

**OPTIMIZACIÓN DE LAS MEDICIONES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE
PRODUCCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SMART WATER QUALITY (SWQ) DE LA
EMPRESA JPT/ECOPETROL MEDIANTE EL MACHINE LEARNING**

**JUAN PABLO SANTOS NEGRELLI
DIEGO ANDRÉS VILLAMIZAR RICO**

**Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

Director:

**EDINSON ENRIQUE JIMENEZ BRACHO
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.**

2024

NOTA DE ACEPTACION

Nombre

Firma del director

Nombre

Firma del presidente jurado

Nombre

Firma del jurado

Nombre

Firma del jurado

Bogotá D.C, Enero de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica

Dra. Maria Fernanda Vega De Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora de Investigación y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Programa de Ingeniería de Petróleos

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIAS

Agradeciendo a Dios por otorgarme la fuerza, sabiduría e inteligencia necesarias para alcanzar la meta de convertirme en ingeniero de petróleos.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis padres, Pablo Francisco y Lavinia, quienes me han brindado un respaldo incondicional y han sido los impulsores fundamentales de mis aspiraciones. Agradezco su confianza y creencia en mí, así como los valiosos consejos, principios y valores que me han inculcado, contribuyendo a mi crecimiento como persona y profesional.

A mi hermano Franco Iván le reconozco como un modelo a seguir y agradezco su continuo respaldo, mientras que a mi hermana Karen Silvana le agradezco su afecto constante y sus orientaciones para la toma de decisiones acertadas. A mi sobrina Dana Sofía, quien es la adoración de la familia, también le dedico este logro.

Por último, reconozco mi propio esfuerzo, dedicación y actitud positiva, demostrándome a mí mismo que con estos elementos es posible alcanzar cualquier meta que me proponga en la vida

JUAN PABLO SANTOS NEGRELLI

Dedico este trabajo de investigación en primer lugar a Dios, quien me brindó la fortaleza, dedicación y sabiduría necesarias. A mis padres, Agustín Villamizar y Ruth Rico, cuyo apoyo incondicional ha sido la columna vertebral que me permitió culminar esta carrera como ingeniero de petróleos. A mis hermanos Fernanda y Carlos, fuente inagotable de inspiración y estímulo en cada paso de este camino.

Agradezco a mis profesores por compartir su vasto conocimiento y por su orientación valiosa a lo largo de esta travesía académica. A todos mis amigos y a quienes han hecho parte de este proceso, a ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este trabajo no solo representa el producto de horas dedicadas, sino también el reflejo del apoyo inquebrantable de aquellos que siempre han creído en mí.

DIEGO ANDRÉS VILLAMIZAR RICO

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a mis padres y hermanos, cuyo amor, dedicación, respaldo y sacrificio han desempeñado un papel fundamental en mi éxito académico.

También quiero resaltar mi gratitud hacia la empresa JPT Consulting & Service, cuya contribución esencial al implementar la tecnología SWQ ha marcado una innovación significativa en este proyecto de investigación. Agradezco a Frontera Energy por brindarme la oportunidad de llevar a cabo la implementación de la tecnología SWQ en la planta Saara, proporcionando el espacio necesario para desarrollar este trabajo investigativo. En especial, quiero expresar mi agradecimiento al profesor y director de tesis Edinson Jiménez, cuya experiencia y conocimientos compartidos han sido invaluable para mi desarrollo como ingeniero. Aprecio sinceramente su orientación y mentoría. También agradezco de manera especial a Jonathan Juez por su contribución, dedicación y valioso apoyo a este proyecto de investigación, destacando la excelente labor realizada en el modelado del machine learning.

JUAN PABLO SANTOS NEGRELLI

En este momento de profundo agradecimiento, quiero expresar mi reconocimiento nuevamente a Dios y a mis padres por su apoyo incondicional, su dedicación ha sido mi inspiración y motor para alcanzar este logro.

Extendiendo mi gratitud a la empresa JPT Consulting & Service, agradezco por su contribución fundamental al implementar la tecnología SWQ, marcando un hito en este trabajo de investigación. A Frontera Energy, agradezco la oportunidad de llevar a cabo la implementación de la tecnología SWQ en la planta Saara, brindándome el espacio para aplicar los conocimientos adquiridos.

Un reconocimiento especial a nuestro profesor Edinson Jiménez quien fue alguien de especial apoyo en este proceso de investigación. Otro agradecimiento a Jonathan Juez, cuya colaboración en la implementación del Machine Learning ha sido invaluable. Su dedicación fue fundamental para el éxito de este proyecto.

DIEGO ANDRÉS VILLAMIZAR RICO

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1 Tecnología SWQ	15
1.2 Calidad de agua	15
1.3 Machine Learning	17
1.4 Sensores Especiales Desarrollados	17
1.4.1 Aceite en agua	18
1.4.2 Sólidos suspendidos	18
1.4.3 Conductividad	18
1.4.4 pH	19
1.4.5 Oxígeno Disuelto	19
1.4.6 Temperatura	20
1.5 Métodos de separación Crudo-Agua	20
1.5.1 Osmosis Inversa	20
1.5.2 Demulsificante	21
1.5.3 Coalescencia	21
1.5.4 Centrifugado	21
1.6 Planta Saara	22
1.6.1 Sección de Pretratamiento	23
1.6.2 Estación de Alimentación	23
1.6.3 Filtros EBS (Mallas)	24
1.6.4 Filtros AMF (Casetes)	25
1.6.5 Filtros (Cartucho)	27
1.6.6 Sección Osmosis Inversa	27
2. METODOLOGÍA	29
2.1 Diseño metodológico	31
2.2 Procedimiento de Ejecución	35
2.2.1 Procedimiento de instalación del primer equipo	36
2.2.2 Procedimiento de instalación del segundo equipo	43
3. RESULTADOS Y ANALISIS	50
3.1 Comparación de lecturas SWQ-Laboratorio	50
3.1.1 Conductividad	50
3.1.2 Aceite en agua	52
3.1.3 pH	54
3.1.4 Temperatura	56
3.2 Análisis de lecturas	57

3.2.1	Análisis de lectura de conductividad	59
3.2.2	Análisis de lectura de Aceite en agua	60
3.2.3	Análisis de lectura de pH	61
3.2.4	Análisis de lectura de Temperatura	62
4.	CONCLUSIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA	66
	ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Diseño metodológico del proyecto con el modelo cascada</i>	35
Figura 2 <i>Ensamblado del equipo</i>	36
Figura 3 <i>Descripción general del equipo</i>	39
Figura 4 <i>Módulo de sensores</i>	40
Figura 5 <i>Diagrama General del módulo de transmisión</i>	41
Figura 6 <i>Módulo con sensores</i>	42
Figura 7 <i>Smart Water Quality Module</i>	43
Figura 8 <i>Punto de instalación 2 Planta Saara – Frontera Energy</i>	44
Figura 9 <i>Módulo de sensores</i>	46
Figura 10 <i>Diagrama General del módulo de transmisión</i>	47
Figura 11 <i>Módulo con sensores</i>	48
Figura 12 <i>Smart Water Quality Module</i>	49
Figura 13 <i>Tendencia de Conductividad</i>	51
Figura 14 <i>Tendencia de Aceite en agua</i>	53
Figura 15 <i>Tendencia de pH</i>	55
Figura 16 <i>Tendencia de Temperatura</i>	57
Figura 17 <i>Media Móvil Conductividad</i>	59
Figura 18 <i>Media Móvil Aceite en agua</i>	60
Figura 19 <i>Media Móvil pH</i>	61
Figura 20 <i>Media Móvil Temperatura</i>	62
Figura 21 <i>código Python 1 parte</i>	69
Figura 22 <i>Código Python 2 parte</i>	69
Figura 23 <i>Código Python 3 parte</i>	70
Figura 24 <i>Código Python parte final</i>	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Parámetros para riego en cultivo</i>	17
Tabla 2 <i>Lecturas de Conductividad</i>	50
Tabla 3 <i>Lectura de Aceite en agua</i>	52
Tabla 4 <i>Lecturas de pH</i>	54
Tabla 5 <i>Lectura de Temperatura</i>	56
Tabla 6 <i>Parámetros para riego en cultivo</i>	71

ABREVIATURAS

SWQ	Smart Water Quality
ML	Machine Learning
SAARA	Sistema de Aprovechamiento de Agua para Riego Agrícola
C°	Grados Celsius
F°	Grados Fahrenheit
MG/LT	Miligramo sobre Litro
PPB	Partes por Billón
SST	Sólidos Suspendidos
ms/cm	Microsiemens por centímetros
OD	Oxígeno Disuelto
RO	Osmosis Inversa
OIW	Oíl In Water
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

RESUMEN

En el transcurso de este estudio, desarrollado en la planta de tratamiento Saara, ubicada en el municipio de Puerto Gaitán, Meta, y perteneciente a la operadora Frontera Energy, que recibe agua de producción de los campos Quifa y Rubiales, se llevó a cabo la implementación de la tecnología SWQ. Esta innovadora tecnología permite medir diversos parámetros de calidad del agua en tiempo real, proporcionando información valiosa sobre la calidad del agua que ingresa y se trata en la planta.

El proceso comenzó con la planificación de múltiples reuniones para identificar los puntos óptimos y adecuados para la instalación de la tecnología. Posteriormente, se enviaron dos ingenieros para llevar a cabo la instalación, quienes, además de ejecutar la instalación, supervisaron continuamente los equipos, monitoreando su funcionamiento y resolviendo cualquier inconveniente que pudiera surgir con los sensores. Este seguimiento se prolongó durante aproximadamente 20 días consecutivos, centrándose especialmente en el punto final de la planta, conocido como la piscina de permeado, donde el agua tratada y filtrada alcanza condiciones ideales para su uso en la inyección a cultivos, de acuerdo con la Resolución 1256 del 2021.

Para garantizar mediciones precisas, los equipos fueron calibrados con el objetivo de acercar sus valores a los obtenidos en laboratorio. Posteriormente, se recopiló toda la información tomada durante este período. La data recopilada se sometió a un análisis utilizando técnicas de machine learning, lo que permitió obtener lecturas más eficientes y cercanas a los estándares ideales. Las comparaciones entre estas lecturas aplicadas con machine learning y las muestras de pruebas de laboratorio revelaron que los resultados obtenidos mediante esta tecnología eran aún más precisos.

El éxito de esta implementación despertó el interés de Frontera Energy, quien expresó su deseo de continuar expandiendo el uso de esta tecnología en la planta y de realizar mejoras adicionales en los equipos. Este enfoque innovador no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también representa un avance significativo en el monitoreo y la gestión de la calidad del agua en instalaciones de tratamiento como la mencionada.

Palabras clave: Agua producción, monitoreo, sensores, machine learning, parámetros, planta Saara, Quifa, Rubiales, Osmosis inversa

INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo se produce una gran cantidad de agua junto con los hidrocarburos. En los campos Rubiales y Quifa de los Llanos Orientales se tiene un corte de agua alrededor del 98% esto significa que para tener 2 barriles de crudo se tienen que extraer 98 barriles de agua. “Esta gran cantidad de recurso hídrico se ve como una oportunidad valiosa de poder destinar el agua de producción en varias posibles aplicaciones” [1, pp. 12-13].

“En el caso de Colombia, el uso que se le pueda dar al agua después de sus correspondientes procedimientos de tratamiento dependerá básicamente de su calidad, siendo principalmente tres sus posibles usos: reinyección, vertimiento y uso agroindustrial, Los parámetros de calidad de agua que se miden en los tanques de almacenamiento para reinyección en las estaciones de Ecopetrol son: Grasas y aceites en agua (medido en partes por millón), Sólidos suspendidos totales SST (medido en partes por millón), pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto en el agua. De estos 6 parámetros anteriormente mencionados, grasas en agua, SST y oxígeno disuelto DO son los que cobran mayor relevancia” [1, pp. 12-13].

En el caso específico de la planta Saara, que recibe el agua de producción de los campos Rubiales y Quifa, se lleva a cabo un riguroso proceso de toma de muestras de laboratorio cada hora, utilizando instrumentos y protocolos específicos de laboratorio. La constante medición de estos parámetros es fundamental, dado que entidades reguladoras como la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) imponen la necesidad de un monitoreo periódico de esta información. Esta práctica garantiza que estas entidades tengan acceso a datos actualizados y precisos sobre los parámetros del agua que llega a los cultivos, asegurando así el cumplimiento de los estándares y normativas establecidos. Este enfoque proactivo no solo cumple con los requisitos regulatorios, sino que también fortalece la transparencia y responsabilidad en la gestión ambiental de la planta Saara.

“El equipo de monitoreo de calidad de agua desarrollado en conjunto entre Ecopetrol ICP y JPT Consulting and Services, usa un arreglo de sensores y transductores que miden cada parámetro de calidad de agua de forma independiente, pero en un mismo

instrumento. Estos sensores están ubicados sobre un soporte oilofóbico a prueba de agua que flota, se sostiene sobre la superficie del agua o puede ser sumergido en tanques de almacenamiento hasta 15 metros de profundidad. A través de una electrónica de acondicionamiento de señales y telemetría, se envía la señal procesada de los sensores hacia un concentrador de señales o HUB, que se encarga de almacenar, gestionar las comunicaciones y enviar la información a una base de datos en internet para su posterior visualización a través de una aplicación web. Esta aplicación puede ser consultada por cualquier dispositivo (computador, tableta o celular) con conexión a internet” [1, pp. 12-13].

Esta tecnología tiene la ventaja de que su toma de muestras es 24 horas al día con un rango de una muestra cada minuto o medio minuto para tener un rango amplio de muestreo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Tecnología SWQ

“El equipo de monitoreo de la calidad del agua en tiempo real ha sido desarrollado conjuntamente con Ecopetrol y está orientado a la toma de información continua en tiempo real de los parámetros de calidad críticos monitoreando continuamente cambios en los parámetros y así generar acciones rápidas de control del proceso optimizando costos y reduciendo riesgos. El sistema consta de un módulo de sensores sellado fabricado en material oleo-fóbico que soporta hasta 50 psi estándar con su módulo electrónico para adquisición y un módulo remoto de procesamiento y comunicaciones, HUB, para transmisión en tiempo real a través de Safewireless o comunicación estándar por 4-20 análogo o ModBus digital. El módulo de sensores permite adaptarse a diferentes condiciones, en la versión ambiental básica se incluyen sensores de temperatura, conductividad y pH. El equipo para medición de calidad de agua de vertimiento incluye sensores adicionales para medir grasas y aceite en agua desde 1 mg/Lt y medición infrarroja de sólidos suspendidos, estos sensores son desarrollados por ICP-JPT. El equipo para medición de calidad de agua para inyección incluye adicionalmente un sensor de oxígeno disuelto desde 1 ppb. El equipo para calidad de agua en aplicaciones de agroindustria permite determinar el índice RAR y verificar todos los demás parámetros en tiempo real. El sistema de medición de calidad de agua es integral y está orientado al gerenciamiento del agua producida en campos maduros en tiempo real. El sistema incluye monitoreo ambiental básico, vertimiento, inyección y otras aplicaciones agroindustriales” [2, p. 1].

1.2 Calidad de agua

“En promedio la producción de agua asociada a la extracción de crudo ha aumentado llegando hasta 5-7 veces más producción de agua que de hidrocarburo (2,3) lo cual nos muestra una cantidad aproximada de 300.000m³ de agua producida por año en conjunto para la producción global de 100 millones de barriles diarios de petróleo. El agua producida asociada a los hidrocarburos contiene sales y otras sustancias y minerales, por lo que es procesada en plantas de tratamiento siendo separada del petróleo. En los casos que el agua contiene sales y minerales en exceso, es normalmente reinyectada

en formaciones profundas o requiere tratamiento especial para poder reutilizarla o descargar en otros cuerpos de agua (vertimiento), en estos casos es importante el monitoreo de parámetros físico químicos sea con muestras o dispositivos en tiempo real como el que fue diseñado y se presenta en este artículo. En operaciones fuera de costa, el agua normalmente se descarga al mar en muchas ocasiones y requiere ser tratada y monitoreada igualmente (3). El monitoreo del agua a ser descargada en vertimiento o reutilizada es importante, las regulaciones son menos estrictas que en operaciones continentales, pero están siendo revisadas y son mayores considerando la necesidad de controlar el cambio climático y la contaminación global. El volumen producido en producción fuera de costa es unas 2 a 3 veces menor que en producción continental.

Considerando que el agua de producción tiene aceite suspendido y compuestos aceitosos disueltos, sales, metales y otras sustancias, es necesario procesar toda el agua cuyo fin sea disponerla en vertimiento, reinyección para recobro y otras aplicaciones especiales minimizando cualquier daño o alteración de los ecosistemas. El costo de procesar el agua producida oscila entre un costo bajo a medio para disposición en formaciones profundas a través de pozos sumideros o letrinas, pero en plantas de tratamiento para vertimiento, reinyección y aplicaciones especiales el costo es elevado llegando hasta unos 5 dólares por barril. Recientemente hay limitaciones para disponer del agua contaminada en formaciones profundas cercanas al basamento causadas por la saturación de las formaciones y por algunos casos de sismicidad (3) inducida por el aumento del volumen de agua asociado a campos cada vez más maduros. Estas condiciones junto a la falta de agua utilizable en muchas regiones y regulaciones ambientales más estrictas están impulsando las opciones de reutilización y reciclaje del agua residual producida y tratada en plantas de producción” [3, p. 2].

La calidad de agua que se requiere para el riego en los cultivos de palma se rige bajo varias normativas las cuales están especificadas en la siguiente tabla:

Tabla 1

Parámetros para riego en cultivo

Parámetro	Límites Artículo 5 Resolución 1256 del 23 de noviembre de 2021 (incluye en negrilla límites de uso agrícola - Art 40 Decreto 1594 de 1984)	Límite aplicable en la planta	REQUERIMIENTO NORMA
Conductividad eléctrica	1500 uS/cm	750 uS/cm	Medición - Art 40 Decreto 1594 de 1984 (Artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015)
Hidrocarburos Totales	1 PPM	1 PPM	Artículo 5 Resolución 1256 de 2021
pH	4,5 a 9	4,5 a 9	Art 40 Decreto 1594 de 1984 (Artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015)
Sólidos suspendidos totales -TSS		1 PPM	Esto no lo dice ningún documento, es lo adecuado para riego en un cultivo
Temperatura		32 °C	Esto no lo dice ningún documento, es lo adecuado para riego en un cultivo

Nota. Parámetros a los que debe ir el agua para el riego al cultivo de palma de aceite

1.3 Machine Learning

“El Machine Learning o aprendizaje automático es un campo científico y, más particularmente, una subcategoría de inteligencia artificial. Consiste en dejar que los algoritmos descubran «patterns», es decir, patrones recurrentes, en conjuntos de datos. Esos datos pueden ser números, palabras, imágenes, estadísticas, etc. Todo lo que se pueda almacenar digitalmente puede servir como dato para el Machine Learning. Al detectar patrones en esos datos, los algoritmos aprenden y mejoran su rendimiento en la ejecución de una tarea específica.

En resumen, los algoritmos de Machine Learning aprenden de forma autónoma a realizar una tarea o hacer predicciones a partir de datos y mejorar su rendimiento con el tiempo. Una vez entrenado, el algoritmo podrá encontrar los patrones en nuevos datos” [4].

1.4 Sensores Especiales Desarrollados

“Aparte de la incorporación de algunos sensores comerciales especializados (que deben ser evaluados y seleccionados para que operen bien en las condiciones de campo), se

desarrollaron los sensores para determinar la cantidad de aceite suspendido en agua (OIW) que se asocia a la medida de grasas y aceites de laboratorio y el sensor de turbidez con base en emisión infrarroja por nefelometría y absorción. Estos sensores operan dentro del rango esperado para monitorear la calidad del agua residual de plantas siendo optimizados para el rango de 1 a 40mg/Lt de aceite suspendido y 0 a 100NTU de turbidez” [3, p. 9].

1.4.1 Aceite en agua

“Un aceite en suspensión es una mezcla heterogénea entre el petróleo y el agua, con partículas de soluto que pueden verse a simple vista y que, al dejarse en reposo, sedimentan; o puede también presentarse de forma coloide, que es cuando se tiene un tamaño de partícula del soluto que es intermedio entre las soluciones y las suspensiones, no se distinguen a simple vista y no sedimentan. y sus unidades de medición se dan en parte por millón (MG/LT)” [5].

1.4.2 Sólidos suspendidos

“Los sólidos en suspensión o sólidos suspendidos se refieren a pequeñas partículas sólidas que permanecen en suspensión en agua como coloide o debido al movimiento del agua. Los sólidos en suspensión se pueden eliminar por sedimentación debido a su tamaño comparativamente grande. Se utiliza como indicador de la calidad del agua y de la fuerza de las aguas residuales o aguas residuales en general. Es un parámetro de diseño importante para los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Los sólidos en suspensión son importantes ya que los contaminantes y patógenos se transportan en la superficie de las partículas. Cuanto menor sea el tamaño de partícula, mayor será el área de superficie total por unidad de masa de partícula en gramos y, por lo tanto, mayor será la carga contaminante que probablemente se transportará” [6].

1.4.3 Conductividad

“La conductividad de una sustancia se define como "la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido". Las unidades son Siemens por metro [S/m] en sistema de medición SI y micromhs por centímetro [mmho/cm] en unidades estándar de

EE.UU. La corriente eléctrica resulta del movimiento de partículas cargadas eléctricamente y como respuesta a las fuerzas que actúan en estas partículas debido a un campo eléctrico aplicado. Dentro de la mayoría de los sólidos existen un flujo de electrones que provoca una corriente, y a este flujo de electrones se le denomina conducción electrónica. En todos los conductores, semiconductores y en la mayoría de los materiales aislados se genera conducción electrónica; la conductividad eléctrica depende en gran medida del número de electrones disponibles para participar en el proceso de conducción. La mayoría de los metales son buenos conductores de electricidad, debido al gran número de electrones libres que pueden ser excitados en un estado de energía vacío y disponible” [7].

1.4.4 pH

“El pH es una medida de la concentración de ácidos (protones) o bases (hidróxidos) en agua. La alcalinidad total del agua es la medida de su capacidad para neutralizar ácidos. Indica cuánto ácido puede absorber una solución sin cambiar el pH. En otras palabras, la alcalinidad refleja la capacidad amortiguadora de una solución. Si un agua tiene una baja alcalinidad, su pH disminuirá con rapidez al agregarle un ácido” [8].

1.4.5 Oxígeno Disuelto

“El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno gaseoso que esta disuelto en el agua. El oxígeno libre es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos; por eso, desde siempre, se ha considerado como un indicador de la capacidad de un río para mantener la vida acuática. La concentración de este elemento es resultado del oxígeno que entra en el sistema y el que se consume por los organismos vivos. La entrada de oxígeno puede estar provocada por muchas fuentes, pero la principal es el oxígeno absorbido de la atmósfera. Este oxígeno se disuelve con facilidad hasta que el agua se satura. Una vez disuelto, se difunde lentamente y su distribución depende del movimiento del agua. Este proceso es natural y continuo, de modo que continuamente existe intercambio de oxígeno entre el agua y el aire. La dirección y velocidad depende del contacto entre ambos” [9, p. 1].

1.4.6 Temperatura

“La temperatura es una medida de la energía cinética media de las moléculas de agua.

Se mide en una escala lineal de grados Centígrados o grados Fahrenheit.

Es uno de los parámetros más importantes de la calidad de agua. La temperatura afecta la química del agua y las funciones de los organismos acuáticos. La temperatura influye en:

- La cantidad de oxígeno que se puede disolver en el agua
- La velocidad de fotosíntesis de las algas y otras plantas acuáticas
- La velocidad metabólica de los organismos
- La sensibilidad de organismos a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades
- Épocas de reproducción, migración y estivación de organismos acuáticos” [10].

1.5 Métodos de separación Crudo-Agua

Los fluidos de perforación están constituidos de fases continua, inerte, coloidal y química que trabajan sinérgicamente para conservar las propiedades adecuadas del fluido. A continuación, se explicará brevemente cada una de estas fases.

1.5.1 Osmosis Inversa

“Es un procedimiento impulsado por una presión diferencial mayor que la presión osmótica [66]. Las membranas de RO están diseñadas para rechazar todas las especies distintas del agua. Esta tecnología puede eliminar contaminantes más pequeños que el resto de membranas y se obtienen efluentes de alta calidad [12]; sin embargo, son incapaces de ofrecer una barrera significativa a los gases disueltos y a ciertas moléculas orgánicas de bajo peso molecular [5], el tamaño del poro se encuentra entre 5 – 15 Å, permitiendo retener un contenido máximo de sólidos del 30 % [64]. El tipo de membrana más común utilizado en los procesos de ósmosis inversa es la membrana semipermeable [66]. Los sistemas de membrana de ósmosis inversa tienen una vida útil entre tres y siete años. Sin embargo, las incrustaciones de membrana y el escalado son un punto crítico en este proceso, junto con el alto costo de requisitos de presión y capital” [11, p. 9].

1.5.2 Demulsificante

“Existen varios métodos para la demulsificación del petróleo crudo, entre ellos, electro sedimentación, demulsificación supersónica, centrifugación y demulsificación química con demulsificantes. La demulsificación química es el método más utilizado para tratar emulsiones de aceite en agua e implica el uso de aditivos químicos para acelerar el proceso de ruptura de la emulsión. Los tensoactivos inducen a la estabilización de las emulsiones aceite-agua, al reducir la tensión interfacial entre estas y el potencial zeta en las superficies de las gotas de aceite [12]. Los demulsificantes comerciales son tensoactivos poliméricos como copolímeros de poli (óxido de etileno) (PEO) y poli (óxido de propileno) (PPO), además de alquilfenol –resinas de formaldehído o mezclas de diferentes sustancias tensoactivas [52]. En Angie Tatiana Ortega Ramírez Yurleni Fernanda Arcila Laura Marcela Vargas Díaz Revista ingeniería, Investigación y Desarrollo (I2+D) Vol. 19 - No. 2, 2019. 68 la mayoría de los aceites crudos, los sólidos tales como los sulfuros de hierro, limos, arcilla, lodo de perforación, parafina, etcétera complican el proceso de demulsificación” [11, p. 7].

1.5.3 Coalescencia

“Cuando el petróleo u otros hidrocarburos líquidos se mezclan con pequeñas gotas de agua dentro de una fase líquida continua. Esta mezcla se separará por sí sólo muy lentamente o nunca.

Para separar una mezcla de este tipo en diferentes fases o componentes, se utiliza el método físico de coalescencia.

Esencialmente las pequeñas gotas se ponen en contacto entre sí para formar gotas más grandes. Estas gotas más grandes se pueden separar más fácilmente, por ejemplo, por gravitación debido a la diferente densidad del agua y el aceite” [12].

1.5.4 Centrifugado

“Este método se basa en el principio de separación del agua y del petróleo por sus diferencias de densidades, lo cual origina que la mayor parte del volumen de agua que

se encuentra en forma de emulsión disuelta en el crudo se separe. El crudo se somete a ciertas temperaturas, y a la acción de la fuerza centrífuga, lo cual permite tal separación.

Este método se rige por las normas ASTM – 4007, y permite determinar el contenido de agua y sedimentos en el crudo, el cual se expresa en % (v/v) de agua y sedimentos” [13].

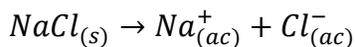
1.6 Planta Saara

La planta Saara está diseñada para el tratamiento del agua de producción del campo Rubiales de la operadora Ecopetrol y del campo Quifa de la operadora Frontera Energy, después de hacer la recolección de esta agua pasa por un proceso de filtración y tratamiento para posteriormente ser inyectado a 3000 hectáreas de cultivo de palma de aceite con cierta calidad de agua.

“La técnica utilizada para desalinizar el agua es la Ósmosis inversa. En este método se baja el tratado. El agua que pasa a alta presión, a través de membranas semipermeables que permiten el paso de agua, pero impiden la penetración de sal. Antes de que el agua pueda ser presurizada a través de las membranas hay que tratarlas para eliminar los sedimentos. Para ello se utilizan tres tipos de filtración: filtración por mallas EBS (25 μm), casetes AMF (7 μm) y filtración de cartucho (5 μm). Después de la desalinización, el pH del agua permeada se ajusta y se envía al depósito de producto. El proceso general de tratamiento consta de las siguientes secciones: · Estación de alimentación: bombeo y presurización del agua de alimentación. EBS, AMF y filtración de cartuchos: clarificación de agua, eliminación de sedimentos R.O. Planta el cual es el Proceso de desalinización. Estación de Tratamiento de Aguas Residuales tratamiento de aguas residuales y lodos, aumento del agua de la planta índice de recuperación. Sistemas CIP: sistemas de limpieza para diferentes componentes de la planta. Bombas dosificadoras y servicios públicos: ajuste químico del agua de proceso y aguas residuales de la planta. Este documento trata de la operación y control general de la planta. Su finalidad es darle a la planta operadores y una guía de cómo interactuar con el sistema de control de Cloruros.

La concentración de cloruros es de vital importancia en los lodos de perforación ya que indicando el grado de salinidad, y la cantidad de sales que se han solubilizado en estos, lo cual puede generar que en el entorno se presenten reacciones de precipitación que

pueden taponar los agujeros del pozo. Los cloruros por lo tanto se pueden definir como la cantidad de iones cloro presentes en el filtrado del lodo [24]. La alta concentración de este tipo de anión puede provenir de diferentes fuentes como lo son el agua salada de la formación, sales agregadas al lodo, entre otras [23]. Son compuestos que tienen un átomo de cloro como anión, teniendo como estado de oxidación un valor de -1, estos se pueden obtener mediante la reacción de diferentes bases con ácido clorhídrico (HCl), por lo que durante su reacción se produce una disociación electrolítica, como la que se muestra a continuación:



La salinidad de un lodo de perforación se determina mediante una titulación del filtrado obtenido con nitrato de plata a una concentración de 0.028 molar, de esta manera y mediante un indicador que vira en la presencia de cloruros se precipita la solución obteniendo un compuesto de color rojo ladrillo [23]” [14, p. 4].

1.6.1 Sección de Pretratamiento

“Esta sección incluye todas las etapas de pretratamiento aguas arriba del tratamiento de ósmosis inversa diseñadas para eliminar todos los sedimentos y sólidos del agua de alimentación para alcanzar los parámetros aplicables para la alimentación de RO. El pretratamiento Incluye tres etapas principales: filtros EBS (Filtros de malla) de 25 µm, filtros AMF (Filtros de Casette) de 7 µm y Filtros de cartucho de 5 µm. La estación de alimentación bombea el agua de alimentación al sistema con suficiente presión para pasar las dos primeras etapas de pretratamiento. Las bombas de baja presión presurizan el agua aguas abajo de los filtros AMF con suficiente presión para pasar los filtros de cartucho y entrar a las bombas de alta presión de RO. [1]” [14, p. 8].

1.6.2 Estación de Alimentación

“La estación de alimentación está ubicada dentro del foso de alimentación incluye: Estación de analizadores de agua de alimentación, incluida la bomba de alimentación del analizador. 5 bombas de alimentación (01-P-001A-E) y válvulas circundantes e Instrumentos: válvulas automáticas de alimentación (MV-101A-E), entrada y Medición de la presión de salida. Bomba sumergible de la estación de alimentación (01-P-019)

operada por los pozos. sensores de nivel. Unidad de coagulación EBS que incluye tanque de coagulante y dosificación. El sistema de analizadores de agua de alimentación incluye las bombas de alimentación de los analizadores (01- P-018) cuatro analizadores que miden continuamente el TSS (Total Sólidos Suspendidos), concentración de aceite, turbidez y conductividad. El analizador de conductividad también incluye medición de temperatura. Todos estos valores continuos se envían al sistema de control de la planta, que alarma e incluso detiene el sistema cuando los valores de alimentación están fuera los parámetros de diseño de la planta. Las líneas de alimentación del analizador incluyen interruptores de flujo que indican si el agua está llegando a los analizadores. Las 5 bombas de la planta (01-P-001A-E) son bombas de succión axial fabricadas por servicio de flujo. Cada bomba está diseñada para bombear hasta un caudal de 1000-1100 m³ /h con una altura diferencial hasta 4,3 bares. Las cinco bombas incluyen un convertidor de frecuencia (VFD) que controla la velocidad del motor de la bomba. El VFD opera automáticamente para mantener constante presión de 3,5 bar en el colector de recogida de la bomba (la presión se mide mediante el instrumento de presión PI-201). Cada bomba también incluye 5 de temperatura y 3 de vibración. sensores conectados al control sistema para indicar irregularidades en el funcionamiento de la bomba. El sumergible de la estación de alimentación La bomba está ubicada dentro del alimentador. pozo, y está diseñado para eliminar agua del pozo en caso de que el pozo esté inundado” [14, p. 9].

1.6.3 Filtros EBS (Mallas)

“El sistema EBS incluye:

95 filtros EBS dispuestos en 19 filas de 5 filtros. Cada unidad de filtrado incluye válvula de lavado neumática y un Micro interruptor que controla el movimiento del escáner de succión durante el lavado del filtro. Cabezal de alimentación EBS que incluye 2 válvulas de alivio de presión (PSV-101A-B) que protegen la tubería de altas presión (superior a 3,8 bares), incluidas las señales al sistema de control y al caudalímetro (FI-201). Colectores de alimentación y producto EBS (30``) con tres mediciones de presión en cada cabezal diseñados para medir y calcular la presión diferencial en los filtros EBS. Línea de salida de lavado (20``) con interruptor de flujo que indica que el lavado está funcionando. Conexión de entrada y salida de la unidad EBS (6``) con válvulas de

aislamiento manuales por cada 2 filas. El sistema EBS CIP se encuentra en el área CIP. PLC local y panel de solenoides por cada 2 filas de filtros. Los EBS (filtros de pantalla automáticos) es la primera etapa de filtración previa al tratamiento. Los filtros EBS 10000 están dispuestos en 19 filas de 5 filtra cada uno. La presión de funcionamiento será de 3,5 bar. El lavado se realiza para cada fila por separado en caudal de lavado de 175 m3 /hr cuando el diferencial La presión de estos filtros es superior a 0,5 bares. El lavado se puede activar por intervalo de tiempo, diferencial. presión medida por el sistema de control como diferencia entre la presión de entrada y salida del filtro mediciones (PIT205-PIT211) o manualmente. Durante el lavado, las bombas de alimentación deben suministrar este flujo adicional para el lavado. La limpieza de los filtros se realiza. Por el escáner de succión que gira en espiral a través de la pantalla, las válvulas de escape abiertas crean una succión de alta velocidad. chorro en la punta de la boquilla que "aspira" la torta de filtración de la malla. Durante el proceso de autolimpieza, lo que toma aproximadamente 60 segundos por cada fila de 5 filtros, el agua filtrada continúa fluyendo aguas abajo. El tiempo total de lavado para todos los filtros es de 18 a 25 minutos. El sistema también está equipado con un CIP designado" [14, p. 10].

1.6.4 Filtros AMF (Casetes)

“Los filtros AMF incluyen:

45 filtros AMF dispuestos en 8 calles. Cada filtro incluye 11 válvulas neumáticas que operan en las diferentes etapas de filtración y lavado y 5 micro interruptores que controlan las secuencias de lavado. · Colector de alimentación (30``) que incluye una medida de presión y un analizador de turbidez (AI-201) · Cabezal de entrada para cada calle (5 o 6 filtros AMF, 16``) incluida la medición de presión de alimentación de la calle y línea de alimentación para cada filtro (6``) · Colector de producto AMF que incluye una medición de presión para todos los productos de filtros AMF. (el sistema de control calcula la presión diferencial en los filtros AMF como la alimentación y el producto diferencia de presiones). El colector de producto se reduce a 16`` en cada punto de venta en la calle y a 6`` en cada salida de filtro. · El tanque de lavado AMF que se llena automáticamente desde la línea de productos AMF (a través de válvula MV-307) o desde la línea de permeado RO (a través de la válvula automática MV-352). · Bombas de lavado AMF (03-

P-003.01-08), una para cada calle, y filtro de lavado AMF (03-F-011.01-08) para cada bomba. · Línea de entrada de lavado para cada filtro (3``) incluida la medición de presión. · Lave la línea de salida de cada filtro (3``), divídala en 2 líneas: enjuague la línea para limpiar el pozo de agua (6``) y lave línea de salida (6``) al pozo de aguas residuales. Ambas líneas son comunes a filtros de una sola calle. Todo lavado de calles. Los enchufes se conectan a cabezales de 20" antes de entrar a boxes. · Líneas de entrada y salida CIP (6``) reducidas a 2`` en la entrada del filtro. Las conexiones CIP están aisladas. Con válvulas manuales. El sistema AMF CIP está ubicado en el área CIP. · Línea de drenaje para cada filtro (3/4``, tubo flexible) que se conecta al colector del pozo de agua limpia (20``). · PLC local y panel de solenoides para cada filtro AMF y un PLC separado para cada calle. Los filtros AMF (microfibra automática) son la segunda etapa del pretratamiento. Los filtros AMF eliminan la suciedad. partículas a medida que el agua fluye a través de múltiples capas casetes de microfibra. Estos están adjuntos al coleccionista. Tuberías que permiten que el agua de proceso fluya desde la salida de los filtros. Las partículas de suciedad que se acumulan sobre y entre las capas de microfibra crean una presión diferencial. A un valor diferencial de presión preestablecido o intervalo de tiempo, la centralita activa el sistema de autolimpieza ciclo. A través del proceso de autolimpieza la entrada y Las válvulas de salida se cierran y la válvula de drenaje se abre. Después de la El recipiente del filtro se vacía en el pozo de agua limpia, la bomba de lavado suministra agua presurizada al tubo lanzadera en donde se montan las boquillas de lavado. Estas boquillas se colocan a ambos lados de los casetes y rocían ambos lados de un casete. con corrientes de chorro de alta potencia que penetran las capas de microfibra y desalojan los residuos. Cuando estos chorros Los chorros golpean el soporte de plástico del casete, se reflejan hacia afuera, desalojando los desechos de los casetes y afuera. el drenaje al pozo de aguas residuales. El conjunto de pistón transporta las boquillas rociadoras a través de una sola fila de casetes. en cada golpe. Cuando las boquillas llegan al final de una fila, el mecanismo de giro indexa el paquete de filtro para la siguiente fila de casetes. Luego, el pistón se desplaza en la dirección opuesta, limpiando los casetes a medida que las boquillas los atraviesan" [14, pp. 11-12].

1.6.5 Filtros (Cartucho)

“Los filtros de cartucho absoluto de 5 μm son la última etapa del pretratamiento antes de que el agua ingrese al RO carcacas de membrana. Los cartuchos están dispuestos dentro de 8 alojamientos, cada uno incluye 15 unidades de 40" cartuchos. Al alcanzar una presión diferencial alta (hasta 2 bares, pero no menos de 1 bar, dependiendo de la Capacidad de las bombas LP para suministrar la presión, medida como la diferencia entre la presión de entrada del cartucho – PI 410 y la presión de salida – PI-439), los cartuchos se reemplazan en cada carcasa uno por uno. Durante En sustitución de cada carcasa se desconecta y el flujo pasa temporalmente por las 7 carcacas restantes. Los cabezales de entrada y salida de los cartuchos tienen un diámetro de 30", reduciéndose a 10" por cada alojamiento. entrada y salida. Cada carcaca también incluye un tubo de drenaje de 3" conectado a una línea de drenaje de 4" [14, p. 13].

1.6.6 Sección Osmosis Inversa

“La sección RO incluirá 4 skids con diseño de 3 etapas en cada uno. La etapa 1 en cada patín incluye 102 Carcacas de membrana de 8 elementos. Las carcacas de membrana están conectadas en serie con puertos laterales, 4 alojamientos de membrana a cada lado del cabezal. La etapa 2 en cada skid incluye 48 alojamientos de membrana de 8 elementos. Las carcacas de membrana están conectadas en serie con puertos laterales, 2 carcacas de membrana a cada lado del cabezal. La etapa 3 en cada skid incluye 24 alojamientos de membrana de 8 elementos. El La tasa de recuperación requerida de la sección RO es del 90%. El tipo de membrana RO preferible es la de alta resistencia a la suciedad. elemento como los elementos DOW XFRLE-400/34i. El proveedor tendrá en cuenta la etapa interna. Diseño con dos tipos de membranas. El sistema RO puede producir un flujo de producto nominal de hasta m^3/h cuando los 4 patines funcionan. También puede producir $3300 \text{ m}^3 / \text{hr}$ con 3 patines para períodos cortos. La presión de alimentación de la membrana es aproximadamente del rango de 5,-9,1 bares. Las disposiciones de bombas RO incluyen bombas LP y bombas HP, ambas equipadas con VFD. El caudal máximo de las bombas de refuerzo de etapa 2 es de $530 \text{ m}^3. / \text{hr}$ y su presión diferencial es de 30 metros. Etapa 3 El caudal máximo de las bombas de refuerzo es de $250 \text{ m}^3. / \text{hr}$ y su presión diferencial es de 50 metros. Tanto la etapa 2 como la

etapa 3 impulsores también están equipados con VFD. El sistema RO también incluirá subsistemas de limpieza in situ (CIP). La inyección de productos químicos en la alimentación de RO incluye antiincrustante (alto contenido de sílice), SMBS (bisulfito de sodio) y también una opción entre inyección de ácido para reducir el riesgo de incrustaciones o inyección de NaOH para una mejor eliminación de ciertos solutos. Esquema de sección RO Libro de Operación Planta Potabilizadora Pacific Rubiales - 15 - Los diferentes valores esperados de calidad del agua para el Inverso La alimentación de ósmosis después del pretratamiento se enumeran en la tabla del lado” [14, p. 14].

2. METODOLOGÍA

“El tipo de modelo de proyecto a utilizar en la presente investigación, está basado en el Modelo de cascada, el cual consiste en un sistema de desarrollo que se implementa en la ejecución de pasos de forma lineal; en el que el trabajo se realiza de manera escalonada (similar a una cascada) y en orden secuencial” [15].

En el presente capítulo, se presenta la metodología cascada, la cual se organiza en seis fases claves. Estas etapas, cruciales para el desarrollo del proyecto, han sido detalladas en el diseño metodológico. Cada fase se presenta de manera exhaustiva en este documento, proporcionando una guía completa para la implementación e investigación. Este enfoque estructurado garantiza una comprensión detallada de cada paso, estableciendo así una base sólida y coherente para la ejecución efectiva del proyecto.

“En este enfoque, todas las tareas están vinculadas por una dependencia. Esto significa que debemos finalizar cada tarea antes de poder comenzar con la siguiente. Esto no solo garantiza que el trabajo se mantenga encaminado, sino que también promueve una comunicación clara durante todo el proceso” [15].

Requisitos: En esta fase se definen las condiciones indispensables para el proyecto, lo cual abarca la identificación de las necesidades y metas, así como la especificación de las funciones y atributos que deben integrarse en el producto final.

Análisis: Una vez que se han establecido los requisitos, se procede a realizar un examen minucioso del proyecto. Durante esta etapa, se revisan los requisitos y se identifican posibles soluciones para satisfacerlos. También se evalúan los riesgos y se fijan las limitaciones del proyecto.

Diseño: En la fase de diseño, se desarrolla un plan detallado para el proyecto, que incluye diagramas de flujo y los recursos necesarios. Esta etapa se centra en concebir una solución práctica y adecuada para el proyecto, teniendo en cuenta los requisitos y restricciones establecidos en las fases anteriores.

Programación: Una vez completada la etapa de diseño, se procede a la programación de las pruebas finales. Durante esta fase, se elaboran y evalúan las pruebas para obtener

las bases de datos requeridas. Es fundamental asegurarse de que se cumplan los requisitos y especificaciones establecidos en las etapas anteriores.

Pruebas: Después de la programación, se lleva a cabo la fase de pruebas para verificar la ejecución y el funcionamiento correcto de las pruebas. El propósito de estas pruebas es identificar y corregir cualquier error o inconveniente antes de evaluar los aspectos cruciales de interés.

Operaciones: Una vez completada la fase de pruebas, se procede a la implementación de las pruebas con los diferentes ángulos de inclinación. Durante esta etapa, las pruebas se ejecutan en el entorno real para asegurar su funcionamiento correcto.

Como se observa, este modelo está interconectado con cada uno de los pasos anteriores, lo que implica que no se puede avanzar en la obtención de resultados sin haber realizado previamente el análisis de las variables a diseñar y del procedimiento a llevar a cabo. En el diseño metodológico, se describirán los pasos para la ejecución adecuada de este modelo, considerando su enfoque secuencial y escalonado, y se ejemplifica con un diagrama para una comprensión más clara.

Con el propósito de avanzar en la investigación, las empresas colaboradoras, JPT Consulting and Service y Frontera Energy, facilitarán las instalaciones de prueba, así como los datos de laboratorio y los resultados de las muestras. Además, proporcionarán la tecnología necesaria y contarán con un equipo experto en el campo para brindar respaldo, resolver consultas y programar el alcance necesario para llevar a cabo el modelado y la obtención de resultados a través del aprendizaje automático (machine learning).

Este proyecto se centra en modelar los datos resultantes de la toma de muestras mediante la tecnología SQW utilizando el machine learning, con el objetivo de obtener resultados más precisos y reducir el margen de error. Al finalizar, los resultados obtenidos, junto con sus respectivos análisis, permitirán evaluar la eficacia del procedimiento desarrollado por el machine learning en comparación con un enfoque sin él. Esta mejora en la calidad de los datos resultantes, contrastada con la información de

laboratorio, tiene el potencial de ofrecer respuestas más rápidas y eficientes en términos de costos y tiempos para la evaluación de la calidad del agua en sitio.

2.1 Diseño metodológico

El diseño metodológico se crea considerando el esquema escalonado mencionado previamente. En el diagrama, se representan de manera general los pasos y fases a seguir para llevar a cabo el proyecto.

- Requisitos diseño y análisis (Fase 1,2 y 3)

En primer lugar, para abordar el logro del primer objetivo, fue necesario realizar un análisis e identificación de las limitaciones inherentes a los diversos sensores del equipo SWQ. Durante este proceso, se identificaron diversos factores que impactaban negativamente en las mediciones de los parámetros, entre los cuales se incluyen:

Sensor de pH: El sensor exhibía una saturación rápida debido a la adherencia de algas en el bulbo del sensor, lo que resultaba en lecturas fuera de los rangos establecidos.

Sensor de Oxígeno Disuelto: La membrana de este sensor, al entrar en contacto con elevadas concentraciones de aceite, también experimentaba la adhesión de algas, generando lecturas inexactas.

Sensor de Temperatura: La durabilidad de este sensor resultaba limitada al exponerse a entornos de alta temperatura, lo que ocasionaba desajustes en sus mediciones.

Sensor de Aceite en Agua: Los rangos de medición de este sensor eran considerablemente bajos.

Para abordar estas limitaciones y mejorar la precisión de las mediciones, se implementaron diversas correcciones. Se procedió al reemplazo de algunos sensores por versiones más robustas, se amplió el rango de medición de ciertos dispositivos y, adicionalmente, se decidió ubicarlos en una sección del entorno donde la presencia de aceite fuera mínima, mitigando así la interferencia en las mediciones.

Mediante varias reuniones entre las empresas Frontera Energy, JPT y personal de la Universidad de América, se pudo llegar a un acuerdo para implementar la tecnología SWQ en la planta Saara la cual está diseñada para el tratamiento de agua de producción

con la finalidad de inyección a cultivo agrícola. Además, se pudo analizar y gestionar todos los requisitos necesarios para el transporte, ingreso, adaptación del equipo, instalación y funcionamiento de la tecnología SWQ en la planta en el municipio de Puerto Gaitán, Meta. En estas reuniones se establecieron todos los permisos, procesos y documentación a entregar para poder iniciar este proyecto investigativo.

Aparte se realizó un análisis exhaustivo de la planta para identificar dos ubicaciones estratégicas que representarán diferentes etapas del proceso de tratamiento de agua. Estas ubicaciones fueron seleccionadas considerando la representatividad de los datos recopilados y la cobertura de las áreas críticas del sistema de tratamiento. Los equipos SWQ fueron instalados en estas ubicaciones bajo la supervisión de expertos en el campo, garantizando una instalación precisa y confiable.

Se estableció un protocolo detallado para registrar los valores de los seis parámetros de calidad del agua, que incluían los niveles de aceite en agua, sólidos disueltos, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura y pH. Estos datos se recopilaban de manera continua durante un periodo de 20 días consecutivos, asegurando un registro minucioso y preciso de cada lectura. Se tomaron medidas adicionales para garantizar la integridad de los datos y minimizar posibles errores de medición.

- Programación (Fase 4):

Para el desarrollo del segundo objetivo, se propusieron mejoras en los algoritmos empleados en el aprendizaje automático dentro de la tecnología SWQ. Estas mejoras están dirigidas a potenciar la capacidad de la plataforma para procesar, analizar y prever patrones en los datos de calidad del agua en tiempo real. A continuación, se detallan las siguientes iniciativas:

Implementación de algoritmos avanzados: Se propone la inclusión de algoritmos más avanzados o la aplicación de técnicas de ensemble, que consiste en la combinación de varios modelos. Este enfoque busca mejorar la robustez y la capacidad de generalización del modelo.

Optimización del tiempo de respuesta: Se busca perfeccionar la eficiencia computacional con el objetivo de garantizar respuestas rápidas y en tiempo real. Esto podría lograrse

mediante la optimización de código, la implementación de algoritmos más eficientes o la utilización de hardware especializado para acelerar el procesamiento.

Gestión de datos desequilibrados: Se considera la aplicación de técnicas específicas para abordar desequilibrios en los datos, especialmente cuando algunos parámetros de calidad del agua son menos frecuentes que otros. Esta medida tiene como finalidad mejorar la capacidad del modelo para generalizar en situaciones menos comunes.

Se utilizó software especializado de análisis de datos para realizar una evaluación exhaustiva de los conjuntos de datos recopilados por los equipos SWQ y los resultados de las pruebas de laboratorio. Se llevaron a cabo comparaciones detalladas para identificar patrones, tendencias y correlaciones significativas en los datos. Se prestó especial atención a las discrepancias y se realizaron pruebas de sensibilidad para validar la consistencia de los hallazgos obtenidos.

- Pruebas (Fase 5)

Se implementó un plan de muestreo cuidadosamente diseñado para seleccionar muestras representativas de agua en cada ubicación donde se instalaron los equipos SWQ. Estas muestras se compararon directamente con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio para evaluar la precisión y la confiabilidad del sistema de monitoreo en tiempo real. Se realizaron múltiples mediciones y análisis para confirmar la coherencia de los resultados y minimizar cualquier sesgo potencial.

- Operaciones (Fase 6)

Se optó por utilizar una combinación de algoritmos de machine learning, para analizar los conjuntos de datos recopilados por los equipos SWQ. Estos algoritmos se aplicaron meticulosamente para evaluar la relación entre los parámetros de calidad del agua y para comparar los resultados con los datos proporcionados por las pruebas de laboratorio. Se llevó a cabo una validación cruzada exhaustiva para garantizar la robustez y la fiabilidad de los análisis realizados.

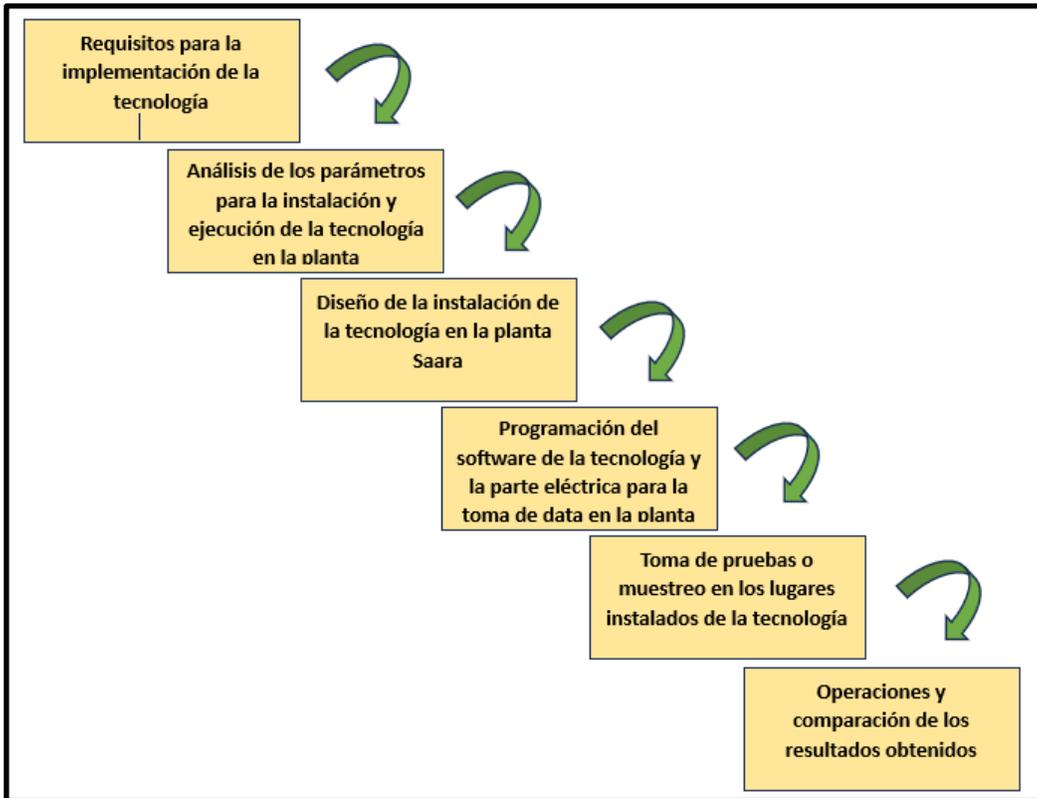
Se esperaba que los resultados demostraran de manera concluyente que la integración de técnicas de machine learning mejoró significativamente la eficacia del sistema de

tratamiento de agua en la planta Saara. Se preveía que estos hallazgos respaldan la fiabilidad y la validez de los datos recopilados por los equipos SWQ en tiempo real, fortaleciendo así la implementación y el uso continuo de esta tecnología en el proceso de tratamiento de agua.

Los resultados obtenidos serán discutidos críticamente en el contexto más amplio del proceso de tratamiento de agua. Se analizará en detalle las limitaciones y posibles fuentes de error para proporcionar una evaluación completa de la investigación como también las ventajas y puntos a favor de ella. Sobre la base de estos hallazgos, se formulará recomendaciones específicas para mejorar la eficiencia del sistema y se identificará áreas prometedoras para investigaciones futuras, teniendo en cuenta las implicaciones prácticas y teóricas de los resultados obtenidos

Figura 1

Diseño metodológico del proyecto con el modelo cascada



Nota. Las etapas incluyen definición de requisitos, diseño, implementación, pruebas realizadas para la implementación de este proyecto investigativo.

2.2 Procedimiento de Ejecución

El proceso ejecutado para la instalación de los equipos se efectuó en diferentes etapas las cuales están descritas en el procedimiento de instalación. Primero se tuvo que realizar un análisis detallado en cuanto a los puntos específicos y riesgos posibles para de esta forma tener un trabajo seguro y con cero incidentes.

Las pruebas que se realizaron en este proyecto consisten en tener unos resultados de lecturas de los diferentes parámetros medidos en los puntos seleccionados de la planta y así mismo comparar con un patrón de corrección que en este caso son las pruebas de laboratorio que se le hacen a estas muestras periódicamente, finalmente analizar y determinar la eficiencia de medición de estos equipos SWQ. Los equipos instalados se muestran en las siguientes figuras.

Figura 2

Ensamblado del equipo



Nota. Equipo SWQ instalado en la piscina de permeado de la planta Saara

Cabe mencionar que se contó con el personal calificado para la instalación de estos equipos, con elementos de protección personal, con el material y equipos adecuados.

2.2.1 Procedimiento de instalación del primer equipo

Objetivo.

Establecer un proceso eficiente y seguro para la instalación del equipo Smart Water Quality (SWQ), mediante el correcto desarrollo de actividades y uso de herramientas; garantizando la integridad de los equipos de monitoreo de calidad de agua, en las estaciones, respetando y cumpliendo con los lineamientos de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) y la gestión de riesgos asociados a la locación.

Alcance.

Este procedimiento se aplica a todo el personal operativo de JPT Consulting & Services encargado de llevar a cabo las actividades de instalación del equipo Smart Water Quality (SWQ). Además, está dirigido a todas las partes interesadas que necesiten comprender el proceso correcto de instalación en los servicios de implementación prestados por la organización.

Definiciones

SWQ: Módulo inteligente de calidad del agua.

EPP: Son los elementos de protección personal, que deben de tener los responsables de la intervención. Estos se deben usar dependiendo de la actividad de mantenimiento correctivo que se valla a desarrollar y respetando los ya establecidos por el campo en donde se encuentren los equipos instalados.

Instalación: Es la actividad técnica ejecutada con el propósito de instalar o colocar un activo o equipo (equipo, herramienta, enseres e instalaciones) con el objetivo de asegurar su funcionamiento normal, garantizar la operación futura y extender la vida útil del equipo.

Herramientas de mano: Son todas aquellas herramientas con las que debe contar el operador en el momento de intervenir el equipo, tales como (Destornilladores, extractor de modulo Venturi, pinzas, martillo, juego de llaves inch, hombre solo, llave expansiva, cinta aislante, O´ring, grasa de alta temperatura, multímetro, Etc.).

Descripción de la actividad. Pará garantizar una instalación eficiente y precisa del equipo Smart Water Quality (SWQ), en el monitoreo de parámetros para medir la calidad de agua, es fundamental seguir los siguientes pasos numerados a continuación:

Cumplimiento Documental

1. Cumplir con los lineamientos y documentos exigidos por la locación para el ingreso de personal y herramientas a la estación (Carnets, Epp, Caja de herramientas Etc.)
2. Identificar y hacer uso de los adecuados EPP, establecidos previamente por la actividad de instalación a ejecutar y los establecidos por los clientes en las diferentes estaciones.

3. Realizar una inspección visual de la zona para identificar las fuentes de peligros y los posibles riesgos asociados a la actividad a desarrollar.

4. Realizar los permisos de trabajo y análisis de riesgo bajo los formatos exigidos por la locación.

Ejecución de actividad de instalación

Inspección visual de los sitios de instalación en la locación.

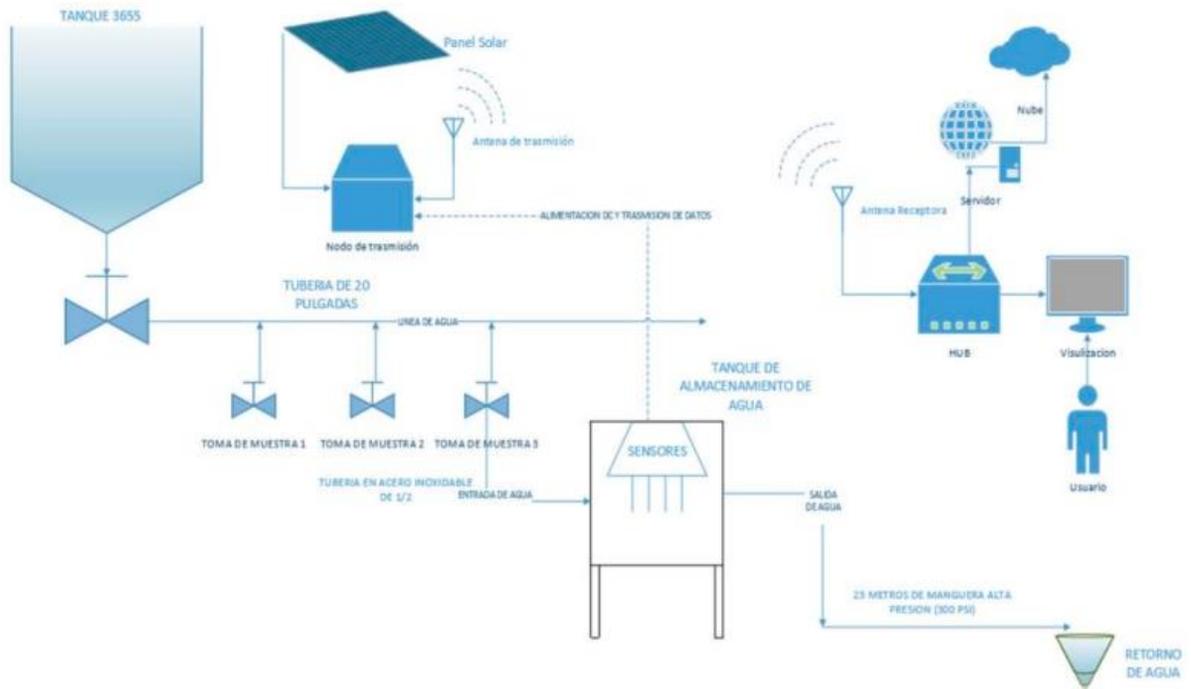
Al ubicarse sobre la locación donde se va a realizar la instalación de la herramienta, se debe verificar que las condiciones sean aptas para el desarrollo de las labores, así mismo los tipos de conexiones para instalación del equipo, con la finalidad de establecer que el área de instalación no representa ningún peligro, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad por parte de los operarios.

Determinación del punto específico de Instalación.

Tomar medidas del equipo y el punto de instalación en locación, con base en medidas se determina la entrada y salida de agua, verificar tipos de conexiones para instalación del equipo (eléctricas, electrónicas, presión y mecánicas), verificar puntos de alimentación, así como puntos de ubicación del nodo de sensores junto con su panel solar encargado de suministrar la energía DC y el Hub encargado del procesamiento de datos.

Figura 3

Descripción general del equipo



Nota: Diagrama de todos los componentes para la instalación de la tecnología. Tomado de: [1] J. Torne, «Sistema de Calidad de Agua,» *Manual sistema (SWQ) version 2.0*, 2020.

Delimitación del área donde se ejecutará la instalación.

Demarcar el sitio específico donde se llevará a cabo la instalación, asegurando una zona segura de trabajo.

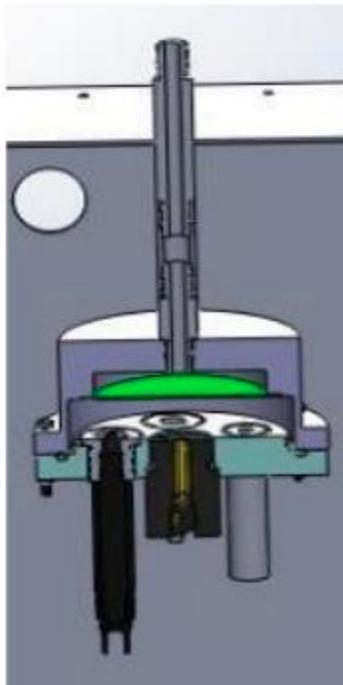
Desplazamiento de materiales al área delimitada. Antes de iniciar la movilización del material, asegurar una trayectoria idónea libre de obstáculos para movilizar el material necesario para realizar la instalación del equipo, dichos materiales son, paneles solares, Nodo, Hub, equipo SWQ, estructura de apoyo, herramientas, entre otros, tener claro el peso límite de carga así mismo no excederlo, considerar ayudas mecánicas para transportar los materiales.

Armado estructural del equipo SWQ. Se organiza la herramienta a utilizar, posteriormente se realiza inspección visual de la misma. Se organiza la estructura en el suelo dejándola libre de cualquier obstáculo, armando un croquis sobre el suelo,

posicionando todos los accesorios necesarios. Seguidamente se inicia con el ensamble y armado de la estructura, usando las herramientas idóneas. Ya con la estructura ensamblada se procede a conectar el panel solar en la parte superior de la misma, seguidamente se asegura el nodo en la parte inferior, finalmente se asegura el módulo SWQ.

Figura 4

Módulo de sensores

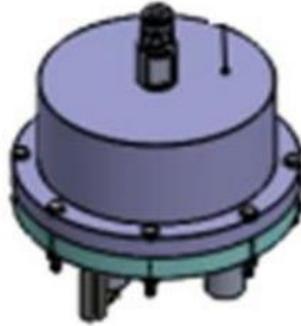


Nota: Visualización de todas las partes del módulo del sensor. Tomado de:[19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalacion 1 y 2 del equipo de SWQ,» Sistema de gestion de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

Prueba de verificación del equipo al aire.

Figura 6

Módulo con sensores



Nota: Visualización del módulo del sensor exteriormente. Tomado de: [19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalación 1 y 2 del equipo deSWQ,» Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

Instalación de Laptop HUB para Monitoreo.

Se procede a verificar el funcionamiento con la laptop HUB, para posteriormente instalar la laptop en un sitio idóneo para la visualización de los parámetros captados por el módulo de sensores Finalmente se realiza la prueba de lectura y recepción de datos en el laptop HUB sincronizada con el módulo de recepción de datos.

Figura 7

Smart Water Quality Module



Nota: Modulo de la tecnología de recepción de data SWQ. Tomado de: [19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalacion 1 y 2 del equipo de SWQ,» Sistema de gestion de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

2.2.2 Procedimiento de instalación del segundo equipo

Inspección visual de los sitios de instalación en la locación.

Al ubicarse sobre la locación donde se va a realizar la instalación de la herramienta, se debe verificar que las condiciones sean aptas para el desarrollo de las labores, así mismo los tipos de conexiones para instalación del equipo (Fuente 110V o área con luminosidad para panel solar), con la finalidad de establecer que el área de instalación no represen ningún peligro o en su defecto este controlado, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad por parte de los operarios.

Antes de iniciar la movilización del material, asegurar una trayectoria idónea libre de obstáculos para movilizar el material necesario, los operadores y/o técnicos deben tener en cuenta las rutas señalizadas por la estación, planta o zona. Para este caso se requiere la movilización de un tanque plástico con estructura metálica hacia el sitio de instalación, esta actividad debe realizarse con el apoyo de Frontera Energy quienes pondrán a disposición de la actividad una camioneta debido a las dimensiones y peso del tanque. Aseguradas las vías de acceso al área determinada, se procede a movilizar los materiales necesarios para ejecutar la instalación del equipo: paneles solares, Nodo, Hub, equipo SWQ, estructura de apoyo, herramientas manuales, abrazaderas metálicas, Tanque 1000 Lt, estructura metálica para tanque, tubería PVC entre otras. Nota: Tener claro el peso en seco y límite de carga (Hombre 25Kg – Mujeres 12Kg) así mismo no excederlo, en caso de que el peso en seco se exceda considere ayudas mecánicas para transportar los materiales (Montacarga manual, Carretilla, Brazo hidráulico, Camioneta).

Ensamble de estructura en PVC de circulación.

Con ayuda del personal de Frontera Energy y Confipetrol, se debe realizar la intervención en la línea de circulación de PVC que trae agua hacia el banco de sensores del punto de instalación y adecuar una estructura para la circulación de entrada del fluido hacia el tanque 1000 LT; en tubería PVC 1/2" anclada a la estructura del tanque por abrazaderas metálicas donde estará ubicado el equipo SWQ y una línea de salida en tubería de 1" PVC hacia rejilla de desagüe. Finalizada la actividad verificar que el sistema de circulación del fluido no presente fugas. Para evitar que se produzca estanqueidad en el fluido y mejorar la respuesta en la lectura de los sensores, se realizará la instalación de dos válvulas de bola en PVC para el control del fluido en la línea de ingreso y salida que permitirá mantener este en constante movimiento.

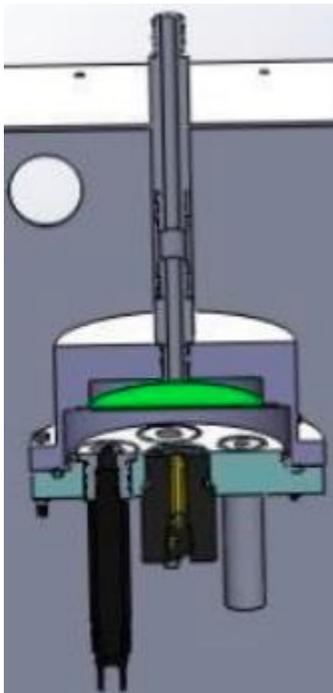
Ensamble estructural del equipo SWQ.

Se organiza la herramienta a utilizar, posteriormente se realiza inspección visual de la misma. Se organiza la estructura en tubo galvanizado de 3/4" en el suelo dejándola libre de cualquier obstáculo, armando un croquis sobre el suelo y posicionando todos los accesorios necesarios. Seguidamente se inicia con el ensamble y armado de la

estructura (sin sobrepasar los 2 metros), el operador debe usar las herramientas idóneas (Llave para tubo, teflón industrial, accesorios roscados).

Figura 9

Módulo de sensores



Nota: Visualización de todas las partes del módulo del sensor. Tomado de: [19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalación 1 y 2 del equipo de SWQ,» Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

Instalación de punto 110V.

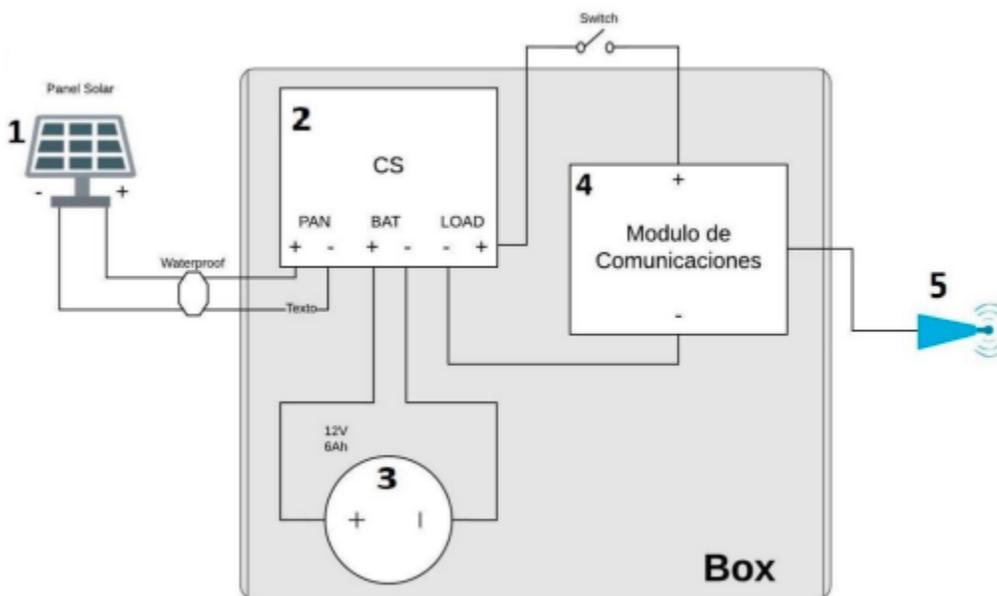
Teniendo en cuenta que el punto de instalación del equipo SWQ se encuentra bajo techo no es posible adecuar el sistema de panel solar, por ende, con la ayuda del personal de Frontera Energy y Confipetrol, se debe realizar la adecuación externa de un tomacorriente con línea de 110V para alimentar el Nodo del equipo SWQ

Asegurar estructura con el Nodo y equipo SWQ.

El personal de JPT procede a realizar el aseguramiento de la estructura al punto de apoyo identificado con anterioridad (estructura metálica del tanque de 1000 LT). Posteriormente se asegura el nodo en la parte media de la estructura de soporte de tubo galvanizado 3/4", tomando de referencia la altura de visual del operador en sitio, finalmente se asegura el módulo SWQ, con amarres metálicos y/o plásticos a la extensión de la estructura (la extensión no debe superar 1 metro de longitud). Asegurado el equipo SWQ con la estructura, se debe levantar y situarlo en posición vertical junto a la estructura metálica del tanque de 1000 Lt, el operador debe posicionarse de manera segura y proceder a instalar los amarres metálicos de forma cruzada para asegurar la estructura del equipo a la barandilla o estructura metálica, la extensión de la estructura del SWQ debe estar posicionada en sentido de la toma de agua o tanque, con el objetivo permitir descargar el equipo SWQ de forma segura y controlada.

Figura 10

Diagrama General del módulo de transmisión



Nota: Visualización del diagrama de componentes de módulo de transmisión. Tomado de:[19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalacion 1 y 2 del equipo de SWQ,» Sistema de gestion de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

Prueba de verificación del equipo al aire.

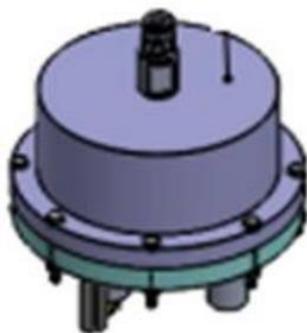
Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del sistema se enciende el equipo y se verifica que la transmisión de datos sea correcta por medio una pantalla portátil conectada al Nodo, al igual se verifica el funcionamiento idóneo del Nodo. El equipo debe transmitir al aire entre 1 y 2 horas para garantizar el funcionamiento de los sensores y la recepción de información por la Beagle en el Nodo.

Inmersión del equipo en el agua.

Asegurada la estructura de soporte a la estructura metálica del tanque plástico de 1000 Lt, se procede a introducir lentamente el módulo con los sensores al agua. Cuando el equipo este cubierto por el agua debe sumergirse entre 30 y 50 cm más, con el objetivo de garantizar una mejor lectura y evitar que los sensores estén al aire si se presenta una merma en el nivel del taque, piscina o toma de agua. Nota: Tener en cuenta que el equipo no debe estar situado hasta el fondo de la piscina, tanque o Durm, ya que puede generar interferencia en los sensores. Por ello siempre garantice que el equipo se encuentre sumergió y suspendido en el agua.

Figura 11

Módulo con sensores



Nota: Visualización del módulo del sensor exteriormente. Tomado de: [19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalacion 1 y 2 del equipo deSWQ,» Sistema de gestion de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

Instalación de Laptop HUB para Monitoreo.

Se procede a verificar el funcionamiento con la laptop HUB, para posteriormente instalar la laptop en un sitio idóneo para la visualización de los parámetros captados por el módulo de sensores. Finalmente se realiza la prueba de lectura y recepción de datos en el laptop HUB sincronizada con el módulo de recepción de datos.

Figura 12

Smart Water Quality Module



Nota: Modulo de la tecnología de recepción de data SWQ. Tomado de: [19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalacion 1 y 2 del equipo de SWQ,» Sistema de gestion de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1 Comparación de lecturas SWQ-Laboratorio

A continuación, se llevó a cabo una comparación detallada entre las lecturas de los diversos parámetros de calidad del agua recopiladas por el equipo SWQ y la información proveniente del laboratorio.

3.1.1 Conductividad

Tabla 2

Lecturas de Conductividad

<i>Fecha</i>	<i>US/CM LAB</i>	<i>US/CM SWQ</i>	<i>Diferencia US/CM</i>	<i>% Error US/CM</i>
2023/11/08 14:01:16	723	616,4	106,6	14,7
2023/11/08 15:01:53	712	630,4	81,6	11,5
2023/11/08 16:01:07	705	623,7	81,3	11,5
2023/11/08 17:00:21	706	635,3	70,7	10,0
2023/11/08 19:00:11	701	633,1	67,9	9,7
2023/11/08 20:00:47	713	638,0	75,0	10,5
2023/11/08 21:00:01	719	647,1	71,9	10,0
2023/11/08 22:00:38	720	633,7	86,3	12,0
2023/11/08 23:02:37	719	636,5	82,5	11,5
2023/11/09 00:00:28	716	632,8	83,2	11,6
2023/11/09 01:01:05	717	633,1	83,9	11,7
2023/11/09 02:00:19	723	633,7	89,3	12,3
2023/11/09 03:00:56	728	651,4	76,6	10,5
2023/11/09 04:00:10	723	646,8	76,2	10,5
2023/11/09 05:02:10	723	656,6	66,4	9,2
17/11/2023 02:00	695	725,8	30,8	4,4
17/11/2023 03:01	696	722,1	26,1	3,7
17/11/2023 04:00	689	719,1	30,1	4,4
17/11/2023 05:00	729,875	722,4	7,5	1,0
17/11/2023 06:00	675	719,1	44,1	6,5
17/11/2023 07:00	688	732,2	44,2	6,4
17/11/2023 08:01	687	743,7	56,7	8,3
17/11/2023 09:00	678	759,9	81,9	12,1

Nota. Lecturas de la conductividad en Us/cm tomados desde el día 8 hasta el 17 de noviembre

Figura 13

Tendencia de Conductividad



Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de conductividad de laboratorio y de la tecnología SWQ

En esta etapa, se llevó a cabo la recopilación de datos por parte del equipo SWQ y del laboratorio para medir la conductividad en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Observamos que, en los primeros días, el equipo SWQ mostró una desviación inicial ligeramente elevada con respecto al estándar proporcionado por el laboratorio. Sin embargo, a medida que transcurría el tiempo, se observó una estabilización, atribuible a las calibraciones realizadas y a su adaptación al punto de muestreo. También se notó un desfase inicial significativo, posiblemente causado por la presencia de aire o algún ruido mecánico. No obstante, las lecturas del equipo SWQ continuaron siguiendo la misma tendencia que las del laboratorio, reduciendo gradualmente su porcentaje de error.

3.1.2 Aceite en agua

Tabla 3

Lectura de Aceite en agua

<i>Fecha</i>	<i>ACEITES SUSP. LAB</i>	<i>ACEITES SUSP. SWQ</i>	<i>Diferencia US/CM</i>	<i>% Error US/CM</i>
2023/11/08 14:01:16	0,1	0,1049	0,0049	4,9
2023/11/08 15:01:53	0,1	0,1063	0,0063	6,3
2023/11/08 16:01:07	0,1	0,1093	0,0093	9,3
2023/11/08 17:00:21	0,1	0,1093	0,0093	9,3
2023/11/08 18:00:57	0,1	0,1097	0,0097	9,7
2023/11/08 19:00:11	0,1	0,1107	0,0107	10,7
2023/11/08 20:00:47	0,1	0,1103	0,0103	10,3
2023/11/08 21:00:01	0,1	0,1103	0,0103	10,3
2023/11/08 22:00:38	0,1	0,1097	0,0097	9,7
2023/11/08 23:02:37	0,1	0,1095	0,0095	9,5
2023/11/09 00:00:28	0,1	0,1013	0,0013	1,3
2023/11/09 01:01:05	0,1	0,1013	0,0013	1,3
2023/11/09 02:00:19	0,1	0,0975	0,0025	2,5
2023/11/09 03:00:56	0,1	0,0983	0,0017	1,7
2023/11/09 04:00:10	0,1	-1,0921	1,1921	1192,1
2023/11/09 05:02:10	0,1	-1,1017	1,2017	1201,7
17/11/2023 06:00	0,1	0,0839	0,0161	16,1
17/11/2023 07:00	0,1	0,0839	0,0161	16,1
17/11/2023 08:01	0,1	0,0843	0,0157	15,7
17/11/2023 09:00	0,1	0,0847	0,0153	15,3
17/11/2023 18:00	0,1	0,0881	0,0119	11,9
17/11/2023 19:00	0,1	0,0885	0,0115	11,5
17/11/2023 20:00	0,1	0,0883	0,0117	11,7
17/11/2023 21:00	0,1	0,0879	0,0121	12,1
17/11/2023 22:02	0,1	0,0879	0,0121	12,1
17/11/2023 23:00	0,1	0,0877	0,0123	12,3

Nota. Lecturas de Aceite en agua en mg/lit tomadas desde el día 8 hasta el 17 de Noviembre

Figura 14

Tendencia de Aceite en agua



Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de aceite en agua de laboratorio y de la tecnología SWQ

Aquí se recopiló la información del sensor de aceite en agua, así como las muestras obtenidas en el laboratorio, expresadas en miligramo sobre litro (MG/LT). En relación a los datos del laboratorio, estas siempre indicaron que las lecturas se mantenían por debajo de 0.1 MG/LT. Sin embargo, en el formato proporcionado, únicamente especifica que las lecturas son inferiores a ese valor, sin detallar la cifra exacta. Por otro lado, las lecturas del equipo SWQ se mantuvieron consistentemente cercanas al valor ideal a lo largo de todos los días. Aunque al observar la gráfica se aprecia un desfase, este se debe a la estrechez de los rangos representados en la misma. No obstante, se puede concluir que las lecturas del equipo SWQ están notablemente próximas a las obtenidas en el laboratorio.

3.1.3 pH

Tabla 4

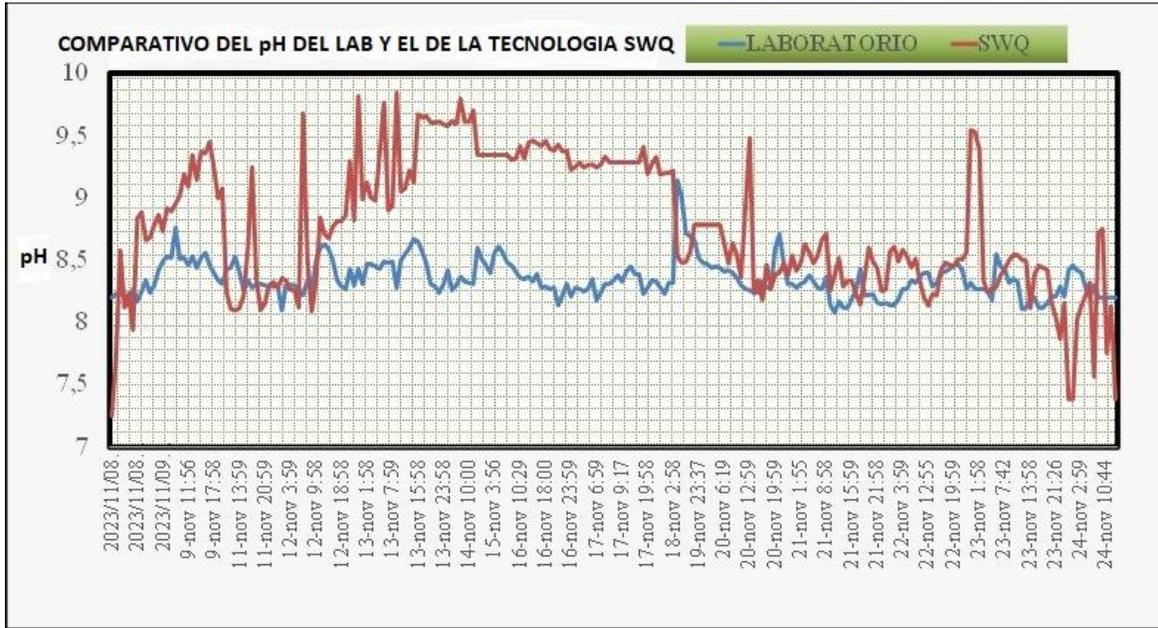
Lecturas de pH

<i>Fecha</i>	<i>pH Lab</i>	<i>pH SWQ</i>	<i>Diferencia PH</i>	<i>% Error Ph</i>
2023/11/08 14:01:16	8,2	7,252	0,948	11,5609756
2023/11/08 15:01:53	8,23	7,723	0,507	6,16038882
2023/11/08 16:01:07	8,23	8,578	0,348	4,22843256
2023/11/08 17:00:21	8,21	8,122	0,088	1,07186358
2023/11/08 19:00:11	8,14	8,236	0,096	1,17936118
2023/11/08 21:00:01	8,27	7,942	0,328	3,96614268
2023/11/08 22:00:38	8,17	8,836	0,666	8,15177479
2023/11/08 23:02:37	8,25	8,884	0,634	7,68484848
2023/11/09 00:00:28	8,34	8,662	0,322	3,86091127
2023/11/09 01:01:05	8,24	8,683	0,443	5,37621359
2023/11/09 02:00:19	8,3	8,785	0,485	5,84337349
2023/11/09 03:00:56	8,42	8,863	0,443	5,26128266
2023/11/09 04:00:10	8,49	8,755	0,265	3,1213192
2023/11/09 06:00:01	8,49	8,734	0,244	2,87396938
2023/11/09 07:00:36	8,53	8,917	0,387	4,53692849
09/11/2023 08:12	8,52	8,893	0,373	4,37793427
09/11/2023 09:00	8,76	8,92	0,16	1,82648402
09/11/2023 10:01	8,51	8,902	0,392	4,60634548
09/11/2023 11:00	8,52	9,232	0,712	8,35680751
09/11/2023 12:00	8,46	9,019	0,559	6,60756501
16/11/2023 22:00	8,36	9,373	1,013	12,1172249
16/11/2023 23:00	8,38	9,373	0,993	11,849642
17/11/2023 01:01	8,35	9,274	0,924	11,0658683
17/11/2023 02:00	8,37	9,295	0,925	11,051374
17/11/2023 03:01	8,33	9,241	0,911	10,9363745
17/11/2023 04:00	8,39	9,274	0,884	10,5363528
17/11/2023 06:00	8,28	9,358	1,078	13,0193237

Nota. Lecturas de pH tomadas desde el día 8 hasta el 17 de Noviembre

Figura 15

Tendencia de pH



Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de pH de laboratorio y de la tecnología SWQ

En términos generales, se observa que las lecturas del equipo SWQ siguen la tendencia del laboratorio, aunque con discrepancias en valores específicos. A lo largo de los días, las lecturas del equipo SWQ muestran cierta consistencia, aunque se identifican variaciones puntuales. Es importante destacar que se evidencia cierta desviación en algunos puntos, posiblemente atribuible a factores como ruido ambiental y la necesidad de calibración del equipo. Se recomienda una revisión detallada de estos momentos para asegurar la precisión y confiabilidad de las mediciones en la piscina de permeado.

3.1.4 Temperatura

Tabla 5

Lectura de Temperatura

Fecha SWQ	T - Lab	T- SWQ	Diferencia T	% Error T
2023/11/08 14:01:16	28,1	28,0976	0,0024	0,00854093
2023/11/08 15:01:53	28,8	28,0976	0,7024	2,43888889
2023/11/08 16:01:07	29,7	28,0976	1,6024	5,3952862
2023/11/08 17:00:21	29,2	28,0976	1,1024	3,77534247
2023/11/08 19:00:11	29,7	28,0976	1,6024	5,3952862
2023/11/08 20:00:47	29,2	27,659	1,541	5,27739726
2023/11/08 21:00:01	28,8	27,659	1,141	3,96180556
2023/11/08 22:00:38	28,4	27,659	0,741	2,60915493
2023/11/08 23:02:37	28,4	27,659	0,741	2,60915493
2023/11/09 00:00:28	28,4	22,8344	5,5656	19,5971831
2023/11/09 01:01:05	28,1	22,8344	5,2656	18,73879
2023/11/09 02:00:19	27,8	22,8344	4,9656	17,8618705
2023/11/09 03:00:56	27,5	22,8344	4,6656	16,9658182
2023/11/09 04:00:10	27,7	27,659	0,041	0,14801444
2023/11/09 06:00:01	26,7	27,659	0,959	3,5917603
2023/11/09 07:00:36	27	22,8344	4,1656	15,4281481
09/11/2023 08:12	27,1	27,659	0,559	2,06273063
09/11/2023 09:00	27,5	27,659	0,159	0,57818182
09/11/2023 10:01	27,5	27,659	0,159	0,57818182
09/11/2023 11:00	28,9	25,9046	2,9954	10,3647059
09/11/2023 12:00	28,7	22,8344	5,8656	20,4376307
09/11/2023 13:00	29,5	28,0976	1,4024	4,75389831
17/11/2023 01:01	31	27,659	3,341	10,7774194
17/11/2023 02:00	30,1	27,2204	2,8796	9,56677741
17/11/2023 03:01	31,6	27,2204	4,3796	13,8594937
17/11/2023 04:00	30,6	27,2204	3,3796	11,0444444

Nota. Lecturas de temperatura tomadas desde el día 8 hasta el 17 de noviembre

Figura 16

Tendencia de Temperatura



Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de temperatura de laboratorio y de la tecnología SWQ

Durante este periodo de toma de lecturas de la temperatura en grados Celsius, se observó que las lecturas del equipo SWQ mantuvieron una tendencia similar a las del laboratorio, a pesar de presentar algunas discrepancias puntuales. A lo largo del tiempo, se destacó una consistencia general en las lecturas del equipo SWQ. No obstante, se identificaron desfases en algunos puntos, sugiriendo posibles influencias de calibraciones, ajustes o incluso ruido ambiental en la toma de datos.

3.2 Análisis de lecturas

A continuación, se detallan los resultados y análisis derivados de la evaluación de mejoras implementadas mediante la tecnología SWQ en la planta Saara, utilizando un modelo hipotético de Machine Learning. A continuación, se explica en detalle la función diseñada para generar las gráficas de la media móvil:

Cálculo de la Media Móvil: El proceso comienza calculando la longitud de la serie temporal y determinando la ventana base. Esta ventana se ajusta para asegurar una transición adecuada entre la última y penúltima ventana. A continuación, se realiza el

cálculo de la media móvil, la cual se incorpora como una nueva columna denominada 'media móvil'. Posteriormente, se eliminan las filas con valores nulos resultantes del proceso.

Cálculo de la Diferencia entre Medias Móviles: Se procede a calcular la diferencia entre las medias móviles de ventanas consecutivas, almacenando esta información en una nueva columna denominada 'diferencia media'.

Identificación de Cambios Significativos: Se determina el porcentaje de cambio con respecto a la media global. Se identifican los índices donde se producen cambios significativos en la variabilidad de la serie temporal.

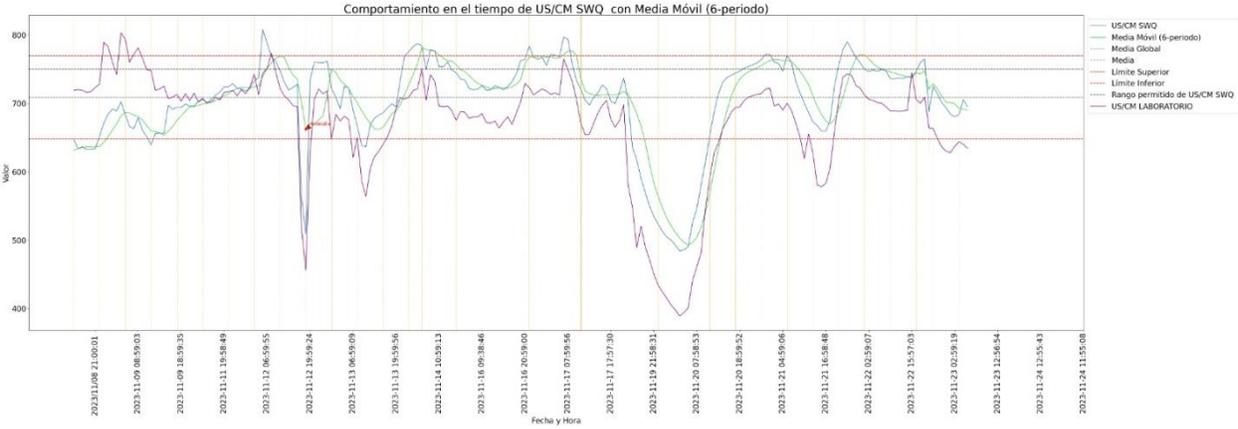
Visualización: Se utiliza Seaborn para generar una representación gráfica de la serie temporal original y la media móvil. Se destacan los puntos donde se producen cambios significativos en la variabilidad mediante puntos rojos. Además, se incorporan líneas discontinuas que indican la media global, los límites superior e inferior, y posiblemente rangos permitidos.

Anotación del Último Valor de la Media Móvil (Comentada): Se incluye una sección comentada que puede utilizarse para agregar una anotación con el último valor de la media móvil en la gráfica. Esta anotación proporciona información adicional y contexto visual.

Esta metodología ofrece una herramienta completa para la visualización y análisis de la serie temporal, facilitando la identificación de patrones y cambios significativos en la variabilidad, respaldando así la toma de decisiones informadas en la gestión de la planta Saara.

3.2.1 Análisis de lectura de conductividad

Figura 17
Media Móvil Conductividad



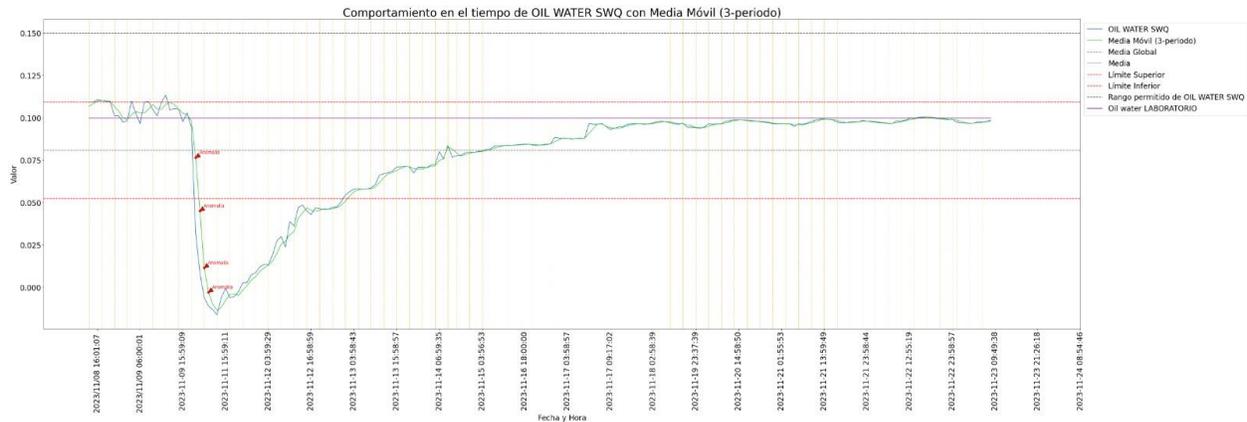
Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de conductividad de laboratorio y de la tecnología SWQ mejorada mediante el machine learning

Al aplicar este modelo de media móvil se evidencia que el comportamiento de la línea en la gráfica suaviza más las variaciones y ruidos del equipo, alineándolo mucho más a la tendencia de las pruebas de laboratorio, inclusive suavizando mucho más esa tendencia de laboratorio, y de esta forma obteniendo una correlación de respuesta mucho más exacta

3.2.2 Análisis de lectura de Aceite en agua

Figura 18

Media Móvil Aceite en agua



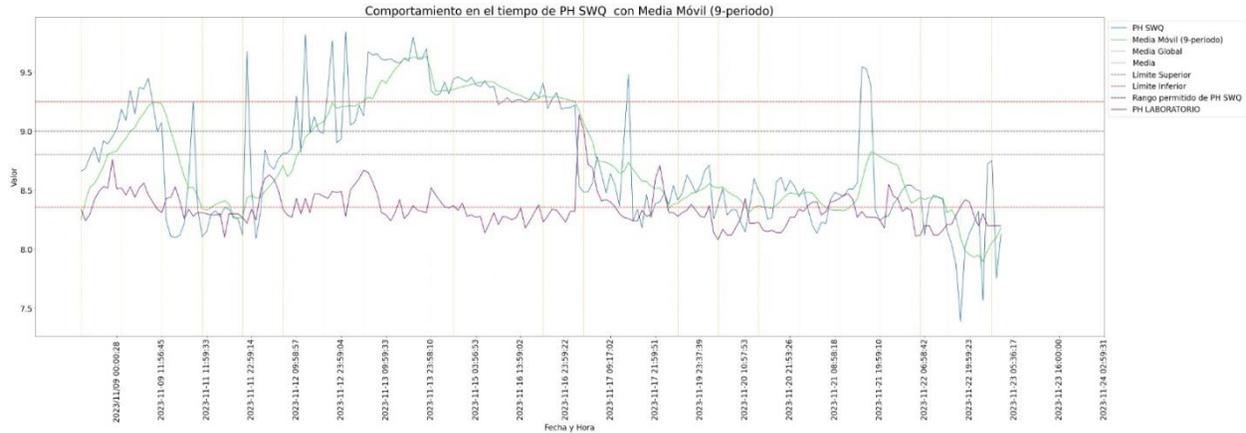
Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de aceite en agua de laboratorio y de la tecnología SWQ mejorada mediante el machine learning

Se pudo observar que, al aplicar el modelo a estos datos, se logra una aproximación a la lectura de laboratorio mediante la creación de ventanas de tiempo con rangos entre 6 datos, calculando luego su media para acercarse a un valor más preciso. Sin embargo, es esencial tener en cuenta que las lecturas de laboratorio solo presentan datos en intervalos de 0,1 MG/LT, según la configuración del algoritmo en el documento. Por lo tanto, no se puede afirmar con certeza si las lecturas de laboratorio siguieron una tendencia a la baja, como lo hizo el equipo SWQ. En resumen, se puede concluir que los datos obtenidos por el equipo SWQ exhibieron una notable proximidad a los datos de laboratorio. En consecuencia, el modelo de machine learning llevó a cabo una aproximación más precisa a estos últimos, subrayando la efectividad de la aplicación del modelo en la interpretación de los resultados.

3.2.3 Análisis de lectura de pH

Figura 19

Media Móvil pH

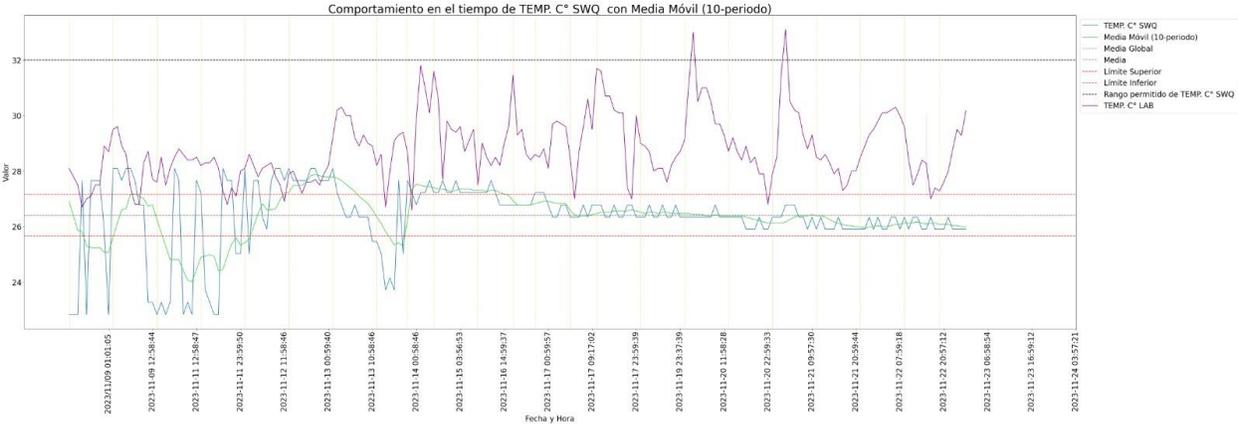


Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de pH de laboratorio y de la tecnología SWQ mejorada mediante el machine learning

Al analizar la gráfica, se evidencia una considerable variación en las lecturas del equipo en comparación con las del laboratorio. En momentos específicos, se observa un desfase significativo que se mantiene constante durante un período para luego intentar nuevamente acercarse a la línea de laboratorio. Una conclusión plausible para estos desfases en ciertos momentos podría atribuirse a posibles fallas en el sensor o a la presencia de interferencias como aire o ruido mecánico. En este contexto, la aplicación del modelo de media móvil en Machine Learning busca abordar y corregir estas variaciones, mejorando así la consistencia y la línea de tendencia del equipo mediante el uso de ventanas de tiempo.

3.2.4 Análisis de lectura de Temperatura

Figura 20
Media Móvil Temperatura



Nota. Gráfica comparativa de la tendencia de temperatura de laboratorio y de la tecnología SWQ mejorada mediante el machine learning

Analizando la gráfica se evidencia que hay variaciones y desfases un poco altos debido a falta de calibraciones del equipo y por temas de aire y ruidos mecánicos en los mismos. El modelo de media móvil en cada sección busca suavizar estas desviaciones y variaciones para de esta forma mejorar la tendencia del equipo, de esta forma acercó

4. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis mediante la representación gráfica de la conductividad, revelando un desfase tecnológico al inicio de la toma de lecturas en comparación con las obtenidas en el laboratorio. Se destaca que el 11 de noviembre a las 13:59, ambas tendencias mostraron un comportamiento similar, con lecturas cercanas a 700 US/cm tanto en las mediciones de laboratorio como en las de la tecnología. Al aplicar el machine learning a los datos tecnológicos, se observa una tendencia más suave, con valores en el rango de 400 a 750 US/cm, acercándose aún más a las mediciones de laboratorio. Estos resultados sugieren que el sensor utilizado es altamente óptimo y eficiente en comparación con las muestras de laboratorio.

Las lecturas del sensor de aceite en agua revelan inicialmente una tendencia cercana entre las mediciones, pero el 9 de noviembre a las 15:59, se observa un desfase en la lectura de la tecnología SWQ, alcanzando un valor de 0,1 mg/lit. Este desfase persiste hasta el 11 de noviembre a las 13:59, momento en el cual se registra un valor de -0,02 mg/lit, indicando que los ingenieros realizaron ajustes y calibraciones para corregir ruidos y afectaciones en el sensor, logrando mejorar el desfase. Como resultado, la tendencia y las lecturas de la tecnología vuelven a estar en proximidad a las del laboratorio. Es importante destacar que el formato proporcionado por Frontera solo especifica que las lecturas son inferiores a 0,1 mg/lit, sin detallar el valor exacto. La aplicación del machine learning contribuyó a suavizar los picos en las líneas de tendencia, acercándolas así a las lecturas de laboratorio.

Se observó que el sensor de pH experimentó mayores complicaciones de lo esperado, evidenciando dos desfases significativos en la línea de tendencia. El primero ocurrió el 8 de noviembre, con lecturas ligeramente superiores a las del laboratorio. En este periodo, las mediciones de laboratorio se ubicaron entre 8,2 y 8,8, mientras que las de la tecnología fluctuaron desde 8,3 hasta casi 9,5. El segundo desfase comenzó el 12 de noviembre a las 12:00 y se prolongó hasta el 18 de noviembre a las 2:58, mostrando lecturas considerablemente superiores a las de laboratorio. En este intervalo, las lecturas de laboratorio oscilaron entre 8,3 y 8,6, mientras que las de la tecnología alcanzaron valores entre 8,7 y su punto máximo de 9,9.

A pesar de que la tendencia llegó a estar cercana a las mediciones de laboratorio, se identificaron picos de desfase atribuibles a ruidos o anomalías en el sensor. La aplicación del machine learning en este sensor permitió suavizar estos picos, manteniendo las lecturas en un rango más estrecho y cercano a las del laboratorio. Sin embargo, se concluye que este sensor podría requerir una revisión o incluso un reemplazo, ya que, a pesar de la mejora proporcionada por el machine learning, persisten desfases significativos que podrían afectar la confiabilidad de las mediciones.

En la tendencia de lecturas del sensor de temperatura, se observó consistentemente un desfase inferior en las mediciones de la tecnología en comparación con las del laboratorio. Los desfases más significativos se registraron a partir del 8 de noviembre, cuando la temperatura según la tecnología fue de 23°C, mientras que la del laboratorio marcó 29°C. Estos picos de desfase en la tecnología persistieron hasta el 14 de noviembre a las 10 am. En ese momento, la tecnología logró desarrollar una tendencia más lineal, aunque las mediciones de laboratorio aún mostraban picos altos, alcanzando temperaturas de hasta 33°C.

Aunque los valores de la tecnología se mantuvieron dentro de los rangos de aceptación de la empresa, se concluye que este sensor podría estar afectado por alguna anomalía, dado que su tendencia no coincide ni se acerca a los valores del laboratorio. La aplicación del machine learning permitió suavizar los picos y acercar las mediciones tecnológicas a las del laboratorio. Sin embargo, se ha considerado la posibilidad de reemplazar este sensor con uno más robusto, dada la persistente disparidad en las tendencias y la importancia de contar con mediciones más precisas y confiables.

Durante el desarrollo de esta investigación, acerca de la optimización en los parámetros de calidad de agua para riego mediante la tecnología SWQ y la aplicación de un modelado de Machine Learning, se pudo lograr la implementación de esto, con la colaboración de la operadora Frontera Energy y la empresa desarrolladora de la tecnología JPT Consulting & Service.

Se identificó que la tecnología arrojó resultados positivos en algunos de sus sensores, los cuales se aproximaron a los patrones de laboratorio. Gracias a los modelos de Machine Learning, se logró una aproximación y eficiencia en las mediciones, logrando

una tendencia más limpia de los resultados de los sensores, aunque se vio limitada por la escasa recolección de datos, inicialmente planeada para un período más extenso. La logística y el ensamblaje de la tecnología por parte de JPT retrasaron la instalación en la planta Saara, como también la parte burocrática de Frontera Energy extendió las demoras unos días más.

Se determinó que para una aplicación más efectiva, eficiente y completa de Machine Learning requiere una recopilación de datos considerablemente mayor, por encima del orden de más de dos millones de datos; a pesar de no tener los suficientes datos, se pudo lograr un modelado con tener solo 16 días de datos. Se evidenció la necesidad de un tiempo más prolongado para la calibración de algunos sensores, ya que se observaron desfases en comparación con las mediciones de laboratorio.

El modelamiento busca obtener lecturas más ajustadas a las tendencias, corrigiendo errores y ruidos en la lectura de datos de la tecnología.

Para la aplicación de Machine Learning, se evaluaron dos opciones de modelo: el modelo de media, que ajusta picos desfasados hacia la media general de la tendencia, y la media móvil, que acerca los picos de desfase al 10% de la media de las ventanas de tiempo. Se optó por el modelo de media móvil debido a su lectura más lógica, promediada y pudiendo lograr una tendencia mucho más suave.

La medición de los parámetros de Sólidos Suspendidos y Oxígeno Disuelto se llevó a cabo, pero no se pudo realizar una comparación en la planta Saara, ya que no se realiza un seguimiento periódico de estos parámetros debido a la falta de exigencias regulatorias para el riego en los cultivos. Esto impidió su inclusión en el proceso de Machine Learning.

La operadora Frontera Energy, como la empresa desarrolladora de la tecnología JPT; están evaluando la aplicación continua de Machine Learning para tomar decisiones sobre la mejora en la calibración de sensores o la reestructuración de la tecnología. El objetivo aparte de cumplir con las exigencias de las entidades regulatorias, es poder ajustar la tendencia de la tecnología mucha más concordancia con las pruebas de laboratorio y lograr un monitoreo constante de los parámetros requeridos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Torne, «Sistema de Calidad de Agua,» *Manual sistema (SWQ) version 2.0*, 2020.
- [2] JPT Consulting and Services SAS, «Gerenciamiento Integral del Agua Producida en Campos Maduros. Monitoreo en Tiempo Real de la Calidad de Agua,» *SWQ - Smart Water Quality Monitor*, s.f..
- [3] J. Torne, ACIPET, C. Andrade, N. Zambrano y J. Sarria, «Monitor en Tiempo Real de la Calidad del Agua Multiparametrico incluyendo medición de aceite suspendido en agua para control de vertimiento e inyección en plantas de tratamiento de crudo,» *ACIPET*, 2022.
- [4] Data Science, «Machine Learning: definición, funcionamiento, usos,» 2021. [En línea]. Available: <https://datascientest.com/es/machine-learning-definicion-funcionamiento-usos>.
- [5] A. Soult, «Coloides y Suspensiones,» s.f.. [En línea]. Available: [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Introductoria%2C_Conceptual_y_GOB/Libro%3A_Qu%C3%ADmica_para_la_Salud_Aliada_\(Soult\)/07%3A_A_S%C3%B3lidos%2C_L%C3%ADquidos_y_Gases/7.06%3A_Coloides_y_Suspensiones](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Introductoria%2C_Conceptual_y_GOB/Libro%3A_Qu%C3%ADmica_para_la_Salud_Aliada_(Soult)/07%3A_A_S%C3%B3lidos%2C_L%C3%ADquidos_y_Gases/7.06%3A_Coloides_y_Suspensiones).
- [6] Wikipedia Enciclopedia Libre , «Sólidos suspendidos,» 2022 . [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/S%C3%B3lidos_suspendidos.
- [7] Lenntech , «Conductividad del agua,» s.f.. [En línea]. Available: <https://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm>.
- [8] Centro de aprendizaje Carbotecnia, «¿Qué significa alcalinidad total del agua?,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/significado-de-la-alcalinidad-total-del-agua/#:~:text=La%20alcalinidad%20total%20del%20agua,capacidad%20amortiguadora%20de%20una%20soluci%C3%B3n>.

- [9] Universidad Complutense Madrid, «Descripción de indicadores,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/952-2015-02-14-Oxigeno%20disuelto%20f.pdf>.
- [10] Water Boards, «Folleto Informativo Temperatura,» s.f.. [En línea]. Available: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3120sp.pdf.
- [11] A. T. Ortega-Ramírez, Y. P. Arcila y L. M. Vargas Diaz, «Revisión Del Diagnóstico de Tratamiento de Aguas de Producción en Campos Petroleros Colombianos,» *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 19 (2), pp. 61-75, 2019.
- [12] Flowproen, «Coalescente,» s.f.. [En línea]. Available: <https://flowproen.com/productos/filtros/filtros-para-liquidos/coalescente/#1517331289582-331a3622-3ca4>.
- [13] Noticias24/7, «Método por centrifugación de agua y sedimento en el crudo,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.blastingnews.com/tecnologia/2018/05/metodo-por-centrifugacion-de-agua-y-sedimento-en-el-crudo-002584969.html>.
- [14] Pacific Rubiales, Water Treatment Plant Operation Book, 2014.
- [15] Team Asana, «Las 12 metodologías más populares para la gestión de proyectos,» 2023. [En línea]. Available: <https://asana.com/es/resources/project-management-methodologies>.
- [16] J. Torne, «Reporte de Actualización y Mejoras Mecánicas, Electrónicas y de Software Realizadas a la Herramienta Durante la Puesta a Punto,» *Reporte Técnico de Mejoramiento (SWQ)*, 2021.
- [17] J. Torne, «Ficha Técnica del Equipo de Calidad de Agua,» *Dossier*, 2020.
- [18] C. E. Boyd, «Conductividad eléctrica del agua, parte 1,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-1/#:~:text=La%20conductividad%20usual%20de%20algunos,a%20%3E%2050.00%20mmhos%2Fcm>.
- [19] JPT Consulting and Services SAS, «Procedimiento de instalacion 1 y 2 del equipo deSWQ,» Sistema de gestion de seguridad y salud en el trabajo, 2023.

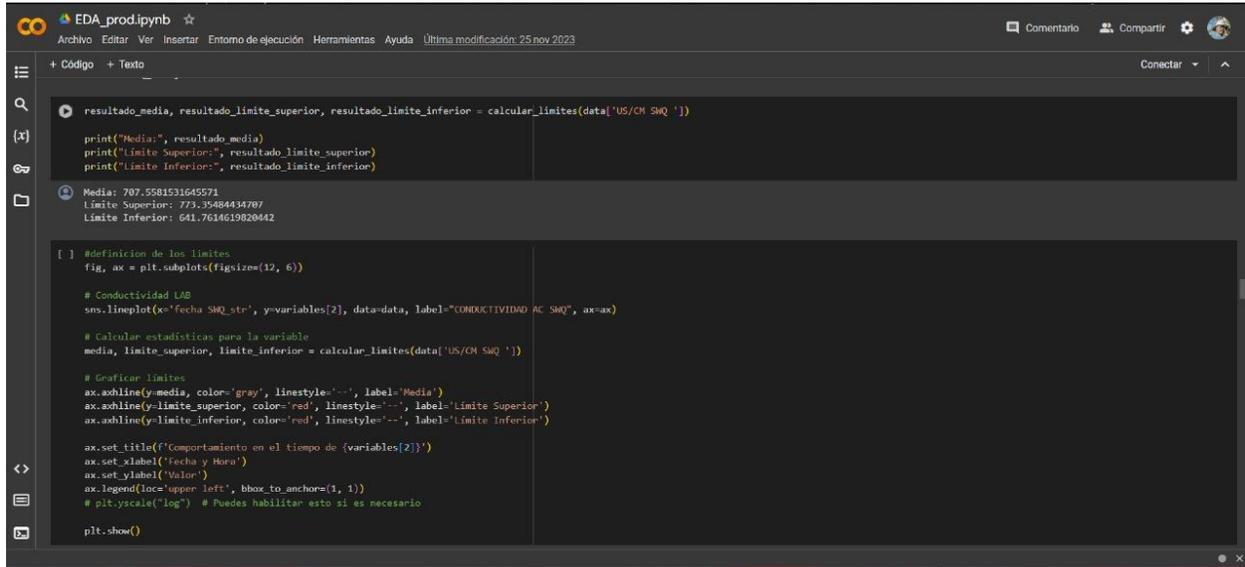
ANEXOS

ANEXO 1.

CÓDIGO MACHINE LEARNING

Figura 21

código Python 1 parte



```
resultado_medio, resultado_limite_superior, resultado_limite_inferior = calcular_limites(data['US/CH SMQ '])
print("Media:", resultado_medio)
print("Limite Superior:", resultado_limite_superior)
print("Limite Inferior:", resultado_limite_inferior)

Media: 707.5581531645571
Limite Superior: 773.354884434707
Limite Inferior: 641.7614619820442

[ ] #Definición de los límites
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))

# Conductividad LAB
sns.lineplot(x='fecha SMQ_str', y=variables[2], data=data, label="CONDUCTIVIDAD AC SMQ", ax=ax)

# Calcular estadísticas para la variable
media, limite_superior, limite_inferior = calcular_limites(data['US/CH SMQ '])

# Graficar límites
ax.axhline(y=media, color='gray', linestyle='--', label='Media')
ax.axhline(y=limite_superior, color='red', linestyle='--', label='Limite Superior')
ax.axhline(y=limite_inferior, color='red', linestyle='--', label='Limite Inferior')

ax.set_title(f'Comportamiento en el tiempo de {variables[2]}')
ax.set_xlabel('Fecha y Hora')
ax.set_ylabel('Valor')
ax.legend(loc='upper left', bbox_to_anchor=(1, 1))
# plt.yscale("log") # Puedes habilitar esto si es necesario

plt.show()
```

Nota. Código de programación en Python primera parte del machine learning

Figura 22

Código Python 2 parte



```
[ ] data_lab['Categoria'] = [0,1] * range(len(data_lab)) % 2

plt.figure(figsize=(13,17))
sns.set(style='ticks')
sns.pairplot(data=data_lab, hue='Categoria', palette=(0: 'blue', 1: 'green'))
plt.suptitle('Gráficos de Dispersión con Dos Colores', y=1.02)
plt.show()

[ ] # 7. Gráficos de densidad
# Crear una figura y ejes para subgráficas
fig, axes = plt.subplots(nrows=2, ncols=3, figsize=(15, 10))

# Iterar sobre las columnas_col y crear gráficas de densidad en cada subgráfica
for i, parametro in enumerate(num_cols):
    row = i // 3 # Calcular la fila
    col = i % 3 # Calcular la columna
    sns.kdeplot(data_lab[parametro], label=parametro, ax=axes[row, col])
    axes[row, col].set_title(f'Gráfico de densidad para {parametro}')

# Ajustar el diseño de las subgráficas
plt.tight_layout()

# Mostrar la figura
plt.show()
```

Nota. Código de programación en Python segunda parte del machine learning

Figura 23

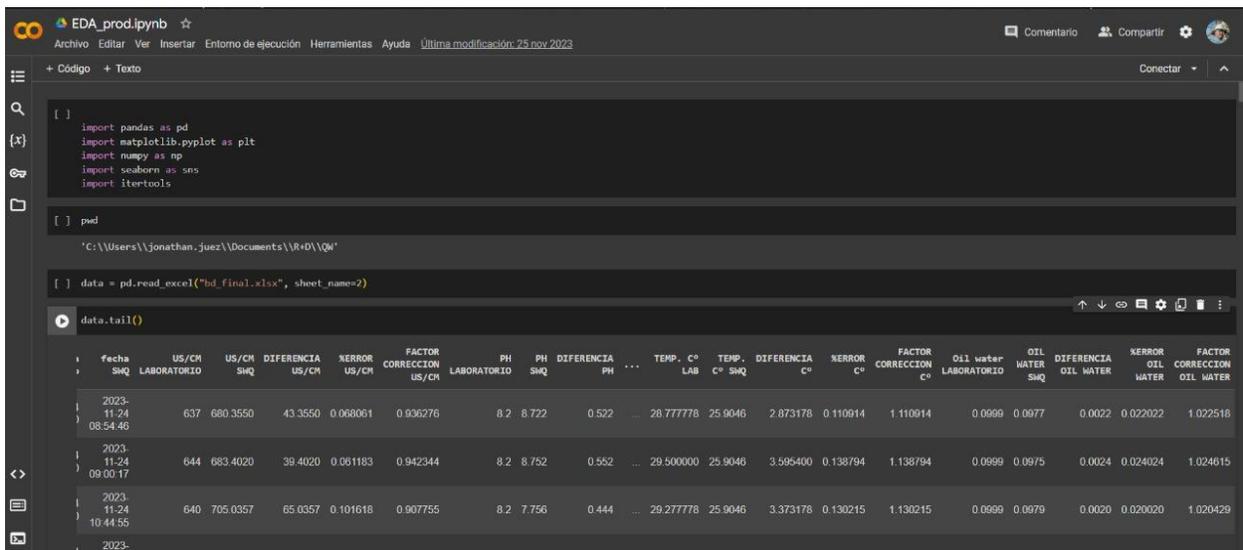
Código Python 3 parte



Nota. Código de programación en Python tercera parte del machine learning

Figura 24

Código Python parte final



Nota. Código de programación en Python parte final del machine learning

ANEXO 2. RESOLUCIONES

Tabla 6

Parámetros para riego en cultivo

Parámetro	Límites Artículo 5 Resolución 1256 del 23 de noviembre de 2021 (incluye en negrilla límites de uso agrícola - Art 40 Decreto 1594 de 1984)	Límite aplicable en la planta	REQUERIMIENTO NORMA
Conductividad eléctrica	1500 uS/cm	750 uS/cm	Medición - Art 40 Decreto 1594 de 1984 (Artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015)
Hidrocarburos Totales	1 PPM	1 PPM	Artículo 5 Resolución 1256 de 2021
pH	4,5 a 9	4,5 a 9	Art 40 Decreto 1594 de 1984 (Artículo 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015)
Sólidos suspendidos totales -TSS		1 PPM	Esto no lo dice ningún documento, es lo adecuado para riego en un cultivo
Temperatura		32 °C	Esto no lo dice ningún documento, es lo adecuado para riego en un cultivo

Nota. Parámetros a los que debe ir el agua para el riego al cultivo de palma de aceite