y se genera un ahorro con un costo bajo de inversión. Asimismo al hallar el ahorro estimado de la multiplicación de los Kgal/año recuperados por el costo de cada tipo de agua, se comprueba que el ahorro en ambas alternativas no se diferencia.

Tabla 12. Tabla comparativa de las alternativas de solución.

Piscina BA-5404	Primera alternativa	Segunda alternativa
Posibles inconvenientes	Ninguno establecido	Afectación de membranas de ultrafiltración
Galones recuperados	12000 gal	12000 gal
Costo	bajo	Bajo
Beneficio	Ahorro de \$21.900.000 al año como agua clarificada	Ahorro de \$24.090.000 al año como agua filtrada

5. CONCLUSIONES

Se identificaron las corrientes residuales de cada proceso de la planta de agua del Departamento de Servicios Industriales, se caracterizaron y de acuerdo a su calidad se plantearon diversas alternativas para su recuperación comparando sus parámetros con los establecidos para cada tipo de agua. En el caso de la corriente de rechazo de la unidad de ósmosis la alternativa que mejor se ajusta es crear una nueva unidad de ósmosis. De igual forma, para la corriente de lodos de ultrafiltración la iniciativa más factible es enviar los lodos a la zona de reacción de los clarificadores. Del mismo modo, con el fin de reutilizar el agua de la piscina BA-5404 la opción más adecuada es depositarla en los pozos claros de los clarificadores.

Se proyectó la creación de un ciclo cerrado de agua al utilizar el agua de toma muestras y la de enfriamiento para lavar los filtros, asimismo, el agua que ha lavado los filtros y retirado las impurezas del lecho se deposita en la zona de reacción de los clarificadores para seguir con las posteriores etapas de tratamiento y generar agua desmineralizada. Por lo tanto, se logró eliminar los vertimientos en el proceso de filtración.

Con base en los resultados obtenidos de la medida de los contaminantes en los lodos de clarificación se estableció que las especies cobre, hierro y zinc se encuentran dentro de los valores establecidos por la norma vigente que los regula. Sin embargo, el contenido de aluminio, calcio, magnesio, manganeso, sodio, fosforo, azufre, y silicio, no se encuentran especificados dentro de la normatividad.

6. RECOMENDACIONES

De ser implementada la nueva unidad de ósmosis, se debe evaluar el impacto en PTAR al enviar la corriente concentrada de rechazo del nuevo tren de RO, para evitar posibles inconvenientes operacionales, ambientales y económicos. De igual manera si se llegase a implementar la alternativa de enviar el rechazo como agua de restitución a las torres, también se debe evaluar el impacto en PTAR, ya que aumenta la cantidad de purgas calientes de las torres y el agua sale con una concentración mayor. Asimismo, verificar que el tratamiento químico sea el adecuado para evitar inconvenientes en cuanto al estado de los activos a los cuales se les suministra esta agua de enfriamiento.

Mejorar el sistema de control de nivel de la piscina de lavado de filtros (BA-855) con el fin de hacer más práctico su control y optimizar la recuperación de agua dentro del proceso.

Como se planteó en la solución 4.3.3 en donde se demostró, que enviar el agua de los retrolavados a la zona de reacción es viable, al realizar la nueva línea para los retrolavados de los filtros y suavizadores de la U-830 es importante prever que los clarificadores de la U-800 no siempre se encuentran operando al tiempo, por lo tanto, es importante diseñar una tubería, ya sea hacia el CL-800C o hacia los clarificadores de la U-850.

Implementar un TAG del nivel del río y de la producción de agua clarificada en la herramienta PI con el objetivo de poder realizar un mejor seguimiento a estas variables y obtener un balance más preciso del consumo y la distribución del agua, ya que no se cuenta con un dispositivo que cuantifique la producción de agua clarificada.

BIBLIOGRAFÍA

ANDÍA, Yolanda. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico tratamiento de agua, coagulación y floculación. Perú, SEDAPAL. 2000.

ARBOLEDA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogotá D.C, McGraw-Hill. 2000.

BART VAN DER BRUGGEN, LIESBETH LEJON, CARLO VANDE CASTEELE. Reuse, Treatment, and Discharge of the Concentrate of Pressure-Driven Membrane Processes. Laboratory for Environmental Technology, Department of Chemical Engineering, W. de Croylaan 46, B-3001 Heverlee, Belgium.2003

CHEREMISINOFF, Nicholas. HANDBOOK OF WATER AND WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES. Butterworth-Heinemann. 2002

DUARTE V. Efraín Antonio, VIZCAÍNO S. Carlos Mario. Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial. Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad de La Salle. Bogotá D. C. 2015.

ECOPETROL S.A. Diagrama de Bloques Área Refinería Tratamiento de Agua Cruda Operación Normal. 2010. GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-209.

ECOPETROL S.A. Diagrama grande de control (DGC) tratamiento de aguas

ECOPETROL S.A. Diagrama (P&ID) área refinería Planta de Agua Filtración U-850. (2010). GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-103.

ECOPETROL S.A. Diagrama (P&ID) área refinería Planta de Agua centralizada Filtración y Potabilización de agua. (2010). GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-106.

ECOPETROL S.A. Descripción proceso de UF (2010). 09009-D-TR-0002

ECOPETROL S.A. Descripción proceso de RO. 2010. 09009-D-TR-0001

ECOPETROL S.A. Filosofía de operación de las torres de enfriamiento. Barrancabermeja. 2001.

ECOPETROL S.A. Informe Desempeño Plantas de Aguas mes a mes. (2018).

ECOPETROL S.A. Manual de Descripción de Procesos de La unidad de Servicios Industriales Refinería (PSI). 2014. ECOGRB-PSI-MDPU-CA02.R/03/04.

ECOPETROL S.A. RIS – Reporte Rondas, Analista U-850, Registro de parámetros Fisicoquímicos del agua. <http://ris80.gcb/integracion/AccesoRis/MainRIS.aspx>

FERNÁNDEZ, Sebastian Ignacio. Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. 2015.

METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales tratamiento vertido y reutilización. Volumen I Tercera edición. McGraw Hill. España.1996

PEREZ GONZALEZ, A.M. URTIAGA, R. IBAÑEZ, I. ORTIZ. State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates, water research 46 267- 283. Universidad de Cantabria.2012.

ROMERO, Jairo. Calidad del agua. 3 ed. E. Colombiana de Ingeniería. 2009

SUBRAMANI, Arun; JACANGELO, Joseph G. Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. Separation and Purification Technology. Elsevier Ltd.122 472–489. 2014.

SUNG Hee Joo, BERRIN Tansel. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review. Journal of Environmental Management. Elsevier Ltd.150 322-335. 2015

TRILLOS, Jorge Ivan. Evaluación del uso del agua en las áreas de refinación de crudos y petroquímica de la GCB. Universidad Industrial de Santander.2002

ANEXOS

ANEXO A: Descripción de los procesos de planta de agua

La información recopilada para realizar el análisis de las distintas alternativas fue tomada de los P&IDs, los documentos de filosofía operacional de las unidades, los informes de desempeño mensuales de las plantas, manuales de descripción de procesos del Departamento de Servicios Industriales, entre otras fuentes de información

En la etapa inicial se recopiló toda la información pertinente de los procesos que se llevan a cabo en las plantas de agua del Departamento de Servicios Industriales Refinería, la cual consiste en:

Captación: El agua cruda es captada del río Magdalena por medio de equipos de bombeo P-801L-Q, dispuestos en el bote del río que descargan a una presión de aproximadamente 30 psig y suministran el agua cruda a la unidades U-800/850 de Servicios Industriales Refinería, igualmente alimenta a la unidad de Servicios Industriales Balance.

Clarificación: El proceso de clarificación se lleva a cabo con el fin de remover los sólidos suspendidos, el color y la turbiedad del agua. Para este proceso se cuenta con 4 clarificadores tipo superpulsator en la U-850 [CI-850A-D] con capacidad de 2500 gpm y 3 en la U-800 [CL-800A/B con una capacidad de 2800 gpm y el CL-800C con una capacidad de 300 gpm]. El agua cruda proveniente del bote ingresa a cada clarificador por su respectiva línea donde se le dosifica el coagulante, Hidroxicloruro de aluminio. La mezcla de agua cruda y coagulante pasa por las válvulas de los controladores de nivel y por los transmisores de flujo, posteriormente pasa a la zona de mezcla lenta y luego al vertedero, donde se le agrega el Floculante Aniónico [Lipesa 1538 PWG].

El agua se envía a la campana de vacío, donde por medio de las pulsaciones hace que el agua cruda fluya al interior de cada clarificador y alimente los tubos

distribuidores. A continuación, el agua ingresa a la zona de sedimentación, con flujo ascendente se encuentra con las láminas deflectoras que disminuyen la velocidad del floc, enviándolo al manto de lodos, estos se concentran en el decantador para luego ser extraídos por medio de válvulas. En la zona de clarificación los tubos colectores reciben el agua y la conducen a un canal principal que envía el agua clarificada al pozo claro de cada clarificador. Las bombas [P-818A-D y P-872A-D] succionan de los pozos claros el agua clarificada y la envían a un cabezal común de 20", desde el cual se suministra el agua hacia las torres de enfriamiento, los filtros de lecho mixto y otros usuarios menores.

Filtración: El proceso de filtración elimina los sólidos suspendidos y la materia orgánica remanente en el agua clarificada, a su vez, disminuye la turbiedad. Para este proceso se emplean filtros verticales presurizados de tipo de lecho filtrante mixto de arena y antracita, se cuenta con 5 filtros en la U-850 [F-850A-E] con un flujo de 1850 gpm y 8 filtros en la U-830 [F-831-38] con un flujo de 2800 gpm. El agua clarificada ingresa por las válvulas de entrada ubicadas en la parte superior de los filtros, siendo distribuida por los tubos ranurados para que su caída al lecho sea uniforme y en forma de lluvia, el agua pasa a través del filtro y es tomada por los tubos retenedores, el agua filtrada sale por la parte inferior y se dirige al cabezal de agua filtrada.

Para mantener el efluente de agua filtrada con turbiedad inferior a 1 NTU, es necesario efectuar retrolavados en contraflujo para limpiar el lecho, el agua utilizada para estos retrolavados es agua filtrada que se almacena en la piscina BA-855 y en el tanque K-831. Para los filtros de la U-850 se efectúa el retrolavado con un flujo de 700 gpm durante 15 min mediante la bomba MP-873A/B que descarga a una presión de 25 psi, y para la U-830 se utiliza un flujo de 900 gpm durante 10 min, que es succionado por la MP-831C y descarga a una presión de 45 psi. El agua proveniente de los retrolavados de ambas unidades descarga en la piscina de contraincendios BA-800.

Ultrafiltración: Es el proceso de separación impulsado por la presión en una membrana que separa las partículas suspendidas del agua de alimentación. En este proceso se remueven sólidos suspendidos remanentes. El agua filtrada ingresa a los filtros de canastillas F-5401A-C conectados en paralelo para retener partículas de hasta 150 micrones, como pretratamiento para la unidad de ultrafiltración. La unidad cuenta con tres trenes de UF conformados por 8 skid sumergidos en las piscinas BA-5411/21/31, cada una con capacidad de 58700 gal y con 100 módulos de membranas cada uno. La operación en los trenes se lleva a cabo de manera intermitente debido a que las membranas de ultrafiltración requieren en forma continua de ciclos de limpieza con aire y agua, el proceso se compone de cuatro ciclos, filtración, relajación, retrolavado y retiro de lodos.

El agua proveniente de los filtros de canastilla ingresa en las piscinas e inicia el ciclo de filtración, el agua fluye del exterior hacia el interior de las membranas por medio de un sistema de cebado que succiona el agua de las membranas y la envía al cabezal de salida de permeado de cada módulo hacia el pozo claro común, posteriormente es enviada por las P-5415/25/35/45 hacia el tanque K-830. Durante el ciclo de filtración los sopladores C-5411/21/31/41 inyectan un flujo continuo de aire de fregado en los skid para agitar las membranas. El siguiente ciclo es el de relajación, en el cual se inyecta aire de purga comprimido para agitar las fibras de las membranas y eliminar sólidos suspendidos depositados en la superficie de las membranas, este ciclo dura 1 minuto por cada 9 minutos de filtración. En el ciclo de retrolavado se inyecta agua ultrafiltrada de adentro hacia afuera de las fibras de la membrana para quitar contaminantes acumulados en los poros, al día se realizan 4 retrolavados para cada tren durante 1 minuto.

El ciclo de retiro de lodos se ejecuta con el fin de controlar la acumulación de sólidos en las piscinas de UF, la extracción se realiza cada 12 h durante 6 min, por medio

de las MP-5406A/B que descargan en la piscina de contraincendios un flujo de aproximadamente 1100 gpm a una presión de 15 psi. Se realiza una limpieza química fuera de línea de las membranas de UF en la piscina BA-5404 con una solución de hipoclorito de sodio donde son sumergidos los skids y el agua es recirculada por medio de la MP-5403 a una presión de 15 psi y un flujo de 200 gpm, al terminar la limpieza el agua es drenada hacia la piscina de contraincendios.

Suavización: El objetivo de este proceso es remover sales de calcio y magnesio disueltas en el agua reduciendo cationes en las membranas de ósmosis inversa. Una parte del flujo de agua ultrafiltrada es enviada a los suavizadores Z-833/34, el agua ingresa por la parte superior de cada zeolita a través de las válvulas de entrada y el efluente sale por la parte inferior, esta corriente se conecta con el cabezal de agua ultrafiltrada que alimenta a la U-5500. Para el buen funcionamiento de los suavizadores es necesario regenerar la resina cuando esta se satura, la regeneración se realiza por pasos, primero se realiza el retrolavado con agua filtrada a contraflujo que expande el lecho de resina y se envía la piscina de contraincendios BA-800. El segundo paso es la estabilización, donde se deja en reposo el lecho, el tercer paso es la inyección de salmuera, que ingresa por la parte superior de los suavizadores y el efluente que sale es enviado al sistema colector de lodos, el cuarto paso es el lavado lento, se realiza con agua filtrada y su residual es enviado al colector de lodos.

Ósmosis inversa: El objetivo del proceso de ósmosis inversa es retirar las sales presentes por medio de membranas semipermeables y producir agua desmineralizada para los diferentes usuarios de la GRB. La mezcla de agua suavizada y ultrafiltrada es pretratada con un choque de Biocida [L-142] para el control microbiológico y un antiescalante [ChemTreat RL9007] para mantener las sales en dilución y evitar la formación de precipitaciones. Después de la dosificación de químicos el agua ingresa a los filtros de cartucho F-55111-211-311 para mejorar las condiciones y retener los sólidos presentes, el efluente es enviado por las bombas de alta presión P-5512-22-32-42 hacia los trenes de RO. En la unidad 5500

se encuentran los 3 trenes de membranas de ósmosis inversa configurados cada uno con dos pasos y dos etapas por paso. La capacidad de recuperación del sistema es del 75% con un porcentaje de remoción de sales superior al 99%.

El flujo de agua ultrafiltrada y pretratada es succionada por las Bombas de Alta Presión y descargan a la primera etapa del primer paso a una presión de 320 psi. La corriente de permeado de la primera etapa se une con la corriente de permeado de la segunda etapa y continua como carga para el segundo paso. En el segundo paso la corriente de permeado de la primera etapa se une con la corriente de permeado de la segunda etapa y este efluente descarga al cabezal de agua desmineralizada que alimenta el Tanque de Agua desmineralizada K-862. La corriente de concentrado de la primera etapa del primer paso se convierte en la alimentación de la segunda etapa del primer paso. La corriente de concentrado de la segunda etapa del primer paso se envía al cabezal de agua de rechazo, aproximadamente 900 gpm que se descargan a la Piscina de Contraincendios BA-800 por una línea de 10" a una presión de 120 psi. La corriente de concentrado de la primera etapa del segundo paso se convierte en la alimentación de la segunda etapa del segundo. La corriente de concentrado de la segunda etapa del segundo paso se recircula al cabezal de alimentación de la unidad.

Las corrientes de salida de permeado y concentrado de cada etapa de los trenes cuenta con analizadores en línea de pH y conductividad, los cuales se almacenan en la piscina de limpieza de fuera de línea de UF BA-5404, cuando la piscina se llena es drenada hacia la piscina de contraincendios durante aproximadamente 25 min con un flujo de 200 gpm, mediante la MP-5403 a una presión de 15 psi.

Potabilización: En este proceso se busca eliminar olor, sabor y microorganismos del agua. El agua filtrada ingresa a los filtros de carbón activado, en los cuales se retiran partículas de hierro, bacterias, entre otras. Posteriormente se le dosifica cloro para desinfectar el agua y se almacena en el tanque K-801 para luego ser distribuido

a los usuarios. El retrolavado de estos filtros se realiza cada siete días para eliminar los sólidos retenidos por el lecho de carbón.

Sistema de enfriamiento: El agua clarificada proveniente del cabezal es enviada a las torres enfriadoras como agua de restitución para suplir las pérdidas generadas por la evaporación y las purgas del sistema. Al agua que ingresa a la torre se le realiza un tratamiento químico para acondicionarla y evitar corrosión, ensuciamiento y depósitos. Se dosifican inhibidores de corrosión [L-264], de corrosión para cobre y sus aleaciones [L-265], un dispersante [ChemTreat CL15] y estabilizadores [L-2150]. Al sistema se le realizan purgas calientes continuas y purgas de fondo programadas. Una vez que el agua ha retirado el calor en los diferentes procesos, retorna a las torres a una temperatura mayor. El agua de retorno ingresa a la torre por la parte superior a través de distribuidores. El agua distribuida por las boquillas cae sobre un relleno de cerámica para aumentar el tiempo de contacto entre la corriente de agua caliente que cae y el aire frío que sube inducido por los Ventiladores de Aire ubicados en la parte superior de cada una de las celdas. Después de retirar calor al agua, el aire arrastra gotas que se retienen a través de atrapa neblinas ubicados antes del ingreso del aire hacia el cono de salida en la parte superior de la celda. El agua enfriada se almacena en la piscina de la torre y se recircula nuevamente hacia el proceso.

ANEXO B: Valores de Guías de control y Ventanas operativas

Se consultó en la plataforma RIS los valores de las guías y las ventanas operativas con las cuales trabajan los equipos del departamento y los tratamientos químicos, además los reportes de la empresa asociada Lipesa, para tomarlo como marco de referencia de la calidad del agua de cada proceso.

Tabla 13. Valores de guías y ventanas operativas de los parámetros físicoquímicos del agua cruda.

Río	Gcmáx	Gcmín	Vomáx	Vomín
Dureza (mg/l CaCO ₃)	150	0	200	0
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	120	40	150	30

Tabla 14. Valores de guías y ventanas operativas para los parámetros físicoquímicos del agua industrial.

Industrial	Gcmáx	Gcmín	Vomáx	Vomín
pH	8,5	7	8,7	6,5
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	95	20	100	10
Turbiedad (NTU)	5	0	10	0

Tabla 15. Valores de guías y ventanas operativas para los parámetros físicoquímicos del agua filtrada.

Filtrada	Gcmáx	Gcmín	Vomáx	Vomín
Turbiedad (NTU)	1	0	5	0
Dureza (mg/l CaCO ₃)	130	0	150	0
pH	-	6	-	5,5

Tabla 16. Valores de guías y ventanas operativas para los parámetros físicoquímicos del agua desmineralizada.

Desmineralizada	Gcmáx	Gcmín	Vomáx	Vomín
pH	9,7	7,2	10	7
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	130	-	150	-

La información recopilada para realizar el análisis de las distintas alternativas fue tomada de los P&IDs, los reportes de la empresa asociada Lipesa, los documentos de filosofía operacional de las unidades, los informes de desempeño mensuales de las plantas, manuales de descripción de procesos del Departamento de Servicios Industriales, entre otras fuentes de información.

Tabla 17. Valores de calidad del agua de restitución a las torres según el reporte presentado por Lipesa.

Calidad del agua de restitución a las torres				
pH	Turbiedad	Alcalinidad	Dureza	Aluminio
5.8-8	Máx 5	<150	<150	Máx 5

Tabla 18. Valores de calidad del agua de recirculación de las torres según el reporte presentado por Lipesa.

Calidad del agua de recirculación de las torres			
pH	Alcalinidad	Dureza	Conductividad
7.2-9	50-250	Máx 500	Máx 1200

ANEXO C: Caracterización del agua clarificada, filtrada, ultrafiltrada y corrientes residuales

Se realizó el respectivo balance de agua de las plantas de agua del Departamento de Servicios Industriales, tomando como referencia los datos registrados en la herramienta PI.

Tabla 19. Información de las corrientes para el balance general de agua

Corriente	Planta	Calidad	Máx Gpm	Promedio Gpm	Mín Gpm
0	Bote del río	Agua de río	10813	9599	8503
B	U-2900	Agua río	939	819	610
1	U-800/850	Agua cruda	9874	8780	7893
2	TE	Agua clarificada	3457	3120	2732
3	U-830/850	Agua clarificada	5467	4840	4546
4	U-830	Agua Potable	720	700	670
5	U-830/850	Agua Filtrada	4870	4140	3487
6	U-5400	Agua ultrafiltrada	4150	3788	3317
7	U-830	Agua suavizada	1200	1000	800
8	U-5500	Agua Desmineralizada	3100	2828	2517

En la Tabla 19 se observa la información del balance de agua para tres escenarios posibles, el mínimo, el promedio y el máximo de galones producidos.

Tabla 20. Información de las corrientes residuales de los procesos de planta de agua.

Corriente	Descripción	Unidad	Máx Gpm	Promedio Gpm	Mín Gpm
L	Lodos de clarificación	U-800/850	950	820	680
P	Purgas de las torres	TE	569	539	439
R	Retrolavados filtros de arena y antracita	U-830/850	210+170=380	57+ 40 = 97	47+33=80
S	Retrolavados de Suavizadores	U-830	140	74	65
U	Lodos de UF	U-5400	150	28	25
C	Rechazo de RO	U-5500	1100	952	800

En la Tabla 20 Se observa la información de las corrientes de subproductos de cada proceso que se lleva a cabo en la planta, de igual forma, se calculan sus valores para los tres escenarios posibles, el mínimo, el promedio y el máximo de galones.

Tabla 21. Tarifas de Servicios Industriales

Clase de costo	Tarifa [\$/Kgal]
Planta de agua	1207
Agua Clarificada	5000
Agua Industrial	5229
Agua Filtrada	5500
Agua Desmineralizada	15513

En la Tabla 21 se muestran el valor que al Departamento de Servicios Industriales le cuesta producir cada tipo de agua.

ANEXO D: Condiciones de operación de las corrientes residuales

Caracterización y parámetros físicos de todas las corrientes de los procesos de planta de aguas.

Tabla 22. Condiciones de operación de las corrientes de desecho de los procesos.

Parámetro	Agua de rechazo de RO	Lodos de UF	Agua de retrolavado de filtros	Agua de la piscina BA-5404	Agua toma muestras	Agua de enfriamiento
Presión (psi)	120	15	25 y 45	12	-	-
Flujo (gpm)	900	1100	30 y 45	6000	46	19
Frecuencia	Cte.	Cada 12h	Cada 24h para cada filtro	Cada 12h	Cte.	Cte.

Tabla 23. Caracterización del agua de la piscina de contraincendios

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Color (ppm)	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Sílice (ppm)
1	8,1	25	189	180	162	-	45,7
2	8	17	158	171	154	339	42
3	7,9	13	141	120	134	404	46
4	8,06	7,47	72	165	155	439	27
5	8,2	9,9	104	165	191	407	53
6	8,28	29	223	174	183	411	43
7	8,3	15	120	174	199	510	-
8	7,6	69	869	132	186	340	-
9	8,14	29	707	138	166	430	-
10	8,16	9,5	113	171	178	410	-

Tabla 24. Caracterización de los lodos de ultrafiltración

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (ppm)	Color (ppm)	Dureza (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Sílice (ppm)
1	8,1	6,2	59	66	85	125	13,6
2	7,4	15	51	140	70	129	13
3	7,8	8,4	51	62	82	142	9
4	8,16	12,7	54	112	75	152	13,6
5	8,1	13	60	63	95	130	13
6	8,18	11,7	57	121	96	146	15
7	8,2	12	57	107	85	146	-
8	8,2	12,6	60	113	83	131	-
9	8,2	17	54	125	93	139	-
10	8,2	20	54	112	85	125	-

Tabla 25. Caracterización del agua de la piscina BA-5404

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Sílice (ppm)
1	7,6	1	96	97	134	28
2	8,3	0,1	66	57	180	22
3	8,3	0,7	78	81	129	23
4	8,31	0,2	81	82	120	26
5	7,74	0,2	72	89	-	-
6	8,3	0,4	66	93	202	18

Tabla 26. Caracterización de agua del colector de los toma muestras sin la corriente del río

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Sílice (ppm)
1	7,8	1,3	68	48,6	120	14,5
2	7,6	1,2	42	48,6	109	12,6
3	7,85	1,8	51	49	130	15,4

Tabla 27. Caracterización del agua de rechazo de ósmosis inversa

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Color (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Sílice (ppm)
1	7,8	0,1	195	177	-	433	-
2	7,9	0,2	189	166	0	439	-
3	7,9	0,1	200	208	3	493	-
4	7,9	0,1	201	227	9	524	53
5	7,8	0,1	210	190	16	520	44
6	8	0,1	189	207	7	488	46
7	8	0,1	195	255	3	503	58
8	7,9	0,1	186	186	5	446	58
9	8	0,1	192	198	22	452	62

Tabla 28. Caracterización del agua de retrolavados de los filtros

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Color (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	7,4	147	64	72	970	121
2	7,5	105	51	59	774	113
3	7,5	103	51	69	573	132
4	7,67	20	57	109	181	141
5	7,7	34	54	93	374	141
6	7,7	160	69	88	799	133
7	8,04	47,8	51	93	235	135
8	7,93	94	54	85	922	124
9	7,9	110	54	113	519	129
10	7,8	43	51	81	-	129

Tabla 29. Caracterización del agua clarificada

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Color (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	7,5	2,7	56	85	-	119
2	7,6	4,1	51	62	47	133
3	7,5	2,4	51	68	54	139
4	7,7	2,7	51	69	24	137
5	7,9	4,8	54	81	81	134
6	7,93	2,6	54	88	23	137
7	7,9	5,3	51	69	46	134
8	7,96	4,6	51	85	45	132
9	7,9	3,2	54	64	43	133

Tabla 30. Caracterización del agua de Río

Día (N° de muestra)	pH	Turbiedad (NTU)	Alcalinidad (ppm)	Dureza (ppm)	Color (ppm)	Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	7,6	322	59	73	2460	115
2	7,7	292	57	65	2371	136
3	7,6	287	51	80	2213	138
4	7,7	315	63	76	2251	127
5	7,9	840	63	89	4457	128
6	8,04	1212	54	93	6566	132
7	8,2	922	60	89,3	4965	127
8	7,9	644	63	86	4211	129
9	7,8	420	54	85	3152	129

Tabla 31. Caracterización del agua filtrada y ultrafiltrada

Parámetro	Ultrafiltrada	Filtrada
pH	7,7	7,7
Turbiedad (NTU)	0,2	0,2
Alcalinidad (ppm)	51	48
Dureza (ppm)	73	68
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	127	129
Sílice (ppm)	17	14

ANEXO E: Análisis microbiológicos de las corrientes residuales

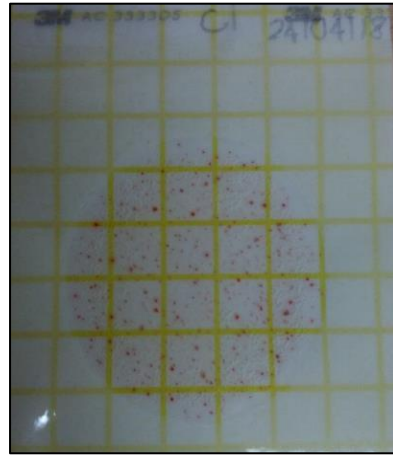
✓ Análisis microbiológico de ósmosis inversa

Figura 18. Resultados de análisis microbiológicos de la mezcla RO+CL (a) y agua clarificada (b).

(a)



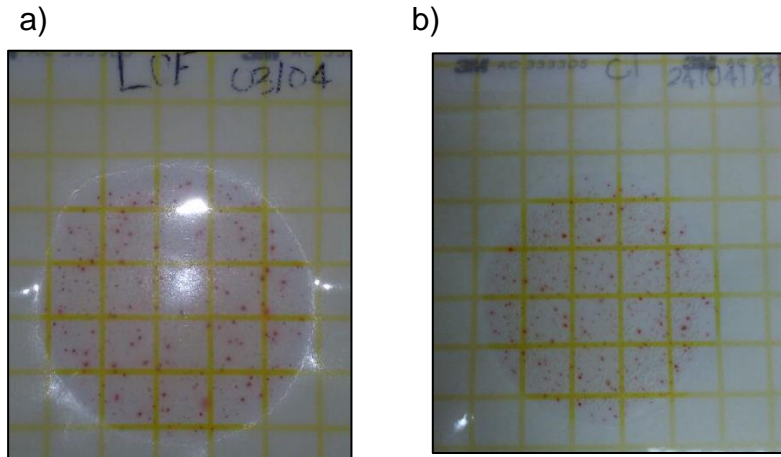
(b)



En la Figura 18 se muestra el montaje en papel Petri film de una muestra de la mezcla de agua de rechazo con clarificada y una de agua clarificada, el conteo en placa dio como resultados valores de 528 y 357 unidades formadoras de colonias (UFC) respectivamente. El tratamiento químico de LIPESA está diseñado para un máximo de <math><500000</math> UFC, por lo tanto, se debe tener en cuenta el crecimiento microbiológico al ingresar la nueva mezcla.

✓ **Análisis microbiológico de lodos de ultrafiltración**

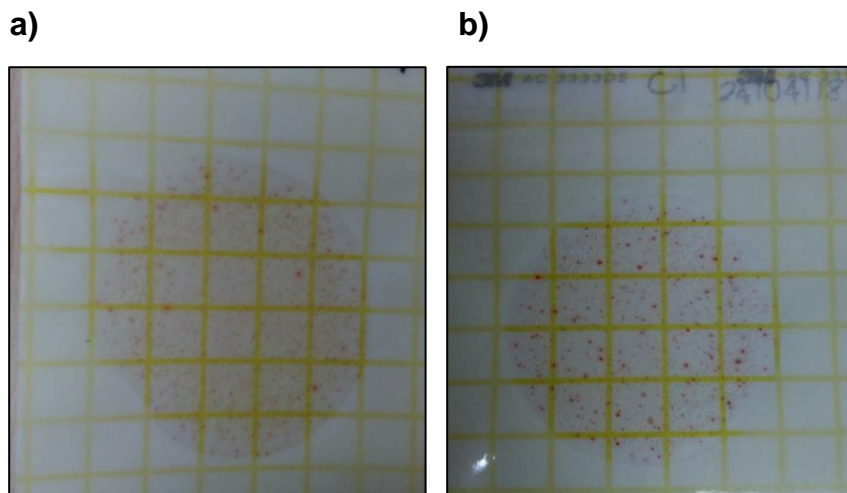
Figura 19. Resultados de análisis microbiológicos de los lodos de UF (a) y agua clarificada (b).



En la Figura 19 se muestra el montaje en papel Petri film de una muestra de lodos de ultrafiltración y una de agua clarificada, el conteo en placa dio como resultado valores de 352 y 357 unidades formadoras de colonias (UFC) respectivamente, por lo tanto no se verá afectado por el factor microbiológico.

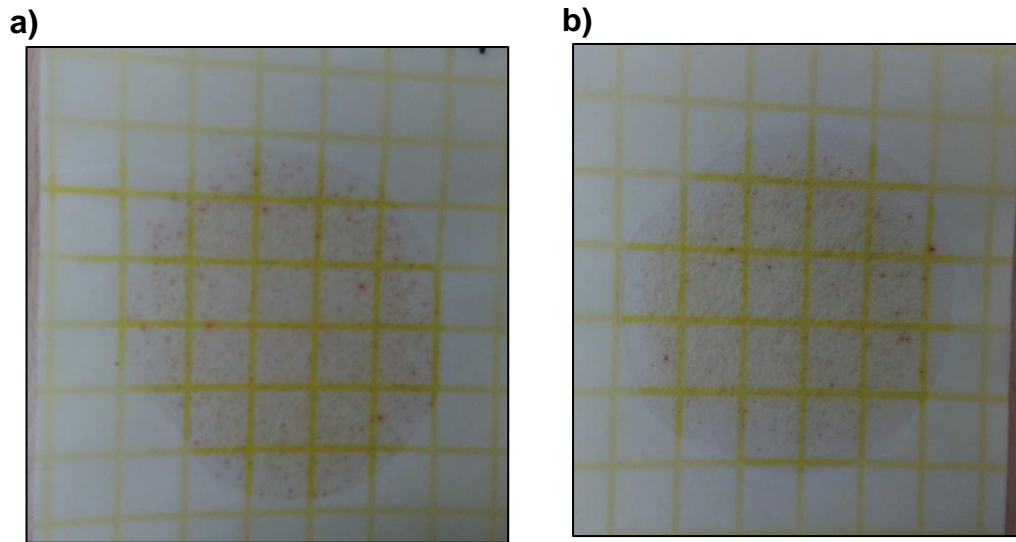
✓ **Análisis microbiológico de la piscina de BA-5404**

Figura 20. Resultados de análisis microbiológicos del agua de la piscina BA-5404, (a) y del agua clarificada (b).



En la Figura 20 se muestra el montaje en papel Petri film, los resultados obtenidos para el agua de la piscina y el agua clarificada fueron 360 UFC y 357 UFC respectivamente, de esta manera, el control microbiológico no se verá afectado, ya que el flujo que se agrega tiene un valor similar de UFC.

Figura 21. Resultados de análisis microbiológicos del agua de la piscina BA-5404, (a) y del agua filtrada, (b).



En la Figura 21 se muestra el montaje en papel Petri film de una muestra, los resultados obtenidos para el agua de la piscina BA-5404 y el agua filtrada que ingresa a los trenes de Ultrafiltración fueron 360 UFC y 260 UFC respectivamente.

ANEXO F: Análisis de los lodos de clarificación

En operación normal funcionan 5 clarificadores y 2 están disponibles o uno en mantenimiento y el otro disponible. Para realizar el balance másico se asume que los 5 clarificadores en operación funcionan como uno solo, teniendo como volumen de control lo mostrado en la Figura 22.

Figura 22. Volumen de control para el balance másico de las plantas de agua U-800 y U-850.



Para determinar la masa de cada especie se utilizan las siguientes fórmulas.

$$M_r = Q_r \times X_r$$

$$M_c = Q_c \times X_c$$

$$M_L = Q_L \times X_L$$

Donde,

Q_r : caudal de agua del río, L/s.

X_r : concentración de la especie en el río, mg/L.

Q_c : caudal de agua clarificada, L/s.

X_c : concentración de la especie en el agua clarificada, mg/L.

Q_L : caudal de lodos, L/s.

X_L : concentración de la especie en los lodos, mg/L

En las tablas 32 a 36 se muestran los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos realizados a muestras de agua de río, clarificada y lodos. Teniendo en cuenta estos resultados se determinó el contenido promedio de cada especie y se realizó el cálculo de la masa de cada uno mediante las ecuaciones especificadas anteriormente, sus resultados se presentan en las tablas siguientes.

Tabla 32. Masa de las especies analizadas en el agua captada.

Agua de Río		
Flujo [L/s]	539,532	
Especie		Masa [Kg/s]
Al [mg/L]	12,963	0,006993953
Ca [mg/L]	14,578	0,007865297
Cu [mg/L]	0,007	3,77672E-06
Fe[mg/L]	5,804	0,003131444
Mg [mg/L]	2,483	0,001339658
Mn [mg/L]	0,04	2,15813E-05
Na [mg/L]	5,621	0,003032709
P [mg/L]	0,219	0,000118158
S [mg/L]	4,756	0,002566014
Si [mg/L]	31,614	0,017056765
Zn [mg/L]	0,052	2,80557E-05
SST [mg/L]	1455	0,7850491

Tabla 33. Masa de las especies analizadas en el agua clarificada

Agua Clarificada		
Flujo [L/s]	483,714	
Especie		Masa [Kg/s]
Al [mg/L]	0,098	4,7404E-05
Ca [mg/L]	15,317	0,007409047
Cu [mg/L]	0,006	2,90228E-06
Fe[mg/L]	0,034	1,64463E-05
Mg [mg/L]	1,892	0,000915187
Mn [mg/L]	0,006	2,90228E-06
Na [mg/L]	5,299	0,0025632
P [mg/L]	0,061	2,95066E-05
S [mg/L]	4,957	0,00239777
Si [mg/L]	3,693	0,001786356
Zn [mg/L]	0,106	5,12737E-05
SST [mg/L]	8,9	0,0043051

Tabla 34. Masa de las especies analizadas en los lodos.

Lodos		
Flujo [L/s]	55,818	
Especie		Masa [Kg/s]
Al [mg/L]	11,919	0,00066529
Ca [mg/L]	4,966	0,00027719
Cu [mg/L]	0,009	5,0236E-07
Fe[mg/L]	5,742	0,00032051
Mg [mg/L]	1,302	7,2675E-05
Mn [mg/L]	0,055	3,07E-06
Na [mg/L]	3,602	0,00020106
P [mg/L]	0,291	1,6243E-05
S [mg/L]	1,931	0,00010778
Si [mg/L]	29,091	0,0016238
Zn [mg/L]	0,054	3,0142E-06
SST [mg/L]	18986	1,059761

ANEXO G: Caracterización del agua mezclada como restitución

Tabla 35. Caracterización del agua mezclada para restitución

Parámetro	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Clarificada
pH	7,98	8	7,97	7,98	8,1	7,9
NTU	2,8	3,3	2,6	3,1	3	4,8
Alcalinidad	81	84	84	81	84	54
Dureza	92	113	130	117	118	75
Color	41	36	36	28	22	43
Conductividad	193	216	304	212	-	134
Sílice	18	18	-	22	27,4	-
Cloruros	13	16	10	13	13	-
Hierro	0,02	0,12	0,01	0,32	0,25	-
Aluminio	0,064	0,215	0,065	0,14	0,097	0,03

Se realizó el cálculo del Índice de saturación de Langelier [LSI], el cual es un indicador del potencial de incrustación de agua de enfriamiento, por medio de una herramienta virtual, ingresando los datos de pH, alcalinidad, dureza y conductividad del agua.

Tabla 36. Caracterización del agua mezclada para restitución (Makeup)

Tipo de agua para restitución	LSI
Agua clarificada	-0.35
Agua mezclada	0.47

El valor del agua equilibrada es 0 y el rango ideal para el índice de Langelier está entre - 0.5 y +0.5, los resultados que se obtuvieron para el agua clarificada y el agua mezclada se encuentran dentro del rango favorable.

ANEXO H: Análisis del funcionamiento de las torres de enfriamiento

✓ Análisis del número de ciclos y purgas

El número de ciclos fue calculado mediante la siguiente expresión

$$Ciclos = \frac{C_{dur} \text{ Agua de recirculación}}{C_{dur} \text{ Agua de restitución}} \quad (1)$$

Tabla 37. Número de ciclos de las torres aplicando la alternativa de recuperación

Torre	Dureza agua de recirculación	*Dureza agua de restitución	Actual número de ciclos	Nuevo Número de ciclos
TE-890	429	120	5,3	3,6
TE-850	418	120	5,3	3,5
TE-831	381	120	4,8	3,2
TE-880	490	120	6,3	4
TE-820	504	120	6,5	4,2
TE-801	500	120	6,3	4,2

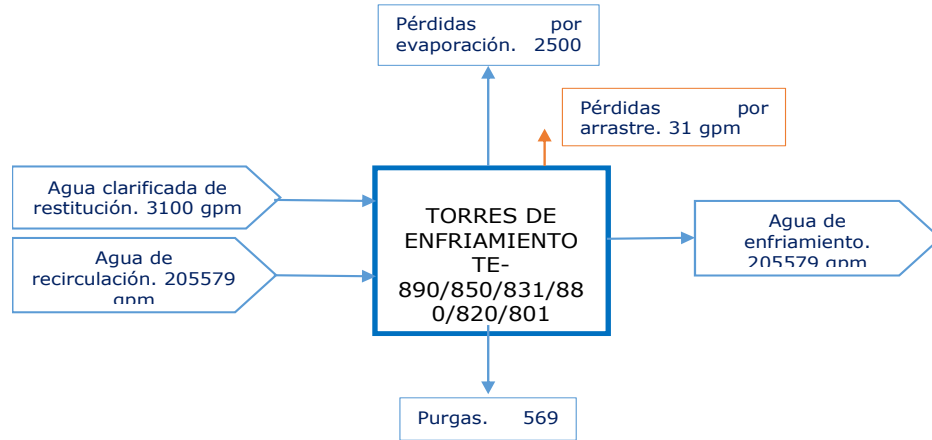
*Valor promedio de la dureza de la mezcla que entraría a las torres

El rango operacional de las torres para el número de ciclos es de 4 a 8, pero es deseable operar con un valor intermedio y así evitar que se concentre la torre, además posibles inconvenientes en cuanto al tratamiento químico y al estado de los activos a los cuales se les suministra esta agua de enfriamiento. Al disminuir el número de ciclos se incrementará el flujo de agua en las purgas, asimismo un aumento en el consumo de dispersantes e inhibidores, por lo tanto, aumenta el costo del tratamiento químico.

FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE

✓ Balance de masa

Figura 23. Balance de agua de las torres



Balance de las Torres

(2)

$$F_{Rest} - F_{Evap} - F_{Purgas} = F_{Pérdidas}$$

$$3100gpm - 2500gpm - 569gpm = 31gpm$$

Para un número de 4 ciclos, con una concentración inicial de dureza de 120 ppm de $CaCO_3$ en el agua de restitución, se obtiene una concentración de 480 ppm en el agua de recirculación, el valor máximo aceptado de concentración de dureza es de 500 ppm en el agua de recirculación.

$$Make\ up: F_{Clarificada} + F_{RechazoRO} = 2200 + 900 = 3100\ gpm$$

Para calcular el nuevo valor de galones descargados en las purgas se divide el flujo del make up en el nuevo número de ciclos que se tendrán.

$$Purga = \frac{Makeup}{Ciclos} \quad (3)$$

$$Purga = \frac{3100}{4} = 775 \text{ gpm}$$

Se halla el nuevo valor de las purgas mediante la ecuación (3) tomando como referencia un número de 4 ciclos de concentración para cada torre, con lo cual se obtiene un resultado de 775 gpm en purgas.

✓ **Flujo de agua recuperado**

$$F_{purga\ nueva} - F_{purga\ actual} = F_{perdida} \quad (4)$$

$$775 \text{ gpm} - 569 \text{ gpm} = 206 \text{ gpm}$$

$$F_{rechazo} - F_{perdida} = F_{recuperado} \quad (5)$$

$$900 \text{ gpm} - 206 \text{ gpm} = 694 \text{ gpm}$$

$$F_{recuperado} * (\eta_{clar} + \eta_{osmo}) = F_{captado} \quad (6)$$

$$F_{rechazo} - F_{perdida} = F_{recuperado}$$

De los 900 gpm que ingresarían al cabezal de agua clarificada, solo 694 gpm se recuperarían como agua de enfriamiento para las torres, que se traduciría en aproximadamente un 88% de recuperación, lo cual representaría aproximadamente una disminución de 1294 gpm en volumen de captación. Al hacer el balance para el primer escenario, el porcentaje de recuperación es el mismo.

ANEXO I: Simulación de la nueva unidad de ósmosis inversa

En la Tabla 27 del ANEXO D, se observa que los valores de pH, turbiedad y color se encuentran dentro de los valores de las ventanas operativas del agua filtrada, pero parámetros como la alcalinidad y la dureza deben ser tratados para poder cumplir con la calidad necesaria del agua de alimentación a RO. Es por esto que debe ser sometida a una nueva unidad de ósmosis inversa

Figura 24. Condiciones del agua de rechazo de ósmosis

Lewabrane [®]		LewaPlus		LANXESS			
2018-05-04 13:53:09 Módulo Ósmosis Inversa		0097 / 2018-05-04 / Tratamiento de concentrado primer paso Ecopetrol Barranca_desmi		Emerging Chemistry			
2/8							
Análisis del agua de alimentación							
Origen del agua:							
Tipo de agua:	Efluente secundario de medios de filtración			País: Colombia			
Caudal de aporte:	0,00 [gpm]			Fecha de la toma de muestras: 2018-05-04			
Catiónes	Original Unidad	[mg/l]	[gr CaCO ₃ /gal]	Aniones	Original Unidad	[mg/l]	[gr CaCO ₃ /gal]
Na	76,37394 [mg/l]	76,37394	9,68246	Cl	41,03199 [mg/l]	41,03199	3,37354
Ca	180,00000 [mg/l]	180,00000	26,17906	SO ₄	219,73847 [mg/l]	219,73847	13,33438
Mg	20,00000 [mg/l]	20,00000	4,79375	CO ₃	0,31268 [mg/l]	0,31268	0,03038
K	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000	HCO ₃	389,43056 [mg/l]	389,43056	18,60104
Sr	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000	NO ₃	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000
Ba	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000	F	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000
NH ₄	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000	SiO ₂	59,91922 [mg/l]	59,91922	2,90680
Fe(II)	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000	B	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000
Mn	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000	PO ₄	0,00000 [mg/l]	0,00000	0,00000
H+		0,00011	0,00031	OH-		0,00296	0,00051
Suma C			40,65527	Suma A			35,33933
+ Na		0,00000	0,00000	+ Cl		64,65723	5,31594
Otros				Resumen			
Temperatura	82,40 [°F]	Turbidez	0,00 [NTU]	Fe (total)	0,00 [ppm]	TDS	1051,46 [ppm]
pH	6,97	SDI	0,00	Cloro libre	0,00 [ppm]	Conductividad	1489,55 [µS/cm]
CO ₂	56,35 [mg/l]	TSS	0,00 [ppm]	H ₂ S	0,00 [ppm]	Presión osmótica	7,39 [psi]
		TOC	0,00 [ppm]			Fuerza iónica	0,021

En la Figura 25 se aprecia el diseño de la nueva unidad de ósmosis inversa, configurada con un solo paso y dos etapas, se compone de 22/7 tubos para la primera etapa y 11/7 para la segunda etapa, se utilizaron membranas tipo RO B440 HR, para tratar un flujo de 900 gpm que ingresa a 124 psi de presión. Se espera una recuperación del 75%.

Figura 25. Diseño de la nueva unidad de ósmosis inversa

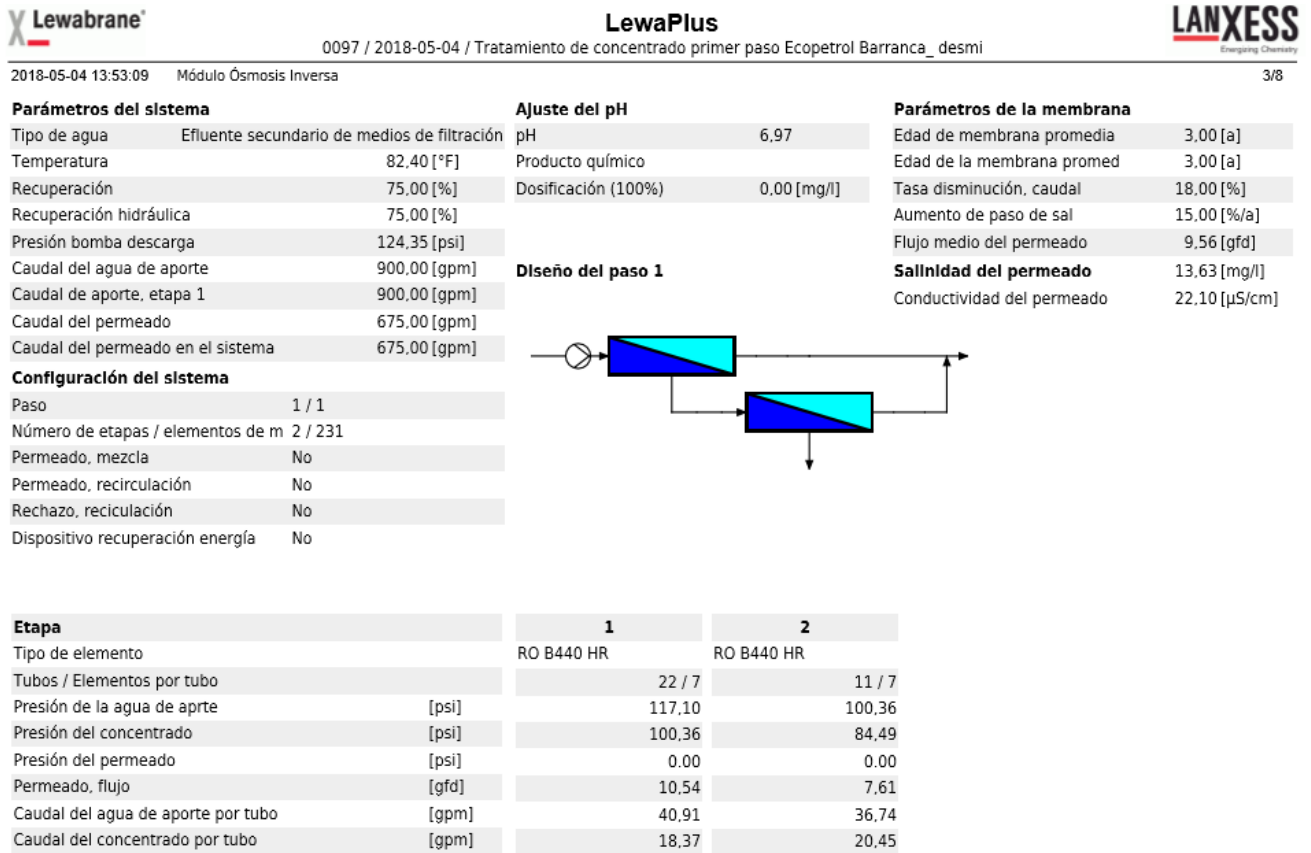
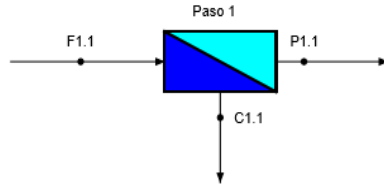


Figura 26. Resultados de la simulación

Panorámica de un diseño de sistema

Tasas de recuperación	[%]
Paso 1 Recuperación	75,00
Recuperación hidráulica	75,00
Sistema Recuperación	75,00



Paso 1

Presión de la agua de a	117,10 [psi]
Presión del concentrado	84,49 [psi]

	Posición	Caudal [gpm]	TDS [mg/l]	Conductividad [µS/cm]	pH [-]
Agua de aporte	F1.1	900,00	1051,46	1489,55	6,97
Permeado	P1.1	675,00	13,63	22,10	5,25
Concentrado	C1.1	225,00	4165,49	5597,86	7,53

Incrustación Paso 1		[% Sat.]
Concentrado	CaSO ₄	56,19
Ca ₃ (PO ₄) ₂	BaSO ₄	0,00
LSI	SrSO ₄	0,00
SDSI	SiO ₂	195,48
	CaF ₂	0,00

Composición	Agua de aporte Agua cruda	Concentrado	Permeado	
Iones	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
Na	76,374	300,957	1,859	
Ca	180,000	716,240	1,540	
Mg	20,000	79,582	0,171	
K	0,000	0,000	0,000	
Sr	0,000	0,000	0,000	
Ba	0,000	0,000	0,000	
NH ₄	0,000	0,000	0,000	
Fe(II)	0,000	0,000	0,000	
Mn	0,000	0,000	0,000	
Cl	105,689	416,475	1,766	
SO ₄	219,738	876,330	0,738	
CO ₃	0,313	6,567	0,000	
HCO ₃	389,431	1532,811	6,505	
NO ₃	0,000	0,000	0,000	
F	0,000	0,000	0,000	
SiO ₂	59,919	236,530	1,049	
B	0,000	0,000	0,000	
PO ₄	0,000	0,000	0,000	
CO ₂	56,352	56,352	56,352	
TDS	[mg/l]	1051,464	4165,487	13,629
pH		6,975	7,526	5,250
Conductividad	[µS/cm]	1489,553	5597,861	22,096
Presión osmótica	[psi]	7,391	26,842	0,120
LSI		0,247	1,963	-4,928

Con el contenido de dureza obtenido en el permeado de la nueva unidad de ósmosis se realiza el balance para obtener el valor de dureza al mezclarlo con el agua ultrafiltrada, para con ella alimentar a la unidad actual de ósmosis.

$$C_{RO+UF} = \frac{(F_{RO} * C_{RO} + F_{UF} * C_{UF})}{F_{RO+UF}} = \frac{675 * 1,6 + 3113 * 73}{3788} = 60ppm$$

Es importante realizar la ingeniería conceptual, el diseño y el cálculo del costo de la nueva unidad de RO, de igual forma, hacer un análisis de costos/beneficio para calcular el ahorro que se generaría al dejar de utilizar el proceso de suavización o en dado caso el valor del agua combinada que alimentaría a la unidad 5500. Asimismo, determinar el destino o el tratamiento posterior del concentrado resultante.

ANEXO J: Registro de la turbiedad de los lodos de ultrafiltración

El volumen de agua clarificada en el pozo claro es mayor que el volumen descargado de lodos, por lo tanto, el valor de la turbiedad de estos se diluirá en el del agua clarificada y disminuirá. Teniendo esto en cuenta, se debería dividir el flujo en mínimo tres pozos claros para poder disminuir este valor y así evitar inconvenientes en los siguientes procesos.

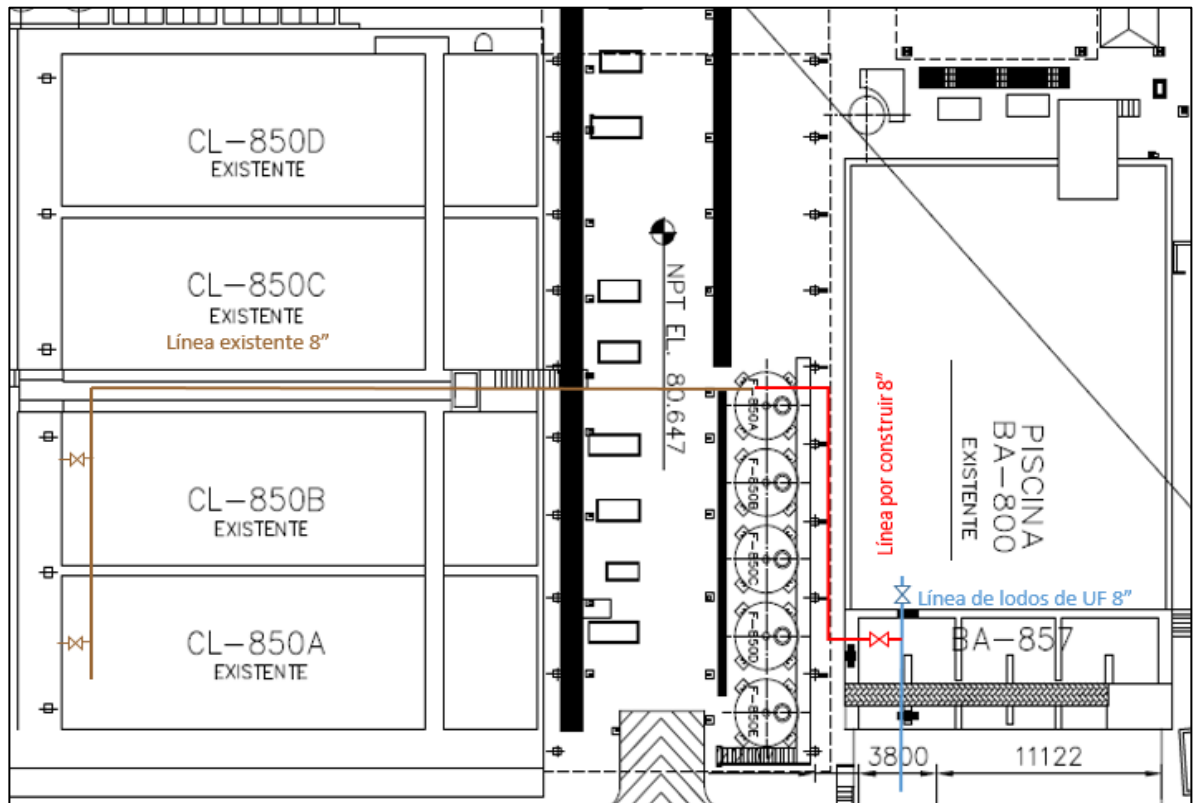
Tabla 38. Valor de la turbiedad en el tiempo durante el retiro de lodos.

Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
0	19
2	12
4	11
6	11

Se midió el valor puntual de la turbiedad a través del tiempo que dura la extracción para determinar su comportamiento, con un valor máximo de 19 NTU.

ANEXO K: Plot plan de la segunda alternativa

Figura 27. Plot plan de las líneas de la segunda alternativa



Se podría utilizar una antigua línea de los intercambiadores iónicos que se encuentra en desuso y llega a la zona de reacción de los clarificadores de la U-850 con sus respectivas válvulas como se puede ver en la Figura 27.

ANEXO L: Pruebas de filtración y condiciones de operación del filtro

Para realizar la prueba de filtración se hizo pasar 100 ml de lodos de ultrafiltración a través de dos tipos de filtros con diferente tamaño de poro, en un montaje que consiste en un matraz Kitasato, un embudo Büchner y un sistema de vacío.

En la Tabla 39 se consignan los valores obtenidos para dos tamaños de poro del filtro, de los cuales fue escogido el que tiene 0,45 μm de tamaño de poro.

Tabla 39. Pruebas de filtración con diferentes tipos de filtros.

Tamaño del poro	Turbiedad (NTU)	Turbiedad (NTU)
Sin filtro	24	11
0,8 μm	1,7	0,66
0,45 μm	0,5	0,3

Se debe realizar el diseño del filtro y sus complementos para operar, de igual forma, calcular los costos que generarían su implementación y la construcción de la facilidad en el cabezal de agua filtrada o en la entrada de ultrafiltración. Asimismo, el diseño conceptual y determinar las condiciones para esta nueva alineación.

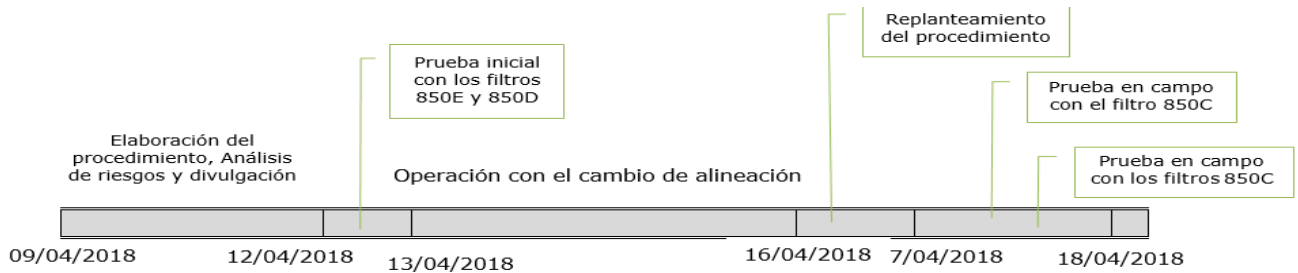
Tabla 40. Condiciones de diseño y operación del filtro

Parámetro	Condiciones operacionales
Tipo	Filtro de cartucho
Flujo	1100 gpm
Temperatura	80 - 90 °F
Presión	15 psi
pH	7-8,5
Tamaño de partícula	>1 μm
Material	SS

ANEXO M: Registro de Prueba en campo para el agua de retrolavados

En la U-850 se cuenta con la facilidad de alinear el flujo de los retrolavados hacia la zona de reacción de los CL-850A/B/C/D, motivo por el cual, se realizó una prueba en campo para evaluar el impacto que puede tener en el proceso de clarificación enviar este volumen de agua hacia los clarificadores, esta prueba resultó positiva, ya que no se afectó la calidad del agua clarificada al adicionar el flujo de los lavados y el valor de la turbiedad siempre estuvo dentro de la guía de control. La prueba se inició con el alineamiento hacia la zona de reacción de los clarificadores, se abrieron las válvulas respectivas para redirigir el flujo y se cerró la válvula que descarga el agua de los lavados en la piscina contra incendios. Se dividió el flujo en los clarificadores 850-B y 850-D para evitar desbordamientos, esta línea tiene además una facilidad hacia la hora de llegada, la cual no se pudo sellar y al inicio del lavado cierta cantidad de agua se fue por allí. Durante el desarrollo de la prueba el parámetro de control fue la turbiedad.

Figura 28. Línea de tiempo de la prueba a realizar.



Durante el proceso de la prueba, la turbiedad del río estuvo relativamente alta, entre 800 y 1400 NTU, debido a época de lluvias, esta turbidez se retira a través del proceso de clarificación obteniendo valores de hasta 5 NTU como guía de control y 10 NTU como ventana operativa, se dosificó entre 30 a 35 ppm de coagulante.

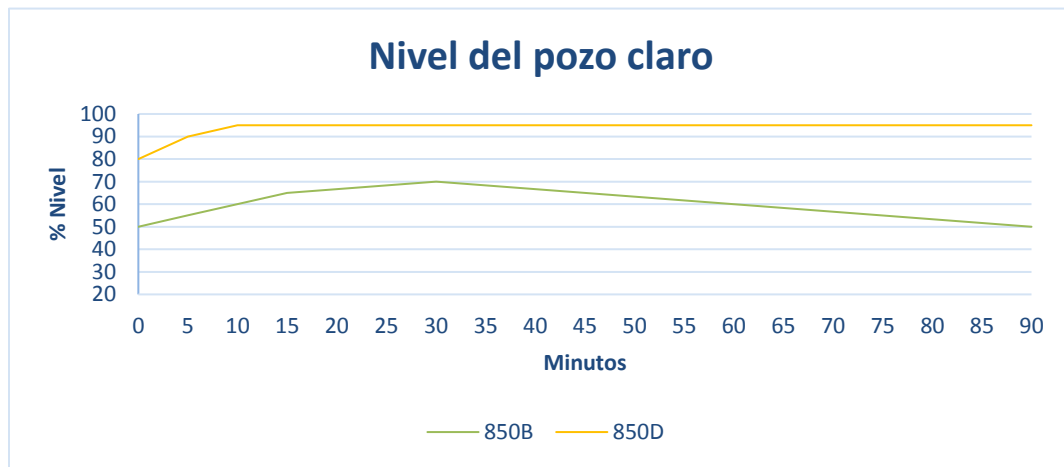
Es necesario realizar revisión del lazo de control de la operación en automático de los clarificadores, debido a que no es consecuente la acción de la válvula con el flujo de entrada, además se presenta una desviación en los medidores de flujo de los clarificadores de la U-850 lo cual no permite un efectivo seguimiento.

El tiempo de residencia del agua en el clarificador es determinado por la ecuación $t = \text{Volumen}/\text{flujo}$, el volumen de cada clarificador es de 157505 gal, durante la prueba el clarificador 850B manejó un flujo promedio de 1800 gpm y el clarificador 850D un flujo promedio de 1600 gpm, obteniendo respectivamente 83 min y 95 min de residencia para el flujo que ingresó a cada clarificador, teniendo en cuenta lo anterior se midió la turbiedad de salida de cada clarificador según el tiempo de residencia obtenido.

✓ **Nivel del pozo claro**

El pozo claro es un depósito donde se almacena el agua clarificada, para luego alimentar los diferentes sistemas, para posteriores tratamientos.

Figura 29. Porcentaje de llenado del pozo claro durante el retrolavado



Como se observa en la Figura 29 el nivel del pozo claro aumentó debido a la adición del flujo de los retrolavados y al terminar el tiempo del lavado se estabiliza su nivel, es importante recalcar que la determinación del porcentaje de nivel del pozo claro se realizó mediante inspección visual en campo, debido a que el indicador de nivel se encuentra descalibrado. También hay que tener en cuenta factores como la presión del sistema, la cual presenta un rango de variación entre 30 y 40 psi debido a actividades externas y a la dinámica del fluido.

