

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO EN P.I.A. LOS JABILLOS
ASOCIADA A LA RECUPERACIÓN SECUNDARIA EN EL YACIMIENTO K FUC1”**

PRESENTADO POR:

JULIO ANTONIO BOLÍVAR ARENAS

Trabajo de Grado presentado ante la ilustre Universidad de Oriente como requisito parcial
para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

BARCELONA, OCTUBRE 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO EN P.I.A. LOS JABILLOS
ASOCIADA A LA RECUPERACIÓN SECUNDARIA EN EL YACIMIENTO K FUC1”**

ASESORES

**ING. QUÍM. RAYDA PATIÑO MSc.
ASESOR ACADÉMICO**

**LIC. QUÍM. JORGE BARRERA
ASESOR INDUSTRIAL**

BARCELONA, OCTUBRE 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO EN P.I.A. LOS JABILLOS
ASOCIADA A LA RECUPERACIÓN SECUNDARIA EN EL YACIMIENTO K FUC1”**

JURADO

**Ing. Quím. Rayda Patiño, MSc.
Asesor académico**

**Ing. Quím. Maritza Millán Silva, MSc.
Jurado principal**

**Ing. Quím. Milena Amundarain, MSc.
Jurado principal**

BARCELONA, OCTUBRE 2010

RESOLUCIÓN

**De acuerdo con el artículo 41 del Reglamento sobre
Trabajos de Grado:**

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

DEDICATORIA

Los triunfos son aquellos que se comparten con éxito y alegría con las personas que queremos y amamos.

Dedico este proyecto a DIOS todopoderoso, por brindarme la oportunidad de vivir, darme una familia y amigos tan maravillosos y por otorgarme la fuerza para atravesar todos los obstáculos que se han puesto en el camino a lo largo de mi vida.

A mi Mami Francys Arenas, por ser mí amiga, por darme todo su amor y comprensión, por esforzarse tanto en darme la vida como ayudarme a lograr todas mis metas y por no dejarme solo en ningún momento y ser ejemplo de Fe, Tenacidad, Fortaleza y Optimismo en mi vida.

A mi Papi Felipe Figueroa ya que gracias a su sacrificio y dedicación me brindo la oportunidad y comodidad para estudiar y me dio Fuerza con sus sabios consejos para Luchar y Triunfar en la vida.

A mis abuelos Antonio y Castorina que donde quiera que estén siempre confiaron en mí.

A mi hermanita porque ha sido la motivación de mi vida.

**¡GRACIAS A USTEDES HE TENIDO, LA FUERZA Y APOYO PARA
LOGRAR ESTA META!**

AGRADECIMIENTO

A la Ilustre Universidad de Oriente – Núcleo de Anzoátegui, por abrir sus puertas para mi formación académica.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Química que contribuyeron con sus conocimientos a formarme como profesional.

A la Prof. Rayda Patiño por su apoyo y valiosa asesoría académica durante el desarrollo de este proyecto.

A la empresa PDVSA, Distrito Furrial - Estado Monagas, en especial a la Gerencia de Yacimientos y Gerencia de Planta Gas y Agua por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto en sus instalaciones y adquirir nuevos conocimientos que fortalecen mi vida personal.

Al Lic. Jorge Barrera por todo su apoyo y colaboración y tiempo dedicado en el desarrollo de este proyecto.

A las ingenieras Anyris González, Joselín Cabrera y Geólogo Gilberto Parra, Al personal del Laboratorio de Tratamiento Químico que labora en la Planta RESOR por su valiosa asesoría, por su orientación, apoyo y por su infinita paciencia en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos, compañeros y colegas de la universidad por compartir conmigo buenos momentos y muchas horas de estudio, les deseo mucha suerte en todo lo que se propongan.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una evaluación del sistema de tratamiento de la planta de inyección de agua Los Jabillos con la finalidad de verificar la calidad del agua de inyección y garantizar la continuidad operacional de la planta, minimizar el daño a la formación por depósitos inorgánicos (incrustaciones y/o escamas), y a su vez garantizar la eficiencia de barrido de las reservas y el factor de recobro en el yacimiento. Con este fin se compararon los parámetros fisicoquímicos de la planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos con las especificaciones requeridas por la Gerencia de Yacimientos para analizar básicamente la calidad del agua que se está inyectando al yacimiento, de este análisis se determinó que la concentración de sólidos suspendidos se encuentra fuera de especificación. Seguidamente se realizó un balance de masa en función de los sólidos suspendidos para estudiar la eficiencia de los equipos de filtración que interactúan en la planta donde se determinó que la primera etapa (filtros multilecho) tiene una eficiencia de 52,52 % promedio, lo cual revela el mal funcionamiento de estos equipos, una vez obtenida las principales causas por la cual la planta presenta dificultades para llevar a especificación el agua de inyección se establecieron soluciones de carácter físico las cuales consisten en reemplazar los lechos de los filtros multilechos, emplear los cartuchos originales del filtro de cartucho así como realizar mantenimiento a las líneas de flujo y a la planta Los Jabillos, aplicar estas soluciones permitirá reducir la concentración de sólidos suspendidos en el agua, lo cual reducirá la turbidez del agua, pH, el taponamiento de los yacimientos; adicionalmente se evitará la caída de presión en el cabezal y disminuirá la precipitación de sales orgánicas de origen cálcico tanto en las líneas de flujo como en la cara de la formación receptora. Posterior a estos análisis se realizó el estudio de costos de clase V referente a las soluciones propuestas para el mejoramiento de la calidad de agua tomándose en cuenta la procura, gestión y contingencia (15 %) en la adquisición y entrega de los equipos anudado a los costos directos e indirectos requerido para la puesta en funcionamiento de los equipos, resultó un costo de trabajo a realizar de 41.108.695,47 Bs. basándose en un horizonte económico de 5 años.

CONTENIDO

	Pág.
PÁGINA DEL AUTOR	I
PÁGINA DE ASESORES	II
PÁGINA DE JURADOS	III
RESOLUCIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VII
CONTENIDO	VIII
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE FIGURAS	XV
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES.....	3
2.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CAMPO EL FURRIAL.....	4
2.2.1 Yacimiento K FUC 1.....	4
2.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA INYECCIÓN.....	5
2.3.1 Selección de la formación receptora.....	5
2.3.2 El agua y su caracterización.....	5
2.4 VARIABLES A CONTROLAR DURANTE EL PROCESO DE TRATAMIENTO E INYECCIÓN DE AGUA.....	9
2.4.1 Índice de langelier.....	9
2.4.2 Corrosión.....	9
2.4.2.1 Factores que afectan la corrosión.....	10
2.4.3 Incrustaciones.....	10
2.4.3.1 Factores que incrementan la formación de incrustaciones....	11
2.5 EQUIPOS DE FILTRACIÓN UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA.....	11

2.5.1 Clasificación de los sistemas de filtración.....	12
2.5.1.1 Tipo de funcionamiento.....	12
2.5.1.2 Sentido del flujo durante la filtración.....	12
2.5.1.3 Tipos de materiales filtrantes y configuración de los lechos filtrantes.....	13
2.5.1.4 Presión actuante en la filtración.....	13
2.5.1.5 Filtración a caudal constante.....	13
2.5.1.6 Filtración a caudal variable.....	13
2.5.1.7 Variables del proceso de filtración.....	13
2.5.1.8 Características del agua a filtrar.....	13
2.5.1.9 Características del medio filtrante.....	14
2.5.1.10 Velocidad de filtración.....	14
2.5.2 Teoría de la filtración convencional.....	14
2.6 ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA.....	15
2.7 OBJETIVO, PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE PLANTA LOS JABILLOS.....	15
2.7.1 Objetivo de planta “Los Jabillos”.....	15
2.7.2 Propósito.....	15
2.7.3 Descripción del proceso de tratamiento e inyección de agua de planta los jabillos.....	16
2.8 ESTUDIO DE COSTOS.....	17
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL PROYECTO.....	19
3.1 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA DE PLANTA LOS JABILLOS CON LAS ESPECIFICACIONES REQUERIDAS POR LA GERENCIA DE YACIMIENTOS EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO E INYECCIÓN.....	19
3.1.1 Procedimientos experimentales usados para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua.....	20
3.1.1.1 Determinación de alcalinidad.....	20
3.1.1.2 Determinación de dureza.....	21
3.1.1.3 Determinación de la concentración de cloruros.....	23
3.1.1.4 Determinación de sólidos suspendidos totales.....	24
3.1.1.5 Determinación de pH.....	25
3.1.1.6 Determinación turbidez.....	26
3.1.1.7 Determinación de hierro total.....	26
3.1.1.8 Determinación del índice de langelier.....	27
3.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN PRESENTES EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE INYECCIÓN.....	30
3.2.1 Cálculo de la eficiencia de los filtros.....	31

3.3 ESTABLECIMIENTO DE SOLUCIONES DE CARÁCTER FÍSICAS Y/O QUÍMICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE INYECCIÓN EMPLEADA EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE PLANTA LOS JABILLOS EN EL YACIMIENTO K FUC 1.....	31
3.4 PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO DE COSTOS DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE PLANTA LOS JABILLOS.....	32
3.5 EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.....	33
3.5.1 Equipos.....	33
3.5.2 Materiales a utilizar.....	33
3.5.3 Reactivos.....	33
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	35
4.1 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DEL AGUA DE PLANTA LOS JABILLOS CON LAS ESPECIFICACIONES REQUERIDAS POR LA GERENCIA DE YACIMIENTOS EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO E INYECCIÓN.....	35
4.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE INYECCIÓN.....	44
4.3 ESTABLECIMIENTO DE SOLUCIONES DE CARÁCTER FÍSICAS Y/O QUÍMICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EMPLEADA EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE LA PLANTA LOS JABILLOS EN EL YACIMIENTO K FUC 1.....	45
4.3.1 Reemplazar los filtros multilechos.....	46
4.3.1.1 Especificaciones de los lechos o medios filtrantes.....	46
4.3.2 Reemplazar los filtros de cartucho.....	46
4.3.2.1 Características de los cartucho o elementos filtrantes.....	46
4.3.3 Realizar mantenimiento general en la planta de tratamiento e inyección de agua los jabillos.....	47
4.4 PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO DE COSTOS DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EMPLEADA EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE PLANTA LOS JABILLOS.....	47
4.5 CONCLUSIONES.....	50
4.6 RECOMENDACIONES.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXO A, DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD PARCIAL.....	54
ANEXO B, DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD TOTAL.....	57
ANEXO C, DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DUREZA TOTAL.....	60

ANEXO D, DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA.....	63
ANEXO E, DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DUREZA MAGNÉSICA.....	66
ANEXO F, DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE CLORUROS.....	70
ANEXO G, DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.....	73
ANEXO H, CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN Y ESTIMADO DE COSTO PARA LA ADQUISICIÓN Y ENTREGA DE EQUIPOS DE FILTRACIÓN.....	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Factores relativos para la estimación de la inversión de capital para los diversos rubros basados en el costo de los equipos entregado.....	18
Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica del agua de planta Los Jabillos, promedio mes.....	28
Tabla 3.2 Caracterización fisicoquímica del agua de planta Los Jabillos, promedio mes.....	29
Tabla 4.1 Especificaciones del agua de inyección de planta Los Jabillos.....	35
Tabla 4.2. Índice de Langelier correspondiente a cada punto de control de planta Los Jabillos.....	37
Tabla 4.3. Eficiencia de los equipos de filtración de planta Los Jabillos.....	45
Tabla 4.4 Costos asociados al mejoramiento de P.I.A Los Jabillos.....	48
Tabla 4.5 Factores relativos para la estimación de la inversión de capital para los diversos rubros basados en el costo de los equipos entregados.....	48
Tabla A.1. Datos para determinar la concentración de alcalinidad parcial en la entrada y salida de los tanques T-300 y T-400 por titulación.....	55
Tabla A.2. Datos para determinar la concentración de alcalinidad parcial en la entrada y salida del filtro multilecho 210 por titulación	55
Tabla A.3. Datos para determinar la concentración de alcalinidad parcial en la entrada y salida del filtro multilecho 220 por titulación	55
Tabla A.4. Datos para determinar la concentración de alcalinidad parcial en la entrada y salida del filtro multilecho 230 por titulación	55
Tabla A.5. Datos para determinar la concentración de alcalinidad parcial en la salida del filtro de cartucho 250 por titulación	56
Tabla A.6. Datos para determinar la concentración de alcalinidad parcial en los pozos inyectoros FUL-77 y FUC-34 por titulación.....	56
Tabla B.1. Datos para determinar la concentración de alcalinidad total en la entrada y salida de los tanques T-300 y T-400 por titulación.....	58
Tabla B.2. Datos para determinar la concentración de alcalinidad total en la entrada y salida del filtro multilecho 210 por titulación	58
Tabla B.3. Datos para determinar la concentración de alcalinidad total en la entrada y salida del filtro multilecho 220 por titulación	58
Tabla B.4. Datos para determinar la concentración de alcalinidad total en la entrada y salida del filtro multilecho 230 por titulación	59
Tabla B.5. Datos para determinar la concentración de alcalinidad total en la salida filtro de cartucho 250 por titulación	59
Tabla B.6. Datos para determinar la concentración de alcalinidad total en los pozos inyectoros FUL-77 y FUC-34 por titulación.....	59
Tabla C.1. Datos para determinar la concentración de dureza total en la entrada y salida de los tanques T-300 y T-400 por titulación.....	61
Tabla C.2. Datos para determinar la concentración de dureza total en la entrada y salida del filtro multilecho 210 por titulación.....	61
Tabla C.3. Datos para determinar la concentración de dureza total en la entrada y salida del filtro multilecho 220 por titulación	61
Tabla C.4. Datos para determinar la concentración de dureza total en la entrada y salida del filtro multilecho 230 por titulación	62
Tabla C.5. Datos para determinar la concentración de dureza total en la salida del filtro de cartucho 250 por titulación.....	62
Tabla C.6. Datos para determinar la concentración de dureza total en los pozos inyectoros FUL-77 y FUC-34 por titulación.....	62

Tabla D.1. Datos para determinar la concentración de dureza cálcica en la entrada y salida de los tanques T-300 y T-400 por titulación.....	64
Tabla D.2. Datos para determinar la concentración de dureza cálcica en la entrada y salida del filtro multilecho 210 por titulación	64
Tabla D.3. Datos para determinar la concentración de dureza cálcica en la entrada y salida del filtro multilecho 220 por titulación.....	64
Tabla D.4. Datos para determinar la concentración de dureza cálcica en la entrada y salida del filtro multilecho 230 por titulación.....	65
Tabla D.5. Datos para determinar la concentración de dureza cálcica en la salida del filtro de cartucho 250 por titulación.....	65
Tabla D.6. Datos para determinar la concentración de dureza cálcica en los pozos inyectoros FUL-77 y FUC-34 por titulación.....	65
Tabla E.1. Datos para determinar la concentración de dureza magnésica en la entrada y salida del tanque T-300 por titulación.....	67
Tabla E.2. Datos para determinar la concentración de dureza magnésica en la entrada y salida del tanque T-400 por titulación.....	67
Tabla E.3. Datos para determinar la concentración de dureza magnésica en la entrada y salida del filtro multilecho 210 por titulación.....	67
Tabla E.4. Datos para determinar la concentración de dureza magnésica en la entrada y salida del filtro multilecho 220 por titulación.....	68
Tabla E.5. Datos para determinar la concentración de dureza magnésica en la entrada del filtro multilecho 230 por titulación.....	68
Tabla E.6. Datos para determinar la concentración de dureza magnésica en la salida del filtro de cartucho 250 por titulación.....	68
Tabla E.7. Datos para determinar la concentración de dureza magnésica en los pozos inyectoros FUL-77 y FUC-34 por titulación.....	68
Tabla F.1. Datos para determinar la concentración de cloruro en la entrada y salida de los tanques T-300 y T-400 por titulación.....	71
Tabla F.2. Datos para determinar la concentración de cloruro en la entrada y salida del filtro multilecho 210 por titulación	71
Tabla F.3. Datos para determinar la concentración de cloruro en la entrada y salida del filtro multilecho 220 por titulación.....	71
Tabla F.4. Datos para determinar la concentración de cloruro en la entrada y salida del filtro multilecho 230 por titulación	72
Tabla F.5. Datos para determinar la concentración de cloruro en la salida del filtro de cartucho 250 por titulación.....	72
Tabla F.6. Datos para determinar la concentración de cloruro en los pozos inyectoros FUL-77 y FUC-34 por titulación.....	72
Tabla G.1. Datos para determinar la concentración de sólidos suspendidos en la entrada y salida del tanque T-300 por titulación.....	74
Tabla G.2. Datos para determinar la concentración de sólidos suspendidos en la entrada y salida del tanque T-400 por titulación.....	74
Tabla G.3. Datos para determinar la concentración de sólidos suspendidos en la entrada y salida del filtro multilecho 210 por titulación.....	74
Tabla G.4. Datos para determinar la concentración de sólidos suspendidos en la entrada y salida del filtro multilecho 220 por titulación.....	75
Tabla G.5. Datos para determinar la concentración de sólidos suspendidos en la entrada y salida del filtro multilecho 230 por titulación.....	75
Tabla G.6. Datos para determinar la concentración de sólidos suspendidos en la salida del filtro de cartucho 250 por titulación.....	75
Tabla G.7. Datos para determinar la concentración de sólidos suspendidos en el pozo inyector FUL-77 por titulación.....	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Ubicación geográfica del campo El Furrial, Venezuela.....	4
Figura 2.2. Corte estructural del campo El Furrial – yacimiento KFUC 1, Venezuela.....	4
Figura 2.3. Ciclo hidrológico (o del agua).....	6
Figura 2.4. Filtro industrial para tratamiento de agua.....	12
Figura 2.5. Medios filtrantes con diferentes tamaños de partículas.....	14
Figura 3.1. Diagrama de bloques con puntos seleccionados para muestreo..	19
Figura 3.2. Proceso de filtración.....	30
Figura 4.1. Comportamiento de los sólidos totales suspendidos durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	36
Figura 4.2. Comportamiento del pH durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	38
Figura 4.3. Comportamiento de la alcalinidad total durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	39
Figura 4.4. Comportamiento de la alcalinidad parcial durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	39
Figura 4.5. Comportamiento de la dureza total durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	40
Figura 4.6. Comportamiento de la dureza cálcica durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	41
Figura 4.7. Comportamiento de la dureza magnésica durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	42
Figura 4.8. Comportamiento de la concentración de cloruros durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	42
Figura 4.9. Comportamiento de la concentración de hierro durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	43
Figura 4.10. Comportamiento de la turbidez durante el proceso de tratamiento e inyección de agua.....	44
Figura 4.11. Comportamiento de los sólidos totales suspendidos durante el proceso de filtración de agua.....	44

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El campo El Furrial se encuentra ubicado al norte del estado Monagas, específicamente a 25 km al Sur-Oeste de la ciudad de Maturín y fue descubierto en el año 1986 con la perforación y completación exitosa del pozo FUL-1. El campo está formado por tres grandes yacimientos: Naricual Superior, Naricual Inferior y K FUC 1, los cuales se caracterizan principalmente por su alta heterogeneidad, altas presiones, altas temperaturas, profundidades mayores a 13.000 pies y alta complejidad estructural y estratigráfica. Es uno de los campos petrolíferos de mayor producción de crudo a escala nacional, con aproximadamente 423 MBD en la actualidad y reservas recuperables totales de 4122 MMBN.

El yacimiento K FUC 1, tiene un área aproximada de 18 km² fue descubierto con la perforación y evaluación del pozo FUC-1 en julio de 1987, con una producción de 4 MBNPD de 26 °API con reductor de ½”. Al inicio de la explotación el yacimiento presentó un agotamiento progresivo reflejado en una caída de presión desde su valor inicial de 11.230 Lpca hasta un nivel de 6.720 Lpca; alcanzando un agotamiento asociado de 84 Lpca/MMB, motivo por el cual la Gerencia de Yacimientos, inició un proyecto de inyección de agua como método de recuperación secundaria para incrementar la presión, maximizar el recobro de hidrocarburos y de esta manera explotar racionalmente el yacimiento a través de mecanismos de recuperación secundaria como la inyección de agua.

Dada la necesidad de la inyección de agua se crea la planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos, con una capacidad instalada de inyección de 50.000 BAPD la cual proviene del acuífero de la Formación Las Piedras a través de los pozos productores FAP-3 y JW-27, donde el agua es sometida a tratamientos químicos y físicos, con el propósito de eliminar sólidos, bacterias sulfatoredutoras, entre otras, para garantizar la calidad del agua de inyección en el yacimiento y de esta manera evitar problemas de taponamiento producto de la precipitación de sales minerales en la matriz de la roca a determinadas condiciones de presión y temperatura.

Por tal motivo, el control de la calidad del agua cada vez adquiere mayor importancia en la producción de crudo, la Gerencia de Yacimientos creó la Superintendencia de Yacimientos Someros y Aguas Subterráneas, y entre sus funciones se encuentra el seguimiento de los parámetros fisicoquímicos de inyección de agua, tales como: oxígeno disuelto, hierro, pH, tamaño de partículas, dureza total y cálcica, sólidos totales disueltos, turbidez, alcalinidad total, cloruros y sólidos totales suspendidos, valores preestablecidos para cada proyecto de recuperación secundaria, y se determinó que en ciertos períodos la planta de tratamiento e inyección Los Jabillos presenta deficiencias en garantizar dichos parámetros, en tal sentido se ha propuesto realizar una evaluación del sistema de tratamiento de agua.

Para realizar esta evaluación, se tomaron muestras de agua en diferentes puntos de control de la planta con la finalidad de analizar los parámetros fisicoquímicos presentes en el agua de inyección y ser relacionados con las especificaciones requeridas por la gerencia de

yacimientos, a su vez se realizarán balances de masa en función de los sólidos totales que interactúan en el proceso de filtrado lo cual permitirá determinar su eficiencia de operación.

Una vez establecidas las principales causas por las cuales el sistema de tratamiento de agua presenta dificultades en garantizar la calidad de agua requerida para la inyección se establecieron posibles alternativas físicas y/o químicas que puedan llevar dicha agua a especificación, a estas soluciones se les realizó un estudio de costos el cual permitirá seleccionar las opciones de mayor rentabilidad y que garanticen la calidad del agua de inyección requerida por el yacimiento.

La importancia de evaluar este sistema es para emitir recomendaciones, técnicas tendentes a asegurar la calidad del agua de inyección para minimizar el daño a la formación por depósitos inorgánicos (incrustaciones y/o escamas), garantizar la eficiencia de barrido de las reservas y el factor de recobro en el yacimiento.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el sistema de tratamiento en la planta de inyección de agua Los Jabillos asociada a la recuperación secundaria de petróleo en el yacimiento K FUC 1 del campo El Furrial-Estado Monagas.

1.2.2. Objetivos específicos

- 1.** Relacionar los parámetros fisicoquímicos del agua de planta Los Jabillos con las especificaciones requeridas por la Gerencia de Yacimientos en el proceso de tratamiento e inyección.
- 2.** Calcular la eficiencia de los equipos de filtración de la planta en el tratamiento del agua de inyección.
- 3.** Establecer soluciones de carácter físicas y/o químicas para el mejoramiento de la calidad del agua empleada en el proceso de recuperación secundaria de la planta Los Jabillos en el yacimiento K FUC 1.
- 4.** Presentar el estudio de costos de las soluciones propuestas para el mejoramiento de la calidad del agua empleada en el proceso de recuperación secundaria de planta Los Jabillos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Una vez realizada la revisión bibliográfica se puede hacer referencia a ciertos antecedentes correspondientes a investigaciones similares desarrolladas, que servirán como referencias para el desarrollo de este proyecto de investigación:

Tineo en el 2002, realizó un trabajo que tuvo como objetivo principal evaluar la corrosión en la red de inyección de agua al yacimiento Naricual con la finalidad de mantener la confiabilidad operacional en las plantas RESOR/SAEN. Para lo cual se emplearon análisis fisicoquímicos del agua de inyección al yacimiento Naricual para determinar la tendencia corrosiva o incrustante del agua de inyección por medio del índice de Stiff & Davis. Los resultados indicaron que la tendencia del agua es incrustante. ^[1]

Méndez en el 2002, realizó un trabajo que tuvo como objetivo principal evaluar el proceso de filtración de la planta SAEN, ubicada en Jusepín-PDVSA. En el cual se realizaron balances de masa en los equipos de filtración con la finalidad de determinar la cantidad de sólidos que eran removidos por esta operación unitaria en el proceso de tratamiento de agua para inyección. ^[2]

Gerencia de Plantas de Gas y Agua en el 2008, en resultados de gestión enero-septiembre 2008, presentaron el reporte de calidad de agua de proceso de filtración Los Jabillos, los resultados muestran que los parámetros de control se encuentran bajo la especificación requerida por la Gerencia de Yacimientos, sin embargo la turbidez y cloruros a la entrada tiene menor concentración con respecto a la salida. ^[3]

Gerencia de Plantas de Gas y Agua en el 2008, en resultados de gestión enero-octubre 2008, presentaron el reporte de calidad de agua de proceso de filtración Los Jabillos, los resultados indican que la concentración de pH se encuentra fuera la especificación requerida por la Gerencia de Yacimientos y la turbidez presentó mayor concentración a la salida con respecto a la entrada de la planta de tratamiento de agua. ^[4]

Barrera en el 2008, realizó una nota técnica con el objetivo de ajustar el pH del agua de inyección al yacimiento K FUC 1 con la finalidad de disminuir la precipitación de CaCO_3 del medio poroso. La cual se fundamenta en los resultados del informe de gestión enero – mayo (2008), por parte de la Gerencia de Plantas de Gas y Agua el cual muestra que los valores de pH a la entrada y a la salida a nivel de planta Los Jabillos se encuentran por encima de los límites permisibles establecidos por la Gerencia de Yacimientos. ^[5]

La evaluación realizada a planta Los Jabillos tuvo como objetivo principal estudiar el proceso de filtración y evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua empleada para inyección con la finalidad de garantizar la calidad del proceso de tratamiento exigido por la Gerencia de Yacimientos, maximizar la eficiencia de barrido y el factor de recobro, con el propósito de responder con la meta establecida durante la explotación racional de petróleo.

2.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CAMPO EL FURRIAL

El campo El Furrial se encuentra ubicado al norte del estado Monagas, está enmarcado en la cuenca oriental de Venezuela específicamente en la subcuenca de Maturín, a 25 km al Sur-Oeste de la ciudad de Maturín y fue descubierto en el año 1986 con la perforación y completación exitosa del pozo FUL-1. Este campo está formado por tres grandes yacimientos: Naricual Superior, Naricual Inferior y K FUC 1 (figura 2.1) [6].

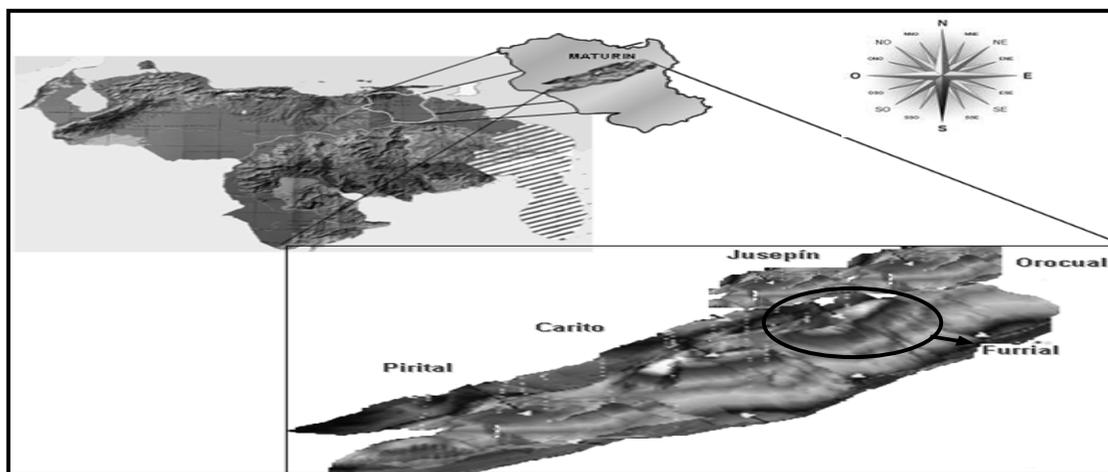


Figura 2.1. Ubicación geográfica del campo El Furrial, Venezuela [6]

2.2.1 Yacimiento K FUC 1

El yacimiento K FUC 1, ocupa un área aproximada de 18 km². Fue descubierto por Lagoven S.A. con la perforación y evaluación del pozo FUC-1 en julio de 1987, este pozo fue evaluado obteniéndose un potencial de producción con reductor de ½” de 4 MBPD de 26° API, los límites verticales y laterales del yacimiento K FUC 1 del campo El Furrial, están asociados en mayor grado a eventos estructurales, propiedades de roca y fluidos en el área (figura 2) [6].

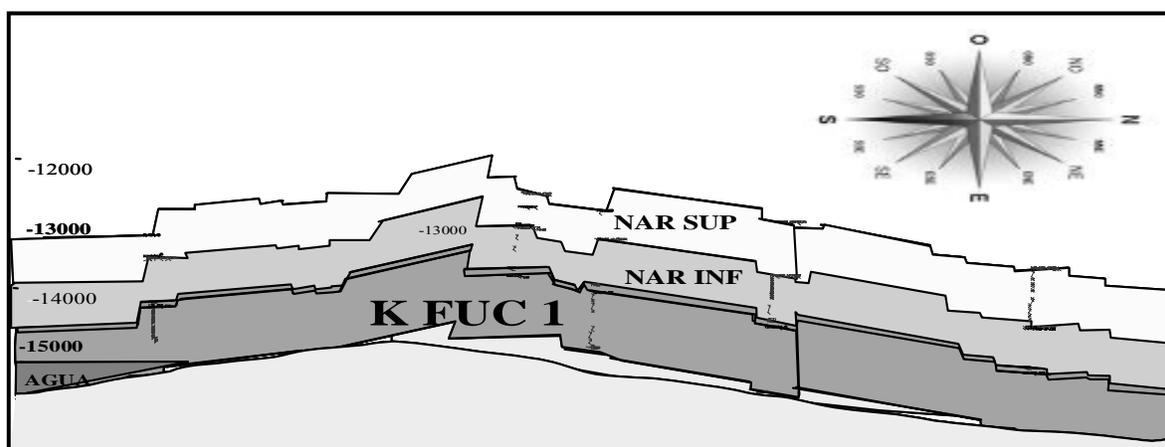


Figura 2.2. Corte estructural del campo El Furrial - yacimiento K FUC 1, Venezuela [6]

Debido a la declinación de la presión y a la necesidad de explotar eficientemente las reservas de petróleo, se propuso aplicar el método de recuperación secundaria por inyección

de agua, la cual es una técnica orientada a mantener la energía que permite fluir el crudo desde el yacimiento hacia la superficie.

Manteniendo la presión durante la explotación, se aumenta la eficiencia de barrido y el factor de recobro de petróleo lo que hace posible la recuperación de millones de barriles de petróleo que de otra manera permanecerían en el yacimiento después de alcanzar su presión de abandono.

2.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA INYECCIÓN

A continuación se presenta una secuencia de pasos que hay que tomar en consideración para el diseño de sistemas de tratamiento de agua para inyección.

2.3.1 Selección de la formación receptora

La formación receptora es la que determina la calidad del agua a inyectar. La identificación de una formación candidata para reinyección requiere una revisión cuidadosa, por parte de las especialidades de geología y yacimientos, de su proximidad a las fuentes de agua potable, presencia de fallas conductivas, extensión areal y volumen poroso. Para esta revisión es necesario conocer lo siguiente ^[7]:

- **Volumen poroso:** con los datos de porosidad, espesor, área, saturación de fluidos y la producción acumulada a la fecha se define el volumen disponible para la inyección.
- **Presión:** este parámetro define la presión de inyección y la inyectabilidad (o el potencial a largo plazo para aceptar la inyección de agua).
- **Temperatura:** influye en la compatibilidad entre el agua de inyección y de formación. Puede favorecer la formación de incrustaciones que taponarán el yacimiento.
- **Permeabilidad:** este parámetro se puede determinar por medio de pruebas de inyectabilidad o pruebas de núcleos en laboratorio, lo cual determina los niveles de inyección por pozo.
- **Presión de fractura / tasa máxima de inyección:** el conocimiento de la presión de fractura es importante para determinar la tasa máxima de inyección por pozo sin causar daños a la formación.
- **Tasa crítica:** se determina con porosímetros y microscopía electrónica. Este valor permite definir cual es el tamaño de partícula que causaría taponamiento en la formación.

2.3.2 El agua y su caracterización

El agua es un líquido incoloro e inodoro que cubre cerca del setenta y un por ciento (71%) de la tierra. El noventa y siete por ciento (97%) del agua en la tierra es agua salada y el otro tres por ciento (3%) es agua dulce y no se encuentra de forma pura, se ioniza muy poco, por lo que rinde sólo 10^{-7} moles de hidrogeno y 10^{-7} moles de iones hidroxilos por litro; por lo tanto no puede conducir electricidad en su forma pura, conforme se disuelven sales o materiales ionizantes en ella, la conductividad eléctrica aumenta y ésta puede usarse como medida de su contenido mineral disuelto. ^[8]

Las aguas superficiales son un componente esencial del ciclo del agua en la troposfera, éstas constituyen un medio en que los recursos naturales experimentan los procesos físicos,

químicos y biológicos que rigen su evolución física. El agua en la biosfera transporta materia y energía, ofrece soporte al desarrollo de la vida, forma parte de la materia inerte en proporciones variables y es un componente esencial y mayoritario de la materia viva. [8]

El ciclo del agua, también conocido como ciclo hidrológico, (figura 2.3) describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. Aunque el equilibrio del agua en la Tierra permanece relativamente constante con el tiempo, las moléculas de agua individuales pueden circular muy rápido. [9]



Figura 2.3. Ciclo hidrológico (o del agua) [9]

Un paso fundamental en el diseño de un sistema de tratamiento de agua para inyección consiste en determinar la calidad y la tasa futura de producción de agua con el fin de conocer el tipo y la cantidad de contaminantes, como también los volúmenes presentes y futuros a disponer o reinyectar. También se requieren análisis de compatibilidad entre el agua de producción y el de la formación. Esta caracterización permite establecer especificaciones de diseño para los equipos de tratamiento. Existen técnicas estándar de muestreo y análisis dependiendo del tipo de contaminante, las características físicas más importantes de las aguas de producción son [10].

- **Temperatura:** las variaciones de temperatura son importantes en las consideraciones de diseño para el sistema de tratamiento de agua. Los minerales más comunes que forman incrustaciones muestran una solubilidad inversa con la temperatura, lo que significa que la solubilidad disminuye cuando aumenta la temperatura. Adicionalmente un aumento en la temperatura aumenta la tasa de corrosión.
- **Contenido de sólidos y distribución del tamaño de las partículas:** las aguas producidas contienen sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables que pueden taponar la formación receptora, causando una reducción de inyectabilidad. El contenido de sólidos y la distribución del tamaño de las partículas se utilizan para el diseño de los equipos de

separación y filtración. La concentración de sólidos, combinada con la tasa de flujo, indica la masa de sólidos a ser removidos y manejados.

Los sólidos suspendidos se mantienen en el agua debido a su forma cristalina que viene dada por las cargas eléctricas que presentan las partículas. Este tipo de sólidos son difíciles de eliminar siendo necesaria la adición al agua de agentes coagulantes y floculantes que modifican la densidad de estas partículas consiguiendo que se agrupen en flóculos de mayor tamaño para así poder separarlos mediante filtración.

Los sólidos disueltos están relacionados con el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha conseguido disolver a su paso. Están relacionados con la conductividad del agua ya que un aumento de estos iones aumenta la conductividad.

Los sólidos sedimentables son sólidos de mayor densidad que el agua, se encuentran dispersos debido a fuerzas de arrastre o turbulencias. Cuando estas fuerzas y velocidades cesan y el agua alcanza un estado de reposo, precipitan en el fondo.

➤ **Sólidos coloidales:** en el agua existen otras partículas finas, llamadas coloides, las cuales constituyen una parte importante de la contaminación, y producen principalmente turbidez y color en el agua. Los coloides son partículas normalmente menores a un micrón (0,001mm), que se mantienen en suspensión aún en condiciones de reposo por un tiempo determinado. Una característica distintiva entre las partículas de dimensiones coloidales y las sedimentables, es la relación del área superficial y la masa.

Para los materiales coloidales esta relación es muy alta (gran área de superficie, baja masa), si se suma esto a las propiedades asociadas con la superficie de la partícula, sus cargas eléctricas y los grupos funcionales ionizables adquieren mayor importancia. En el agua, las partículas coloidales son tanto inorgánicas (arena, arcillas, etc.), como orgánicas (color predominantemente). El color es difícil de remover debido a que puede ser soluble o extremadamente pequeño.

➤ **Turbidez:** la turbidez es un parámetro relacionado con el grado de transparencia y limpieza del agua, que puede ser resultado de una posible actividad biológica o simplemente una presencia de componentes no deseables, es una relación exponencial existente entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, para eliminar la turbidez y mejorar la calidad del agua se usan los distintos tipos de filtros comerciales, como los filtros multilecho o los filtros de placa y marcos y/o mejorando el rendimiento con el uso de floculantes, este parámetro se mide con un instrumento llamado turbidímetro en unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

➤ **Contenido de aceite:** el aceite disperso en el agua forma coágulos con los sólidos y puede taponar la formación. Además puede afectar el sistema de filtración.

➤ **Análisis de corrosión:** es importante conocer la tasa de corrosión (generalmente en milésimas de pulgadas por año, MPA) para el diseño de los equipos y del tratamiento para el control de la corrosión. La tasa de corrosión se determina con cupones y probetas de corrosión en campo o en laboratorio.

➤ **Análisis bacterial:** las bacterias causan corrosión o taponamiento de la formación. Existen bacterias sulfato reductoras (generadoras de H₂S), bacterias depositadoras de hierro y formadoras de lodo (slime). Es necesario hacer cultivos para determinar la clase, especie y concentración de bacterias en el agua y para diseñar el tratamiento de control.

Las características químicas más importantes de las aguas de producción son ^[10]:

- **pH:** el pH de una solución acuosa está definido como la actividad del ion hidrógeno o su concentración. Específicamente para el agua la actividad es igual a la concentración molar H^+ es igual a OH^- como es definido por el principio de electro neutralidad por lo que bajo condiciones atmosféricas tiene una constante de 1×10^{-14} . Esta condición implica que las concentraciones molares de ambas especies son de 1×10^{-7} y este valor se considera como pH neutro.
- **Gases disueltos:** los gases disueltos que causan mayor preocupación son el oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Su concentración se determina por colorimetría y/o titulación. El oxígeno es el agente corrosivo más serio que participa en los mecanismos de corrosión en los campos petroleros.
- **Dureza:** la dureza representa una medida de la concentración de metales alcalinotérreos en el agua, fundamentalmente calcio (Ca^{++}) y magnesio (Mg^{++}) provenientes de la disolución de rocas y minerales que será mayor cuanto menor sea el pH. Es una medida del estado de mineralización del agua, se suele expresar como mg/l de $CaCO_3$.
- **Alcalinidad:** la alcalinidad se define como la capacidad para neutralizar ácidos. En aguas naturales se debe primariamente a las sales de ácidos débiles aunque las bases débiles o fuertes también pueden influir. Los bicarbonatos son las especies que más contribuyen a la alcalinidad, puesto que se forman en cantidades considerables por la acción del dióxido de carbono sobre materia básica.

En ciertas condiciones las aguas naturales pueden ser alcalinas debido a cantidades apreciables de hidróxidos (OH^-) y carbonatos [CO_3^{2-}]. Esto sucede particularmente en aguas superficiales con algas en crecimiento. Las algas toman el dióxido de carbono que se encuentra en forma libre y combinada de tal forma que la alcalinidad alcanza un pH entre 9 y 10. Las aguas tratadas químicamente son aquellas producidas en el ablandamiento con cal o cal ceniza de soda contienen hidróxidos en exceso y carbonatos, y puede ser calculada mediante la ecuación 2.1, la cual esta en función de los iones que intervienen en el equilibrio carbonato-bicarbonato del agua y producen la alcalinidad.

$$Al. T = 2[CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] + [OH^-] \quad (\text{Ec. 2.1})$$

- **Hierro:** rara vez se encuentra en las aguas superficiales. Se halla en aguas de pozos de agua o como producto de la acción corrosiva del agua sobre las tuberías de suministro. Cuando pasa de su forma reducida (Fe^{2+}) a la oxidada (Fe^{3+}), por acción de un agente oxidante, forma depósitos muy voluminosos, los cuales son altamente taponantes y aislantes, el cambio que experimenta el hierro se puede apreciar en las ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4; donde este efecto viene dado por la reacción de oxido- reducción que experimenta este compuesto.



- **Compatibilidad:** la prueba de compatibilidad de aguas se efectúa con el fin de determinar si existen diferencias entre la química o la temperatura del agua que causen o formen precipitados, cuando el agua a inyectar se mezcle con el agua de la formación receptora.

2.4 VARIABLES A CONTROLAR DURANTE EL PROCESO DE TRATAMIENTO E INYECCIÓN DE AGUA

2.4.1 Índice de Langelier

Se define como una medida del estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o corrosivo, depende del equilibrio bicarbonato y se define teóricamente como ^[11]:

$$IL = pH - pHs \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Siendo pH, el pH al que se encuentra la muestra de agua y pHs el valor de pH al que comenzaría a precipitar carbonato de calcio (CaCO₃). La escala del índice de Langelier es la siguiente:

Si IL=0; agua en equilibrio químico

Si IL<0; agua con tendencia a ser corrosiva

Si IL>0; agua con tendencia incrustante, provoca deposición de carbonato de calcio.

El valor de LSI se calcula experimentalmente en el laboratorio, sin embargo puede hacerse una aproximación bastante buena aplicando la siguiente fórmula ^[11]:

$$pHs = (9,3 + A + B) - (C+D) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$A = \frac{1}{10} \times (\text{Log}[TDS] - 1) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$B = -13,12 \times \text{Log}(T (^{\circ}\text{C}) + 273) + 34,55 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$C = \text{Log}[DCa] - 0,4 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

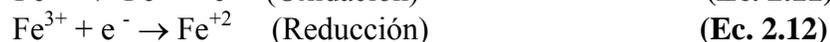
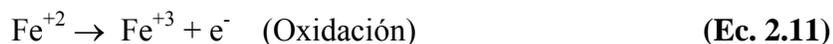
$$D = \text{Log}[Alc. T] \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Siendo TDS los mg/l de sólidos disueltos; T, la temperatura en ° C; DCa la dureza expresada en mg/l de CaCO₃; y finalmente Alc. T, la alcalinidad también en mg/l de CaCO₃.

2.4.2 Corrosión

La corrosión es la pérdida de metal causada por un agente oxidante presente en el ambiente. El área donde el metal se oxida (donde ocurre la pérdida del metal) recibe el nombre de ánodo o área anódica. El área donde se reduce el agente oxidante (donde se toman los electrones liberados por el metal) recibe el nombre de cátodo o área catódica.

La corrosión es un proceso complicado que puede ser descrito, para un mejor entendimiento a través de las siguientes reacciones ^[12]:



Los principios básicos de la corrosión establecen que las sumas de las velocidades de reacción en el ánodo ($\sum I/A_a$) deben ser iguales a las sumas de las velocidades de reacción en el cátodo ($\sum I/A_c$). Si se reduce la velocidad de reacción en el cátodo se reduce proporcionalmente la velocidad de corrosión. Igualmente, una reducción en el área catódica se

traduce en una reducción de la velocidad de corrosión. Sin embargo, una reducción en el área anódica, sin una correspondiente reducción en el área catódica, no disminuye la velocidad de la corrosión. ^[12]

2.4.2.1 Factores que afectan la corrosión

Los principales factores que afectan la corrosión ^[12]:

- **Sólidos disueltos:** el efecto de los sólidos disueltos es algo complicado, porque depende del tipo y concentración de los iones. En general, con el aumento de los sólidos disueltos se incrementa la corrosión, aunque los carbonatos y los bicarbonatos tienden a disminuirla.
- **Gases disueltos:** los gases que tienen mayor influencia en la corrosión son el oxígeno disuelto (O_2) el cual reacciona con los metales como el hierro (Fe^{++}), magnesio (Mg^{++}) presentes en el proceso y agua de tratamiento, oxidándolos y por ende acelerando la corrosión y el anhídrido carbónico (CO_2) el cual reduce el pH y ayuda a disolver las películas pasivantes. Otros gases menos frecuentes, pero que ejercen influencia notable en la corrosión, son el amoníaco (NH_3) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S).
- **Temperatura:** el incremento de la temperatura eleva la velocidad de reacción y por ende la velocidad de corrosión. En general, la velocidad de corrosión se duplica cada $11^\circ C$ de incremento de temperatura.

2.4.3 Incrustaciones

Las incrustaciones son un recubrimiento denso de material predominante de origen inorgánico, formado por la precipitación química inducida de constituyentes soluble en el agua, que se vuelven insolubles por aumento de la temperatura, cambios de presión y sobresaturación del medio acuoso lo cual causa un exceso en el producto de solubilidad (Kps) de algún constituyente del sistema, y se pueden formar por cambios en la temperatura o la presión, liberación de gas, una modificación en el pH o el contacto con agua incompatible, las incrustaciones se desarrollan a partir de una solución, el primer desarrollo dentro de un fluido saturado es la formación de grupos de átomos inestables a este proceso se le llama nucleación homogénea, los grupos de átomos forman pequeños cristales provocados por fluctuaciones locales en el equilibrio de la concentración de iones en la solución sobresaturada. ^[13]

A continuación los cristales crecen por adsorción de iones sobre las imperfecciones de las superficies de los cristales, con lo cual aumenta el tamaño del cristal. La energía necesaria para que el cristal crezca proviene de una reducción de la energía libre superficial (ΔG) del cristal que disminuye rápidamente a medida que aumenta el radio, una vez superado cierto radio crítico. Esto implica que los cristales grandes tienden al continuo crecimiento de los mismos, y además que los cristales pequeños se pueden redisolverse. Por tanto dado un cierto grado de sobresaturación, la formación de cualquier semillero de cristales va a favorecer el crecimiento de incrustaciones minerales. El semillero de minerales de hecho actúa como un catalizador de la formación de incrustaciones. ^[13]

Las incrustaciones más comunes están formadas por:

- Carbonato de calcio ($CaCO_3$)
- Fosfato de calcio ($Ca_3(PO_4)_2$)
- Sales de magnesio ($MgCO_3$, $MgSO_4$, $MgCl_2$)

- Sulfato de calcio (CaSO_4)
- Sílice (SiO_2)
- Sulfato de bario (BaSO_4)

2.4.3.1 Factores que incrementan la formación de incrustaciones

Los principales factores que incrementan la formación de incrustaciones ^[13]:

- **pH:** la mayoría de las sales presentes en el agua disminuye su solubilidad cuando el pH aumenta, por lo tanto, incrementa su potencial incrustante, entre las sales más comunes encontradas en las plantas de tratamiento, está el carbonato de calcio (CaCO_3), óxido de hierro Fe_2O_3 , sulfato de calcio (CaSO_4), cloruro de magnesio MgCl_2 , por tanto cuando el pH baja, aumenta la corrosión del agua y se incrementa el potencial incrustante de algunos tipos de sílice como el asbesto $(\text{SiO}_3)_4\text{Mg}_3\text{Ca}$, siliciuros (Mg_2Si), etc.
- **Temperatura:** al igual que con el pH, muchas sales comunes en el agua disminuyen su solubilidad cuando aumenta la temperatura.
- **Concentración:** cuando un soluto (sales de calcio, sales de magnesio, carbonatos, etc.) disuelto en agua excede su punto de saturación se producen incrustaciones. También otros sólidos disueltos pueden influenciar la tendencia a formar incrustaciones. En general, mientras mayor sea el contenido de sólidos mayor será la posibilidad de formación de incrustaciones.
- **Sólidos suspendidos:** una mayor concentración de sólidos suspendidos (sólidos naturales, productos de corrosión, etc.) favorece la formación de incrustaciones porque incrementa la superficie de nucleación.
- **Factores dinámicos:** las velocidades de flujo menores de 2 pies/s (0,6 m/s) ocasionan un flujo laminar en los tubos de los intercambiadores, creando condiciones favorables para la formación de incrustaciones, ya que las características y comportamiento de esta agua en el flujo laminar son muy diferentes de las del resto de la masa de agua. Otro factor dinámico que afecta la formación de incrustaciones es los cambios en las velocidades de flujo, tal es el caso de un codo donde ocurre una caída de presión el cual cambia la energía del agua.

2.5 EQUIPOS DE FILTRACIÓN UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

El proceso de filtración se considera como el paso de un fluido a través de un medio poroso que retiene la materia que se encuentra en suspensión para producir un efluente que cumpla con los parámetros de calidad exigidos. En las instalaciones de filtración de las estaciones de tratamiento de agua, el medio poroso suele ser generalmente arena, arena y antracita, gránate o cascarilla de nuez y la materia en suspensión está constituida por flóculos o microflóculos procedentes de la etapa anterior de decantación o bien formados expresamente cuando se sigue el proceso de coagulación-floculación (figura 2.4) ^[14]



Figura 2.4. Filtro Industrial para tratamiento de agua ^[15]

El diseño de los filtros y la valoración de su eficiencia debe basarse en:

La comprensión de las variables que controlan el proceso.

El conocimiento del mecanismo, o mecanismos, responsables de la eliminación de materia particulada del agua residual.

Mecanismos de eliminación de las partículas.

Análisis general de la operación de filtración.

Necesidad de estudios en planta piloto.

2.5.1 Clasificación de los sistemas de filtración: se han proyectado y construido diversos modelos y sistemas de filtros. Los principales tipos de filtros de medio granular se clasifican atendiendo a ^[14]:

2.5.1.1 Tipo de funcionamiento: en relación con el tipo de funcionamiento, los filtros se pueden clasificar en continuos y semicontinuos. Los filtros semicontinuos se mantienen en funcionamiento hasta que se empieza a deteriorar la calidad del efluente o hasta que se produce una pérdida de carga excesiva en el filtro. Cuando se alcanza este punto, se detiene el filtro y se procede a su lavado para eliminar los sólidos acumulados. En los filtros continuos, los procesos de filtración y lavado se llevan a cabo de manera simultánea.

2.5.1.2 Sentido del flujo durante la filtración: los principales tipos de filtros empleados para la filtración de efluentes de aguas residuales se pueden clasificar en filtros de flujo ascendente y filtros de flujo descendente. El más común es, con mucho, el filtro de flujo descendente.

2.5.1.3 Tipos de materiales filtrantes y configuración de los lechos filtrantes: los principales tipos de configuración de los lechos filtrantes empleados actualmente para la filtración de aguas residuales se pueden clasificar en función del número de capas de material filtrante, lo cual da lugar a los filtros de una capa, los de doble capa y los filtros multicapa, en filtros de flujo descendente convencionales, los tamaños de los granos de cada se distribuyen, de menor a mayor, después del lavado a contracorriente. En los filtros que cuentan con más de una capa, el grado en que se mezclan los materiales de las diferentes capas depende de la densidad y de la diferencia de tamaños entre los granos del material que compone cada una de las capas.

Los lechos filtrantes de doble y triple capa, así como los profundos de una capa, se desarrollaron para permitir que los sólidos en suspensión presentes en el líquido a filtrar puedan penetrar a mayor profundidad dentro del lecho filtrante, con lo cual se aprovecha mejor la capacidad de almacenamiento de sólidos dentro del filtro.

2.5.1.4 Presión actuante en la filtración: tanto la fuerza de la gravedad, como la creada por la presión del fluido, se pueden emplear para vencer la resistencia por fricción creada por el flujo que circula a través del lecho filtrante. Los filtros de gravedad del tipo indicado son los más empleados en la filtración de efluentes tratados en plantas de tratamiento de gran tamaño.

Los filtros a presión funcionan igual que los filtros de gravedad y se emplean en plantas pequeñas. Los filtros a presión suelen funcionar con mayores pérdidas de carga, lo cual conduce a ciclos de filtración más largos y a menor necesidad de lavado.

2.5.1.5 Filtración a caudal constante: en el proceso de filtración a caudal constante, se controla el caudal de entrada para asegurar que el caudal que circula a través del filtro es constante. El control del caudal de entrada se realiza mediante vertederos o bombeo, mientras que el control del caudal efluente se lleva a cabo mediante la instalación de una válvula de accionamiento manual o automático.

2.5.1.6 Filtración a caudal variable: en el proceso de filtración a caudal variable, el caudal que pasa a través del filtro va disminuyendo conforme aumenta la pérdida de carga. El control del caudal que circula por el filtro también se puede llevar a cabo, tanto a la entrada del filtro como a la salida. Cuando el caudal alcanza el valor del caudal mínimo de proyecto, se detiene el filtro y se procede a su lavado.

2.5.1.7 Variables del proceso de filtración: en la aplicación de la filtración para la eliminación de sólidos en suspensión remanentes, se ha comprobado que las variables más importantes del proceso de diseño son, posiblemente, la naturaleza de las partículas presentes en el agua a filtrar, el tamaño del material o materiales que componen el filtro, y el caudal de filtración.

2.5.1.8 Características del agua a filtrar: las características más importantes del agua a filtrar son la concentración de sólidos en suspensión, el tamaño y distribución de las partículas, y la consistencia de los flóculos. Para el control práctico del proceso de filtrado se suele emplear el valor de la turbidez. Se ha podido comprobar que, dentro de ciertos límites, existe una correlación entre la concentración de sólidos en suspensión en las aguas residuales tratadas y los valores medidos de la turbidez, la consistencia de los flóculos, que no sólo varía con el tipo de proceso sino también con el modo de operación, también es importante. Por ejemplo, los flóculos residuales de la precipitación química del agua tratada pueden ser considerablemente más débiles que los flóculos antes de la precipitación, además, la consistencia de los flóculos varía con el tiempo medio de retención celular, aumentando con él.

2.5.1.9 Características del medio filtrante: la característica del medio filtrante que más afecta al proceso de filtración es el tamaño del grano. El tamaño del grano afecta tanto a la pérdida de carga en la circulación del agua a través del filtro como a la tasa de variación de dicho aumento durante el ciclo de filtración. Si el tamaño de grano efectivo del medio filtrante es demasiado pequeño, la mayor parte de la fuerza actuante se empleará para vencer la resistencia de fricción provocada por el lecho filtrante, mientras que si el tamaño efectivo es demasiado grande, muchas de las partículas de menor tamaño presentes en el agua a filtrar pasarán directamente a través del filtro sin ser eliminadas. (figura 2.5)



Figura 2.5. Medios filtrantes con diferentes tamaños de partículas [14]

2.5.1.10 Velocidad de filtración: la velocidad de filtración es un parámetro importante debido a que afecta la superficie efectiva del filtro. Para una buena aplicación del filtro, la velocidad de filtración dependerá de la consistencia de los flóculos y del tamaño medio de grano del lecho filtrante. Por ejemplo, si los flóculos son de débil consistencia, las velocidades de filtración elevadas tenderán a romper los flóculos y a arrastrar gran parte de los mismos a través del filtro.

2.5.2 Teoría de la filtración convencional: del análisis del estudio de la mecánica de fluidos en medios porosos, para fluidos newtonianos, se obtiene ^[14]:

$$\frac{dV}{A \times dt} = \frac{\Delta P}{\mu \times (R_t + R_m)} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

A = área de filtración [m^2]

V = volumen de filtración [m^3]

R_t = resistencia de la torta $\left[\frac{Kg}{m^2 \times s} \right]$

R_m = resistencia del medio filtrante $\left[\frac{Kg}{m^2 \times s} \right]$

ΔP = caída de presión a través del lecho $\left[\frac{Kg F}{m^2} \right]$

μ = viscosidad del fluido $\left[\frac{Kg}{m \times s} \right]$

2.6 ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA

La ecuación del balance de masa viene dada de la siguiente forma ^[15]:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

El término acumulación de la ecuación 2.14, se refiere a un cambio de masa o de moles dentro del sistema con respecto al tiempo. Los términos entrada y salida se refieren a la transferencia de masa a través de las fronteras del sistema. Los términos generación y consumo se aplican en los casos en los cuales el proceso involucre reacciones químicas, en estos casos la generación representa el producto de la reacción y el término consumo representa la parte del reactivo que reaccionó para dar lugar a la formación del producto.

Al momento de realizar un balance de masas es necesario establecer el intervalo de tiempo en el cual se va a efectuar el balance.

2.7 OBJETIVO, PROPÓSITO Y DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA LOS JABILLOS

Para mantener el potencial de producción, reducir el riesgo de precipitación de asfalteno y aumentar significativamente el factor de recobro final de petróleo, los estudios de ingeniería de yacimientos efectuados por PDVSA han demostrado la necesidad de implantar a la brevedad un proyecto de recuperación secundaria ya que cierta cantidad de pozos productores de crudo del campo Furrial han perdido flujo debido a la declinación de la energía natural del yacimiento K FUC 1, resultando el esquema de inyección de agua como el más recomendable para la recuperación del crudo. ^[15]

2.7.1 Objetivo de planta “Los Jabillos”

La inyección de agua a los pozos inyectores del yacimiento cretáceo bajo las especificaciones exigidas por la Gerencia de Yacimientos para la recuperación secundaria de petróleo. ^[15]

2.7.2 Propósito

Las premisas que justifican la construcción de la planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos, son las siguientes ^[15]:

- PDVSA a través de los estudios de ingeniería en el yacimiento K FUC 1, encontró que lo más recomendable para el mantenimiento de la presión del yacimiento (recuperación secundaria) es la inyección de agua. Como no se cuenta en el área con la disponibilidad de agua de formación, se optó por el uso de agua del acuífero Las Piedras.
- El agua cruda del acuífero Las Piedras, tiene varios componentes que deben ser retirados antes de dirigirla a la inyección del yacimiento: oxígeno disuelto, gas metano, sólidos suspendidos (diámetros mayor a 2 micrones) y presencia de colonias de bacterias las cuales se deberán evitar que proliferen dentro de los equipos de tratamiento e inyección.

2.7.3 Descripción del proceso de tratamiento e inyección de agua de planta Los Jabillos

El agua proveniente del acuífero de la Formación Las Piedras a través de los pozos productores FAP-3 y JW-27 se mezclan en un troncal (acueducto) de 16” de diámetro siendo recibida por la planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos en la brida de conexión de 16” ANSI 300, donde el agua recibida es depositada en el tanque denominado T-300, el cual posee un sistema interno que permite la desgasificación del agua.

En condiciones normales las características del agua a la entrada de la planta son las siguientes ^[15]:

- Turbidez: (0,2 – 1,3) NTU
- Sólidos suspendidos: (0,5 – 5,0) ppm
- Contenido de oxígeno disuelto: (0,01 a 0,03) ppm máximo.
- Tamaño de partículas: 10 μ
- Presión: 50 – 150 psi.
- Temperatura: (80 – 120) °F

Simultáneamente, se inyecta un biocida en la entrada del tanque desgasificador T-300 para la eliminación de bacterias sulfatoreductoras y un polímero a la entrada de los filtros multilecho que ayudan al proceso de filtración, el agua es descargada por las bombas de transferencia denominadas P-100, P-110 y P-120 hacia la entrada de los filtros, en una primera etapa, en los filtros multilecho F-210, F-220 y F-230, donde son retenidas las partículas de mayor diámetro y luego pasa en una segunda etapa, a los filtros de cartucho F-240, F-250, donde se le retiran las partículas de menor diámetro, el agua que sale de los filtros es depositada en el tanque de agua tratada denominado T-400.

El agua acumulada en el tanque T-400 es succionada por las bombas reforzadoras o “Booster” denominadas P-150 y P-160 y P-165A que manejan un volumen de 50.000 BPD, que a su vez elevan la presión del agua hasta 980 psi, alimentando al mismo tiempo a las bombas de inyección denominadas P-170, P-180, P-190, que manejan un volumen de 25.000 BAD c/u, las cuales elevan la presión hasta 5.000 psi, según requiere la inyección del yacimiento, en este punto es inyectado un anticrustante que permite controlar las corrosiones e incrustaciones.

El control de la calidad del agua de inyección requerido por la Gerencia de Yacimiento es la siguiente ^[15]:

- pH: 7,4 – 8,5
- Turbidez: 0,5 NTU (Máximo)

- Contenido de oxígeno disuelto: 0,05 ppm (Máximo)
- Tamaño de partículas: 94% menores a 2 μ
- Presión: (4.000 – 5.000) psi
- Velocidad de corrosión: 5 Mils/año (Máximo)
- Sólidos suspendidos: 0,5 ppm (Máximo)

2.8 ESTUDIO DE COSTOS

El estudio de costos, está relacionado con los aspectos técnicos del proyecto. Para comenzar este estudio, se necesita disponer de cierta información; la cual proviene del estudio de mercado, del estudio del marco regulatorio legal, de las posibles alternativas de localización, del estudio de tecnologías disponibles, de las posibilidades financieras, de la disponibilidad de personal idóneo y del estudio del impacto ambiental.

Uno de los resultados de este estudio, será determinar la función de producción óptima para la utilización eficiente y eficaz de los recursos disponibles para la producción del bien o servicio deseado. Para determinar la función de producción óptima deberán analizarse las distintas alternativas y condiciones en que se pueden combinar los factores productivos, identificando, a través de la cuantificación y proyección en el tiempo los montos de inversiones, los costos y los ingresos de operación asociados a cada una de las alternativas de producción para luego realizar el estudio económico.

Todo esto debe producir beneficios; es esencial conocer los diferentes tipos de costos involucrados en el proceso. El capital debe ser asignado a gastos directos de plantas, como: materias primas, mano de obra y equipos. Además de los gastos directos, muchos de los gastos indirectos deben incluirse en un análisis completo de los costos totales que se obtengan, algunos ejemplos de estos gastos indirectos son los sueldos administrativos, costos de distribución del producto, y los costos de las comunicaciones entre plantas.

Una inversión de capital es necesaria para cualquier proceso industrial, y la determinación de la inversión es una de las parte principales de un proyecto de diseño de la planta. La inversión total para cualquier proceso consiste en la inversión de capital fijo para equipos eléctricos y las instalaciones en la planta más el capital de trabajo que deberá estar disponible para pagar salarios, mantener las materias primas y productos a la mano, y manejar otros elementos especiales que requieren un desembolso directo en efectivo. Así, en un análisis de los costos en los procesos industriales, costos de inversión de capital, costes de fabricación, y gastos generales incluidos los impuestos sobre la renta.

Este cálculo permitirá obtener el estudio de costos basado en los requerimientos determinados en unidades físicas en el estudio de ingeniería y dependiendo del proceso productivo seleccionado.

La finalidad del estudio de ingeniería, dentro del programa de elaboración del proyecto, es suministrar la información técnica necesaria para realizar la evaluación económica - financiera del proyecto y determinar si será factible la inversión a realizar, y la estructura de costos e ingresos del proyecto.^[16]

En la tabla 2.1 se presentan los porcentajes de algunos de los costos directos e indirectos asociados al estimado de costos para el diseño de una planta.

Tabla 2.1. Factores relativos para la estimación de la inversión de capital para los diversos rubros basados en el costo de los equipos entregados ^[16]

RUBROS	PORCENTAJE DE COSTO DEL EQUIPO ENTREGADO PARA PROCESAR		
	SÓLIDOS	SÓLIDOS Y FLUIDOS	FLUIDOS
COSTOS DIRECTOS			
Equipo adquirido y entregado	100	100	100
Instalación del equipo adquirido	45	39	47
Instrumentación y controles	9	13	18
Cañería y tuberías	16	31	66
Instalaciones eléctricas	10	10	11
Obras civiles	25	29	18
Mejoras del terreno	13	10	10
Instalaciones de servicios	40	55	70
Terreno	6	6	6
COSTO DIRECTO TOTAL DE LA PLANTA	264	293	346
COSTOS INDIRECTOS			
Ingeniería y supervisión	33	32	33
Gastos de construcción	39	34	41
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS	336	359	420
Honorarios de contratistas	17	18	21
Eventuales	34	36	42
Inversión de capital fijo	387	413	483
Capital de trabajo	68	74	86
INVERSIÓN TOTAL DE CAPITAL	455	487	569

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA DE PLANTA LOS JABILLOS CON LOS REQUERIDOS POR LA GERENCIA DE YACIMIENTO EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO E INYECCIÓN

Esta etapa consistió en tomar muestras en trece (13) puntos de control del sistema de tratamiento de agua con una frecuencia de dos veces por semana durante un período de un mes (del 15-07-2009 al 11-08-2009). Para realizar la recolección de muestras, inicialmente se seleccionaron los puntos de muestreo, tomando en consideración que se debía analizar el comportamiento de los parámetros críticos en cada etapa del proceso, los puntos seleccionados fueron los siguientes:

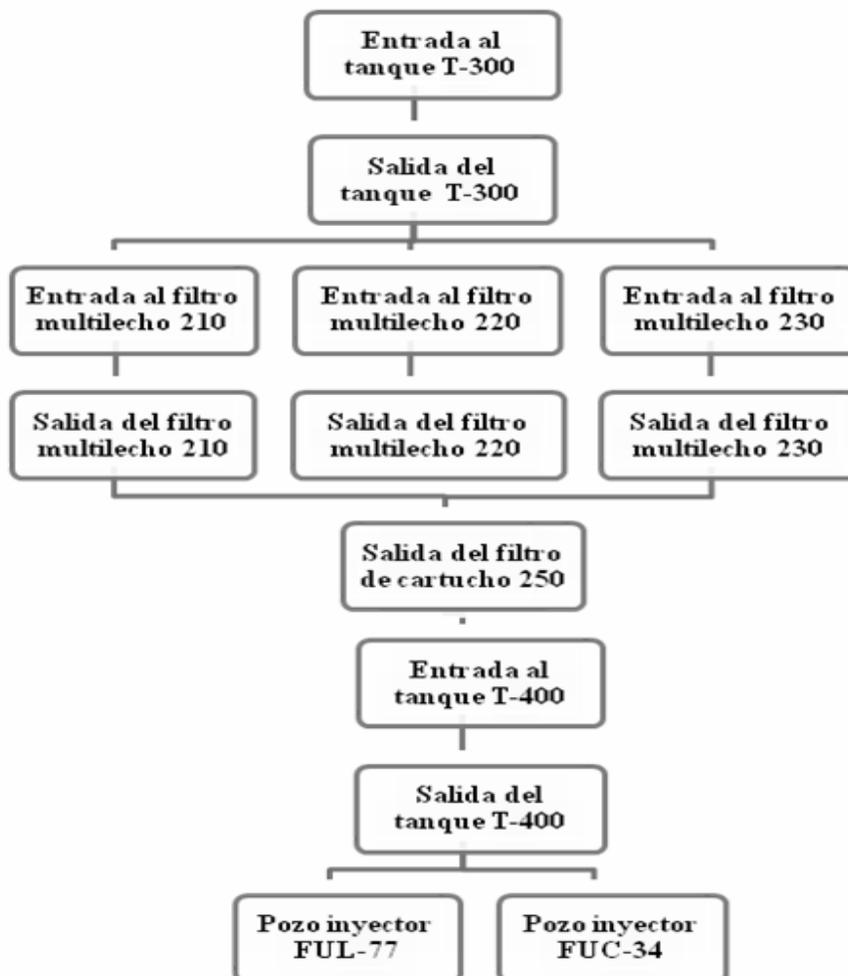


Figura 3.1. Diagrama de bloques con puntos seleccionados para muestreo

- 1) Entrada y salida del tanque desgasificador (T-300)
- 2) Entrada y salida del tanque de agua tratada (T-400)
- 3) Entrada y salida del filtros multilecho (F-210, F-220, F-230)
- 4) Salida del filtros de cartucho (F-250)
- 5) Pozos inyectoros de agua (FUL-77 y FUC-34)

La captación, preservación e identificación de las muestras se aplicó el método propuesto por las Normas COVENIN “Aguas naturales, industriales y residuales. “Procedimientos para el muestreo” [17].

Las muestras fueron captadas en recipientes de plástico de 1,0 litro de capacidad c/u, para realizar el análisis de concentración de sólidos suspendidos y disueltos, cloruros, hierro total, alcalinidad parcial y total, dureza cálcica, magnésica y total, pH, los cuales fueron realizados en el laboratorio ubicado en las instalaciones de planta RESOR en el Complejo Industrial Jusepín, mientras que la turbidez del agua se analizó en sitio al momento de tomar las muestras, luego se relacionaron gráficamente con los parámetros fisicoquímicos requeridos por la Gerencia de Yacimientos en función del tiempo con la finalidad de observar la variación de dichos parámetros durante el proceso de tratamiento e inyección.

3.1.1 Procedimientos experimentales usados para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua

3.1.1.1 Determinación de alcalinidad

Para la determinación de la alcalinidad se utilizó la norma COVENIN 2780:2002 [18].

➤ Alcalinidad parcial

1. Tomar 25 ml de muestra con la pipeta volumétrica y verter en un Erlenmeyer de 250 ml de capacidad.
2. Añadir 2 gotas de fenolftaleína al 1,0 % p/v.
3. Si la muestra torna a color rosado entonces. Tomar 10 ml y titular con HCl al 0,0926 N, hasta que la muestra cambie a incoloro.
4. Anotar el volumen gastado de HCl 0,0926 N y calcular la alcalinidad parcial según se indica en la ecuación 3.1.
5. Si la muestra no torna a color rosado entonces la alcalinidad parcial es cero (0) y se continua con la alcalinidad total.

➤ Alcalinidad Total

1. Sobre la muestra generada en el paso la alcalinidad parcial, añadir 3 gotas de anaranjado de metilo 0,5 % p/v.
2. Titular con ácido clorhídrico 0,0926 N hasta cambiar de verde a salmón.
3. Anotar el volumen gastado de HCl 0,0926 N, y calcule según la ecuación 3.2 la alcalinidad total.

$$\text{Alcalinidad parcial} = (A \times N / V) \times 50000 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

A = volumen de ácido clorhídrico (HCl) consumido (ml)

N = normalidad del ácido clorhídrico (eq.g/L)

V = volumen de muestra tomado en (ml)

$$\text{Alcalinidad total} = [(A + B) \times N / V] \times 50000 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde:

(A+B) = suma del volumen de ácido clorhídrico gastado en la alcalinidad parcial y total

N= normalidad del ácido clorhídrico (eq.g/L)

V = volumen tomado de muestra (ml)

➤ **Cálculo de la alcalinidad parcial**

Una vez obtenidos los resultados de la titulación la alcalinidad parcial se calcula empleando los datos de la tabla A.1 fecha 15/07/2009 correspondiente a la entrada al tanque T-300.

Para ello, se conoce el volumen de ácido clorhídrico (HCl) consumido (ml), la normalidad del ácido clorhídrico 0,0926 N (eq.g/l) y el volumen de muestra tomado es de 25 ml, se procede a calcular la alcalinidad a través de la ecuación 3.1

$$AP = \frac{0,30ml \times 0,0926N \times 50000}{25ml} = 55,56 ppm$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas del anexo A, para calcular la alcalinidad parcial, se calculó el promedio del mes por punto de muestreo y los resultados se reportan en las tablas 3.1 y 3.2.

➤ **Cálculo de la alcalinidad total**

Una vez obtenidos los resultados de la titulación la alcalinidad parcial se calcula empleando los datos de la tabla B.1 fecha 15/07/2009 correspondiente a la entrada al tanque T-300.

Para ello, se conoce el volumen de ácido clorhídrico (HCl) consumido (ml), la normalidad del ácido clorhídrico 0,0926 N (eq.g/l) y el volumen de muestra tomado es de 25 ml, se procede a calcular la alcalinidad total a través de la ecuación 3.2

$$AT = \frac{1,60ml \times 0,0926N \times 50000}{25ml} = 296,32 ppm$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas del anexo B, para calcular la alcalinidad total, se calculó el promedio del mes por punto de muestreo y los resultados se reportan en las tablas 3.1 y 3.2.

3.1.1.2 Determinación de dureza

Para la determinación de la dureza se utilizó la norma COVENIN 2771-91 ^[19]:

➤ **Dureza total**

1. Tomar una alícuota de 25 ml de muestra con una pipeta volumétrica y coloca en un erlenmeyer de 250 ml.

2. Añadir 1 ml de solución buffer de pH 10 y verifica que el pH se encuentre en $10 \pm 0,1$ unidades, en caso contrario añadir 1 ml más del buffer pH 10.
3. Añadir 3 gotas del indicador negro de eriocromo T 0,01%
4. Titular con EDTA 0,0208 N hasta observar el viraje de color de rojizo a azul.
5. Anotar este volumen (A).
6. Calcular la dureza total usando la ecuación 3.3

$$\text{Dureza total} = (A \times N / V) \times 50000 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde:

A = volumen gastado de EDTA (ml)

N = normalidad del EDTA (eq.g/L)

V = volumen de muestra (ml)

➤ Dureza cálcica

1. Tomar con una pipeta volumétrica una alícuota de 50 ml de muestra y colocarla en un Erlenmeyer de 250 ml de capacidad.
2. Añadir 1 ml de hidróxido de sodio 0,0208 N.
3. Añadir 0,25 g de muréxida y agitar hasta disolución.
4. Titular con EDTA 0,0208 N hasta que vire de color de rosado pálido a púrpura intenso.
5. Anotar este volumen (B).
6. Calcular la dureza cálcica usando la ecuación 3.4

$$\text{Dureza cálcica} = (B \times N / V) \times 50000 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

donde:

B = volumen gastado de EDTA (ml)

N = normalidad del EDTA (eq.g/L)

V = volumen de muestra (ml)

➤ Dureza magnésica

Calcular la dureza magnésica de la muestra empleando la ecuación 3.5

$$\text{Dureza magnésica} = \text{dureza total} - \text{dureza cálcica} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

➤ Cálculo de la dureza total

Una vez obtenidos los resultados de la titulación la alcalinidad parcial se calcula empleando los datos de la tabla C.1 fecha 15/07/2009 correspondiente a la entrada al tanque T-300.

Para ello, se conoce el volumen de EDTA consumido (ml), la normalidad del EDTA 0,0208 N (eq.g/l) y el volumen de muestra tomado es de 25 ml, se procede a calcular la dureza total a través de la ecuación 3.5

$$DT = \frac{0,48ml \times 0,0208 N \times 50000}{25ml} = 19,97 ppm$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas del anexo C, para calcular la dureza total, se calculó el promedio del mes por punto de muestreo y los resultados se reportan en las tablas 3.1 y 3.2.

➤ Cálculo de la dureza cálcica

Una vez obtenidos los resultados de la titulación la alcalinidad parcial se calcula empleando los datos de la tabla D.1 fecha 15/07/2009 correspondiente a la entrada al tanque T-300.

Para ello, se conoce el volumen de EDTA consumido (ml), la normalidad del EDTA 0,0208 N (eq.g/l) y el volumen de muestra tomado es de 50 ml, se procede a calcular la dureza total a través de la ecuación 3.6

$$DCa = \frac{0,40ml \times 0,0208N \times 50000}{50ml} = 8,32 ppm$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas del anexo D, para calcular la dureza cálcica, se calculó el promedio del mes por punto de muestreo y los resultados se reportan en las tablas 3.1 y 3.2.

➤ Cálculo de la dureza magnésica

Una vez obtenidos los resultados de la titulación la alcalinidad parcial se calcula empleando los datos de la tabla E.1 fecha 15/07/2009 correspondiente a la entrada al tanque T-300.

Para ello, se conoce la dureza total y la dureza cálcica del agua, se procede a calcular la dureza magnésica a través de la ecuación 3.7

$$DMg = (19,97 - 8,32) ppm = 11,65 ppm$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas del anexo E, para calcular la dureza magnésica, se calculó el promedio del mes por punto de muestreo y los resultados se reportan en las tablas 3.1 y 3.2.

3.1.1.3 Determinación de la concentración de cloruros

Para la determinación de la concentración de cloruros se utilizó la norma COVENIN 3141:1995 [20].

1. Tomar una alícuota de 5 ml de la muestra de agua y verter en un Erlenmeyer de 150 ml.
2. Ajustar el pH entre 7,0 a 8,3 añadiendo 2 gotas de CaCO_3 0,1 N.
3. Luego añadir 2 gotas de fenolftaleína 0,25 % (debe producirse un color rosa)
4. Añadir gota a gota H_2SO_4 0,1 N hasta que vire a incoloro
5. Agregar tres gotas de cromato de potasio K_2CrO_4 al 5 %.
6. Titular con AgNO_3 0,0194 N hasta que vire de amarillo a rojo ladrillo.
7. Calcular la concentración de cloruros en agua según la fórmula 3.6

$$\text{meq/L de Cl} = V \times N \times 1000 \times 35,5 / \text{ml de muestra} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

donde:

V= volumen de AgNO_3 en ml gastado

N= normalidad de AgNO_3

PM (Cl) = 35,5 g/mol

➤ Cálculo de la concentración de cloruros

Una vez obtenidos los resultados de la titulación la alcalinidad parcial se calcula empleando los datos de la tabla F.1 fecha 15/07/2009 correspondiente a la entrada al tanque T-300.

Para ello, se conoce el volumen de nitrato de plata (AgNO_3) consumido (ml), la normalidad del nitrato de plata es 0,0194 N (eq.g/l) y el volumen de muestra tomado es de 5 ml, se procede a calcular la alcalinidad total a través de la ecuación 3.8

$$Cl = \frac{2,00ml \times 0,0194 \times 1000 \times 35,5}{5ml} = 275,48 ppm$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas del anexo F, para calcular la concentración de cloruros, se calculó el promedio del mes por punto de muestreo y los resultados se reportan en las tablas 3.1 y 3.2.

3.1.1.4 Determinación de sólidos suspendidos totales (TSS)

Para la determinación de los sólidos suspendidos se utilizó la norma COVENIN 2461-87^[21]:

1. Purgar (abrir la válvula de suministros de aire y dejar pasar aire por unos 5 minutos) la línea de aire de suministro al equipo antes de ser usado.
2. Verificar que la presión de aire de suministro corresponda a 20 psi, luego despresurizar la línea del equipo.
3. Tomar un filtro Millipore y colóquelo en la mufla y/o estufa a 100 °C por 10 minutos, luego deje reposar en el desecador por 15 minutos.
4. Tare la balanza analítica y pese el filtro ya secado y reposado (P_i).
5. Colocar el filtro pesado en el porta filtro del equipo y cierre.
6. Vierta 500 ml de muestra en el contenedor graduado y tape, verifique que no haya fuga, abriendo el suministro de aire y observando cualquier fuga.
7. De existir fuga, despresurizar, corregir y continuar con el siguiente paso.
8. De no existir fuga, despresurizar y completar 1000 ml de muestra u otro volumen representativo que será considerado en el cálculo, continuar con la filtración abriendo nuevamente la válvula de suministro de aire.
9. Al finalizar la filtración, despresurizar el equipo, destapar el portafiltro y colocar el filtro Milli-pore en la mufla y/o estufa a 100 °C aproximadamente por 1 hora.
10. Transcurrido este tiempo, deje reposar el papel en el desecador por 15 minutos.
11. Pese el filtro (P_f) y anote.
12. Calcular el total de sólidos suspendidos (TSS) con la ecuación 3.7.

$$TSS = \frac{P_f - P_i}{V} \times 10^6 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

donde:

TSS = total de sólidos suspendidos, mg/l

Pf = peso final del filtro, g

Pi = peso inicial del filtro, g

V = volumen de muestra, ml

➤ Cálculo de los sólidos suspendidos

Una vez obtenidos los resultados de la titulación la alcalinidad parcial se calcula empleando los datos de la tabla G.1 fecha 15/07/2009 correspondiente a la entrada al tanque T-300.

Para ello, se conoce el peso inicial del filtro, el peso final del filtro y el volumen de muestra tomado es de 600 ml, se procede a calcular los sólidos suspendidos a través de la ecuación 3.9

$$TSS = \frac{(0,0760 - 0,0756)g}{600ml} \times 10^6 = 0,67 ppm$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas del anexo G, para calcular la concentración de sólidos suspendidos, se calculó el promedio del mes por punto de muestreo y los resultados se reportan en las tablas 3.1 y 3.2.

3.1.1.5 Determinación del pH

Para la determinación del pH se utilizó la norma COVENIN 2462:2002 ^[22]:

➤ Ajuste del medidor de pH con 3 buffer

Se toman los buffer de pH 4,01, 7,00 y 10,01.

1. En el medidor de pH Multiparameter-sensIONTM156, se presiona la tecla I/exit para encender el equipo.
2. Se presiona la tecla CAL y aparecerá la palabra STANDARD 1.
3. Se introduce el buffer de pH = 4,01, se presiona READ/ENTER y espera mientras el electrodo se estabiliza.
4. Una vez estabilizado, aparecerá en pantalla STANDARD 2, lavar el electrodo con agua desmineralizada y secar con papel suave.
5. Se introduce en el buffer de pH = 7,00 y presione la tecla READ/ENTER, espere que estabilice.
6. Repetir los pasos 4 y 5 con el buffer pH = 10,01.
7. Al estabilizar la lectura del STANDAR 3, aparecerá en la pantalla SLOPE and STORE, guardar esta calibración presionando ENTER.

➤ Medición del pH

1. Tomar 80 ml de muestra en un beaker de 150 ml, y mantener a la temperatura deseada, en baño térmico. Encender el equipo presionando la tecla I/exit.
2. Seleccionar el modo pH con la tecla pH/mV del panel frontal del medidor de pH.
3. Lavar con agua desmineralizada el electrodo y secar con papel suave.
4. Introducir el electrodo en la muestra verificando que este totalmente sumergido en la muestra y agitar suavemente.
5. Presionar READ/ENTER y el equipo mostrará en la pantalla STABILIZING, esperar a que estabilice la lectura.
6. Reportar el valor obtenido.
7. Lavar el electrodo con agua desmineralizada, secar con papel suave y colocar en la solución de resguardo.
8. Guardar el equipo en el sitio designado para ello, aplicando las precauciones del caso.

3.1.1.6 Determinación de turbidez

Para la determinación de la turbidez se utilizó la norma COVENIN 2781:2002 ^[23]:

1. Encender el turbidímetro HACH 2100 P presionando la tecla I/O del equipo.
2. Observar el aspecto y color de la muestra y compárelo con las especificaciones de aspecto establecidas en la tabla de especificaciones de insumos; para el caso de productos químicos.
3. Llenar una celda limpia y seca con 10-15 ml de la muestra a analizar.
4. Secar la celda con cuidado utilizando un paño de terciopelo (o toallín suave) para evitar ralladuras en la misma.
5. Introducir la celda en el porta celda de medición del equipo.
6. Presionar la tecla READ del equipo y esperar unos segundos.
7. El valor de la turbidez se reflejará en la pantalla del equipo expresado en NTU.
8. Reportar este valor.

3.1.1.7 Determinación de hierro total

Para la determinación de hierro se utilizó la norma COVENIN 2769-91 ^[24]:

1. Encender el equipo DR/2010 en la tecla esperar unos segundos hasta que se estabilice.
2. Introducir el número de programa para hierro (Fe), método Ferrover. Pulsar: 265 . La pantalla indicará ajustar a 510 nm.
3. Rotar el dial que se encuentra a mano derecha del equipo hasta alcanzar la longitud de onda indicada 510 nm. Una vez se indique la longitud de onda exacta, la pantalla indicará brevemente: muestra cero y a continuación mg/l Fe FV.
4. Colocar el elevador de celdas de 10 ml en los soportes de medición.
5. Llenar una celda de 10 ml, con la celda de muestra, previamente ajustado al pH entre 3 y 4.
6. Añadir el contenido de una bolsita de reactivo Ferrover en la celda con la muestra. Agitar para mezclar.
7. Presionar , comenzará un período de reacción de 3 minutos.
8. Cuando suene el temporizador, la pantalla indicará: mg/l Fe FV. Llenar otra celda con 10 ml de muestra del bache preparado con pH entre 3 y 4 (blanco).
9. Colocar el blanco en los soportes de medición. Cerrar la tapa y presionar , la pantalla indicará: ajuste y a continuación 0,00 mg/l Fe FV.
10. Menos de 3 minutos después de que haya sonado el temporizador, colocar la celda con la muestra en los soportes de medición. Cerrar la tapa.
11. Pulsar: , la pantalla indicará: lectura y a continuación aparecerá el resultado en mg/l de Fe.

Nota: Una vez que se realizaron los análisis deseche las soluciones por el vertedero o drenaje de aguas servidas del laboratorio. Los envases usados para tomar las muestras se disponen en los tambores de desechos no peligrosos (tambores de color amarillo), de acuerdo al procedimiento general plan de manejo de desechos.

3.1.1.8 Determinación del índice de Langelier

Con la finalidad de observar las propiedades incrustantes o corrosivas del agua de inyección, se calculó el índice de Langelier; para ello se tomaron los datos requeridos en las ecuaciones 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 de las tablas 3.1 y 3.2.

Cabe destacar que este cálculo se realizó para cada uno de los puntos muestreados a una temperatura promedio de 38 °C con el propósito de verificar la tendencia que pueda tener el agua durante su tratamiento.

Tomando los datos necesarios de las tablas mencionadas, se procede a calcular el índice de Langelier para el punto de control correspondiente a la entrada al tanque desgasificador denominado T-300

$$A = \frac{1}{10} \times (\text{Log}[819,03] - 1) = 0,2$$

$$B = -13,12 \times \text{Log}(38^\circ C + 273) + 34,55 = 1,8 \quad C =$$

(Ec. 2.9)

$$C = \text{Log}(5,98) - 0,4 = 0,4$$

$$D = \text{Log}(669,04) = 2,8$$

$$pH_s = (9,3 + 0,2 + 1,8) - (0,4 + 2,8) = 8,1$$
$$IL = 8,3 - 8,1 = 0,2$$

De manera análoga se aplicó este procedimiento a las tablas 3.1 y 3.2, para calcular el índice de Langelier y los resultados se reportan en el capítulo IV.

Tabla 3.1. Caracterización fisicoquímica del agua de planta Los Jabillos, promedio mes (del 15-07-2009 al 11-08-2009)

PARÁMETRO	PUNTOS DE MUESTREO					
	ET-300	ST-300	EFM-210	SFM-210	EFM-220	SFM-220
Alcalidad parcial (ppm)	43,99	53,25	46,30	46,30	37,04	44,45
Alcanilidad total (ppm)	669,04	652,83	719,19	716,11	703,76	696,35
Cloruros (ppm)	276,45	276,45	265,13	300,70	291,00	310,40
Conductividad (µS/cm)	1641,75	1614,88	1887,50	1902,17	1772,80	1815,20
Dureza cálcica (ppm)	5,98	5,72	5,55	4,85	6,66	6,24
Dureza magnésica (ppm)	6,93	6,24	4,68	4,68	3,64	3,38
Dureza total (ppm)	12,91	11,96	11,79	11,09	12,48	11,65
Hierro (ppm)	0,15	0,15	0,13	0,12	0,13	0,14
pH	8,30	8,37	8,41	8,41	8,36	8,35
Sólidos disueltos (ppm)	819,03	796,24	944,50	952,00	887,60	904,20
Sólidos suspendidos (ppm)	0,56	0,44	0,86	0,45	0,55	0,20
Turbidez (NTU)	0,15	0,26	0,14	0,18	0,27	0,14

ET-300: entrada al tanque desgasificador T-300

ST-300: salida del tanque desgasificador T-300

EFM-210: entrada al filtro multilecho F-210

SFM-210: salida del filtro multilecho F-210

EFM-220: entrada al filtro multilecho F-220

SFM-220: salida del filtro multilecho F-220

Tabla 3.2. Caracterización fisicoquímica del agua de planta Los Jabillos, promedio mes (del 15-07-2009 al 11-08-2009)

PARÁMETRO	PUNTOS DE MUESTREO						
	EFM-230	SFM-230	SFC-250	ET-400	ST-400	FUL-77	FUC-34
Alcalidad parcial (ppm)	55,56	48,15	46,30	50,93	43,99	46,30	53,25
Alcalinidad total (ppm)	718,58	718,58	724,60	693,45	678,30	719,97	726,91
Cloruros (ppm)	287,12	287,12	312,83	288,58	274,03	315,25	330,53
Conductividad (µS/cm)	1566,60	1710,40	1837,63	1674,50	1651,88	1769,50	1796,38
Dureza cálcica (ppm)	4,99	5,82	5,98	5,98	5,46	5,72	5,72
Dureza magnésica (ppm)	4,16	3,12	5,98	5,46	6,50	5,72	7,10
Dureza total (ppm)	11,65	10,82	11,96	11,44	11,96	11,44	12,82
Hierro (ppm)	0,13	0,14	0,14	0,12	0,14	0,14	0,19
pH	8,31	8,30	8,36	8,51	8,35	8,46	8,34
Sólidos disueltos (ppm)	853,60	857,80	922,25	833,50	826,25	883,63	898,50
Sólidos suspendidos (ppm)	0,80	0,43	0,77	1,71	0,54	0,42	0,42
Turbidez (NTU)	0,23	0,20	0,14	0,26	0,42	0,37	0,33

EFM-230: entrada al filtro multilecho F-230

SFM-230: salida del filtro multilecho F-230

SFC-250: salida del filtro de cartucho F-250

ET-400: entrada al tanque de agua tratada T-400

ST-400: salida del tanque de agua tratada T-400

FUL-77: pozo inyector de agua

FUC-34: pozo inyector de agua

3.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN PRESENTES EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE INYECCIÓN

Esta etapa consistió en realizar balances de masa en función de los sólidos suspendidos presentes en el agua de tratamiento con el fin de determinar la variación de partículas sólidas en la operación unitaria de filtrado, y con ello se calculó la eficiencia de remoción de sólidos de cada filtro empleado en el sistema de tratamiento de planta Los Jabillos.

Para cuantificar los sólidos que se acumulan en los filtros, se toma como referencia la ecuación 2.21.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Considerando que no existe reacción química de los sólidos en el filtro, los términos “generación y consumo” son cero y la expresión queda de la siguiente manera:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

El término entrada está dado por la cantidad de sólidos suspendidos en la descarga del tanque desgasificador T-300, mientras que el término salida viene dado por la cantidad de sólidos suspendidos que logran atravesar el proceso de filtrado (figura 3.1)

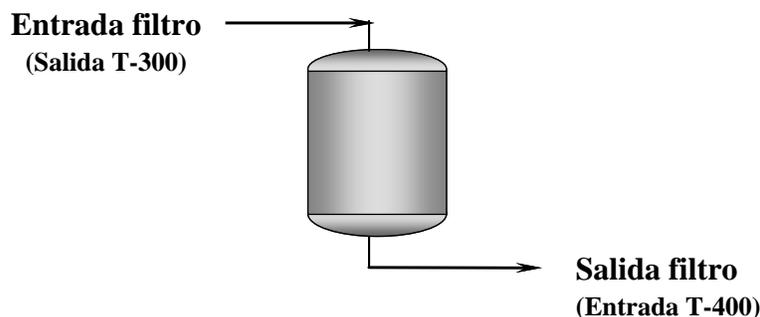


Figura 3.2. Proceso de filtración

La cantidad de sólidos suspendidos contenidos en el agua que se serán sometidos al proceso de filtración de planta Los Jabillos, se encuentran en la tabla 3.1 y 3.2 y están expresados en ppm (mg/L)

Para el filtro 210, la cantidad sólidos acumulados se determina sustituyendo los valores de sólidos suspendidos tanto a la entrada como a la salida tomados de la tabla 3.1, en la ecuación 3.10.

$$\text{Acumulación}_{\text{sólidos filtro 210}} = (0,86 - 0,45) \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0,41 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

De manera análoga se aplica este procedimiento a los filtros 220, 230 y 250 y los resultados de este cálculo se muestran en el capítulo 4, en la tabla 4.1.

3.2.1 Cálculo de la eficiencia de los filtros

El porcentaje de eficiencia de los filtros viene dado por la cantidad de sólidos acumulados y se calculan a través de la siguiente expresión:

$$\%EficienciaFiltro_{210} = \frac{Sólidos_{Acumulados}}{Sólidos_{Entrada}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Luego, para el filtro 210 se tiene que la eficiencia es:

$$\%EficienciaFiltro = \frac{0,41 \text{ mg/L}}{0,86 \text{ mg/L}} \cdot 100$$

$$\%EficienciaFiltro = 47,67 \%$$

Los resultados de este cálculo se muestran en el capítulo 4, en la tabla 4.2

3.3 ESTABLECIMIENTO DE SOLUCIONES DE CARÁCTER FÍSICAS Y/O QUÍMICAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE INYECCIÓN EMPLEADA EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE PLANTA LOS JABILLOS EN EL YACIMIENTO K FUC 1

Esta etapa se plantearon y analizaron todas las posibles causas por las cuales el sistema de tratamiento, presenta anomalías en cuanto a los parámetros de calidad del agua de inyección, para ello se emplearon los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el muestreo, así como los de la eficiencia de los filtros.

Estos valores permitieron representar de forma gráfica el comportamiento de la todos los parámetros de calidad del agua procesada por la planta y determinar las causas de mayor impacto en el proceso de tratamiento, también permitió comprobar la eficacia de los equipos de filtración presentes en la planta y de los químicos aplicados para el mejoramiento de la calidad del agua.

La eficiencia de los filtros también fue un factor clave al momento de establecer las causas del mal funcionamiento de la planta, esto debido a que los filtros retienen la mayor cantidad de sólidos presentes en el agua los cuales originan la turbidez debido a los sólidos suspendidos que gradualmente taponan el área permeable del fluido, aumentan la conductividad eléctrica y ayudan a proliferar las bacterias sulfatos reductoras que posteriormente dañaran la cara del yacimiento, equipos y líneas de proceso.

Una vez comprobados los problemas que presenta planta Los Jabillos para garantizar la calidad del agua de inyección, se establecieron las siguientes soluciones lógicas de carácter físico:

1. Colocar dos (2) filtros multilechos en la entrada de agua a planta Los Jabillos (Entrada tanque T-300)

2. Reemplazar los filtros multilechos
3. Reemplazar los filtros de cartucho
4. Realizar mantenimiento general a planta Los Jabillos
5. Cambiar los lechos de los filtros multilechos
6. Emplear cartuchos nuevos y originales para los filtros de cartucho

Las soluciones que se aplicarán en la planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos son las opciones 2, 3, 4; las opciones 5 y 6 pueden ser aplicadas en caso de que alguna de las anteriores no se pueda llevar a cabo, es importante destacar de que estas soluciones se plantearon en función de la vida útil de los filtros y de las necesidades básicas de la planta, la opción 1 posiblemente se aplicará si existe ampliación en las instalaciones de la planta, todo esto tiene como finalidad mejorar el proceso y obtener parámetros de calidad del agua bajo especificación, que permitan disminuir el daño a la formación receptora, disminuir gastos por aplicación de químicos así como aumentar el factor de recobro de petróleo en el yacimiento, todo esto manteniendo un equilibrio entre la explotación y el ambiente.

3.4 PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO DE COSTOS DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE PLANTA LOS JABILLOS

Esta etapa se realizó el estudio de costos de las alternativas establecidas en la etapa anterior con el fin de presentar el costo de cada solución la cual permitirá mantener bajo especificación los parámetros de inyección de agua establecidos por la Gerencia de Yacimientos.

El estimado fue realizado por la Gerencia de Ingeniería de Costos en función de los siguientes equipos mayores: dos (2) filtros multilecho y un (1) filtro de cartucho, para ello se utilizaron datos históricos de proyectos similares, manuales corporativos de estimados presupuestarios, manuales de estimaciones de costo por secciones mecánicas, se consultaron proveedores de la industria petrolera, se consideró una contingencia de 15%, con el propósito de cubrir las posibles variables no identificadas durante el proceso de estimación, esto debido al nivel de información adquirida y a la naturaleza del proceso, el estudio de costos también contempla los costos asociados a procura y gestión por parte del personal de PDVSA.

La información suministrada por la Gerencia de Ingeniería de costos, se encuentra en base a valores constantes del mes de diciembre de 2009 y tasa cambiaria de 2,15 Bs./US\$ para horizonte de 5 años; sin embargo debido a que han transcurrido 10 meses desde que se realizó el estimado y la tasa cambiaria del dólar se modificó a 4,30 Bs./US\$, la cantidad de dinero requerida para la adquisición de los filtros incremento, por tanto se manejarán los costos de los equipos en base a la actual tasa de cambio (4,30 Bs./US\$).

Adicional a este estimado se contemplarán otros costos directos e indirectos como lo son: la instalación del equipo una vez adquirido, la instrumentación y controles, ingeniería y supervisión y eventuales que puedan transcurrir durante la instalación del equipo, los cuales representan un porcentaje de dinero adicional a la adquisición de los equipos y deben ser considerados con la finalidad de conocer el costo total de la inversión.

Para obtener estos valores, inicialmente se debe tener el costo que tendrá el equipo adquirido, una vez conocido este valor se procede a calcular los porcentajes que representan cada uno de los rubros involucrados para la puesta en funcionamiento de dichos equipos, dichos porcentajes se encuentran tabulados en la tabla 2.1.

A medida que se van calculando la cantidad de dinero por rubro, el mismo se va acreditando al costo del equipo, al final se suman todos los montos involucrados resultando el costo total que se requiere para colocar en funcionamiento los equipos adquiridos.

Todo este procedimiento se aplicó con la finalidad de tener mayor confiabilidad en los costos resultantes para este proyecto.

3.5 EQUIPOS, MATERIALES Y SUSTANCIAS

3.5.1 Equipos

1. Balanza digital marca METTLER TOLED modelo AB204, rango 0-220 g, desviación $\pm 0,0001$
2. Turbidímetro marca Hach modelo 2100 P, rango 0-1000 NTU, desviación $\pm 0,01$
3. Medidor de pH marca Hach modelo Sension 156, rango 0-20 pH, desviación $\pm 0,01$
4. Filtro a presión marca NALCO con capacidad de 1000 ml
5. Horno CSF-1200 marca Carbolite con precisión de ± 5 °C, rango 2.25-1000 °C
6. Espectrofotómetro marca HACH modelo DR/2010, rango 0-2,9999 Abs desviación $\pm 0,01$
7. Conductímetro marca Hach modelo Sesion5, rango 0-1,999 μs , desviación ± 1

3.5.2 Materiales a utilizar

1. Membrana filtrante (Millipore) 0,45 μm
2. Pinza para sujetar membrana filtrante
3. Cilindro volumétrico de 1000 ml
4. Bureta semiautomática de 25 ml
5. Erlenmeyer de 250 ml
6. Beaker de 150 ml
7. Gotero de plástico o vidrio 3,0 ml
8. Pipeta volumétrica de 25 y 50 ml
9. Celdas HACH de 10 ml
10. Bureta de 25 ml
11. Erlenmeyer de 125 ml
12. Beaker de 150 ml
13. Pipeta volumétrica de 5 ml
14. Soporte con pinzas para buretas
15. Tubo muestreador
16. Comparador de colores

3.5.3 Sustancias

1. Sal disódica EDTA 0,02 N
2. Negro eriocromo T 0,01 %
3. Solución buffer pH 10 (Solución de cloruro de amonio (NH_4Cl) e hidróxido de amonio (NH_4OH)).
4. Hidróxido de sodio 0,02 N
5. Muréxida

6. Reactivo HACH Ferrover
7. Acido clorhídrico 0,1 N
8. Carbonato de calcio, CaCO_3 , 0,1 N
9. Acido sulfúrico H_2SO_4 , 0,1 N
10. Solución de fenolftaleína, 0,25 %
11. Solución de nitrato de plata (AgNO_3), 0,01 N
12. Solución de cloruro de sodio (NaCl), 0,01N
13. Cromato de potasio (K_2CrO_4), 5%
14. Buffer pH 4,01;7,00; 10,01
15. Agua destilada

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA DE PLANTA LOS JABILLOS CON LAS ESPECIFICACIONES REQUERIDAS POR LA GERENCIA DE YACIMIENTOS EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO E INYECCIÓN

El objetivo de comparar los parámetros fisicoquímicos de planta Los Jabillos con las especificaciones requeridas por la Gerencia de Yacimientos es el de verificar las condiciones de operación de la planta y analizar principalmente la calidad del agua que se requiere inyectar en el yacimiento K FUC 1 del campo el Furrial.

Las especificaciones del agua de inyección requeridas por la Gerencia de Yacimientos son las siguientes:

TABLA 4.1 Especificaciones del agua de inyección de planta Los Jabillos ^[7]

PARÁMETROS	LÍMITES DE CONTROL
OXÍGENO DISUELTO (ppm)	Máximo 0,05
TURBIDEZ (NTU)	Máximo 0,5
ALCALINIDAD TOTAL (ppm)	Igual entrada a salida
DUREZA TOTAL (ppm)	Igual entrada a salida
DUREZA CÁLCICA (ppm)	Igual entrada a salida
CLORUROS (ppm)	Igual entrada a salida
pH	7,4-8,5
SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (ppm)	Menor a 0,5
HIERRO TOTAL (ppm)	Menor a 0,5
% PARTÍCULAS < 2 μ	94%
VELOCIDAD DE CORROSIÓN (MPA)	Máximo 5

Los parámetros alcalinidad total, dureza total, dureza cálcica y cloruros tienen como límite de control igual entrada y salida, debido a que al momento de realizarse los estudios del

agua para inyección, el agua presentó concentraciones bajas con respecto a estos parámetros, por ende la concentración de estos compuestos que entren al proceso deben ser igual a los que salen y con ello se evita la acumulación de compuestos de origen inorgánico tanto en las tuberías como en la cara de la formación.

Las figuras que se presentan a continuación corresponden al proceso de tratamiento e inyección de planta Los Jabillos fueron realizadas con los datos tomados de las tablas 3.1 y 3.2, los cuales son los resultados fisicoquímicos promedio de los análisis realizados a las muestras de agua captadas; durante el 15 de julio al 11 de agosto de 2009. Se observa que los parámetros: sólidos totales suspendidos (TSS), y la concentración de cloruros (Cl) a lo largo del proceso de tratamiento e inyección se encuentran por encima del límite permisible por el proceso y el yacimiento; mientras que los parámetros pH, alcalinidad parcial (Alc. P), alcalinidad total (Alc. T), dureza total (DT), dureza cálcica (DCa), dureza magnésica (DMg) hierro (Fe), turbidez (Turb) se mantiene dentro de especificación

1. La concentración de sólidos suspendidos: es uno de los parámetros fisicoquímicos que determina la calidad del agua para inyección. El análisis del comportamiento de esta variable permite garantizar que el agua cumpla con las especificaciones exigidas por yacimiento.

Como se puede observar en la figura 4.1, el límite máximo permisible para la recuperación secundaria en el campo El Furrial es 0,5 ppm de TSS, debido a que el agua de inyección según parámetros de diseño debe salir de los filtros multilecho con 0,5 ppm de concentración, los filtros de cartucho se encargaran de corregir alguna anomalía que pueda ocurrir en la primera etapa de filtrado ^[15], esta condición permitirá el paso del agua a través de de toda la formación con el fin de recuperar al máximo el crudo contenido en el yacimiento.

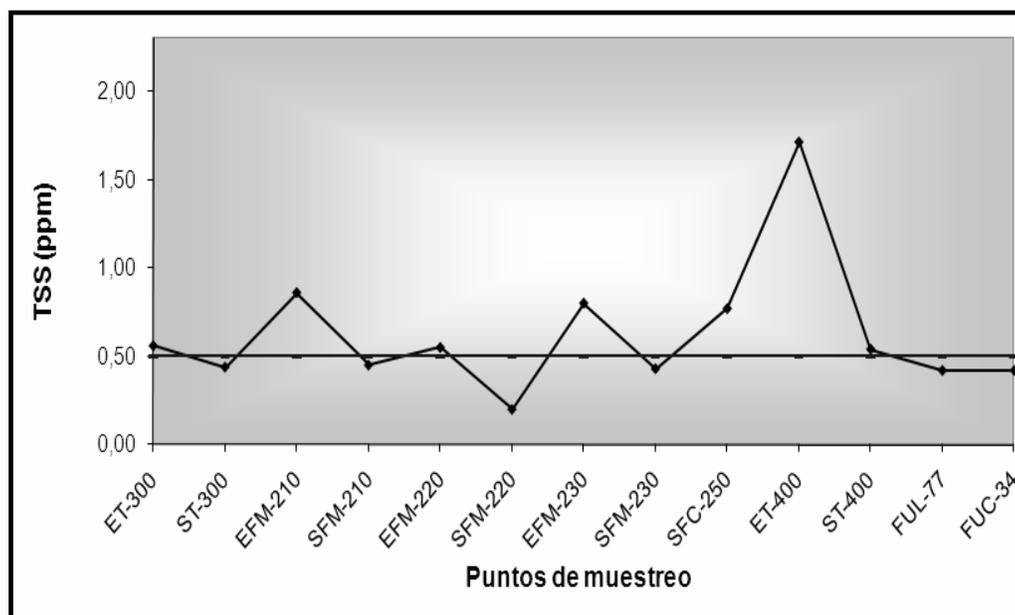


Figura 4.1. Comportamiento de los sólidos totales suspendidos durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

En la figura, se puede notar que la concentración de sólidos suspendidos a lo largo del proceso de tratamiento e inyección se encuentra sobre el límite de control establecido por la Gerencia de Yacimientos, sin embargo a pesar de que el sistema de filtración en ocasiones lleva el agua a especificación, el proceso de remoción de sólidos no es eficiente y permite el paso de altas concentraciones de sólidos suspendidos al tanque estabilizador de agua tratada (T-400) y salen en menor concentración lo que permite suponer la acumulación de sólidos en el interior del tanque, los cuales han sedimentado, por tanto al existir alguna eventualidad en la planta tal como baja en el nivel de los tanques, se producirá turbulencia en el interior de los mismos, aumentara la concentración de sólidos suspendidos en el agua que posteriormente se inyectará al yacimiento y podría producir taponamiento de la garganta poral de la roca provocando la disminución de la permeabilidad y por ende la producción de petróleo.

2. **El pH:** es un parámetro fisicoquímico del agua de gran importancia ya que la corrosión es acelerada en los ambientes ácidos ($\text{pH} < 7$) y retardada en condiciones alcalinas ($\text{pH} > 7$) lo cual puede producir incrustación.

Para determinar la tendencia que presenta el agua se empleó el índice de Langelier debido a que hace una buena consideración del equilibrio carbonato (CO_3^{2-}) - bicarbonato (HCO_3^-), este cálculo se realizó a una temperatura de $38\text{ }^\circ\text{C}$ la cual es la temperatura promedio del sistema de estudio, los resultados se presentan en la tabla 4.2, donde se pueden apreciar que los valores obtenidos son mayores a cero ($\text{IL} > 0$), por tanto se confirma que el agua presenta una tendencia incrustante debido a la coexistencia de los iones carbonatados, sin embargo en la entrada al tanque estabilizador de agua (ET-400) el índice de Langelier presenta un valor de 0,4 lo cual indica que el agua en este punto presenta mayor tendencia a ser incrustante por la inestabilidad del ion carbonato, el cual al aumentar su concentración puede producir daños como pérdida de diámetro en este equipo así como permitir el arrastre de estos precipitados al yacimiento.

TABLA 4.2 Índice de Langelier correspondiente a cada punto de control de planta Los Jabillos

PUNTOS DE MUESTREO	INDICE DE LANGELIER
ET-300	0,2
ST-300	0,2
EFM-210	0,3
SFM-210	0,2
EFM-220	0,3
SFM-220	0,2
EFM-230	0,1
SFM-230	0,2
SFC-250	0,3
ET-400	0,4
ST-400	0,2
FUL-77	0,3
FUC-34	0,2

En la figura 4.2, se observa el comportamiento de pH del agua de planta Los Jabillos, el cual en promedio se mantiene en 8,3, por lo que se espera que se mantenga el equilibrio

carbonato – bicarbonato, existiendo la probabilidad de tener carbonato disuelto en el sistema acuoso, esta condición del sistema acuoso (pH básico + concentraciones importantes de carbonato) a determinadas condiciones facilita la precipitación de CaCO_3 por sobresaturación de esta especie en el medio acuoso (sobrepasa el K_{ps} de la reacción).

A pesar de que el pH del agua de planta Los Jabillos se mantiene constante a lo largo del proceso de tratamiento e inyección, es necesario que no ocurran cambios en las condiciones del agua (temperatura, presión), lo cual puede favorecer la inestabilidad del ion carbonato (CO_3^{2-}), y precipitará. Este precipitado es uno de los responsables de pérdida de porosidad por taponamiento de los radios de garganta poral y permeabilidad en el yacimiento con la consecuente pérdida de productividad.

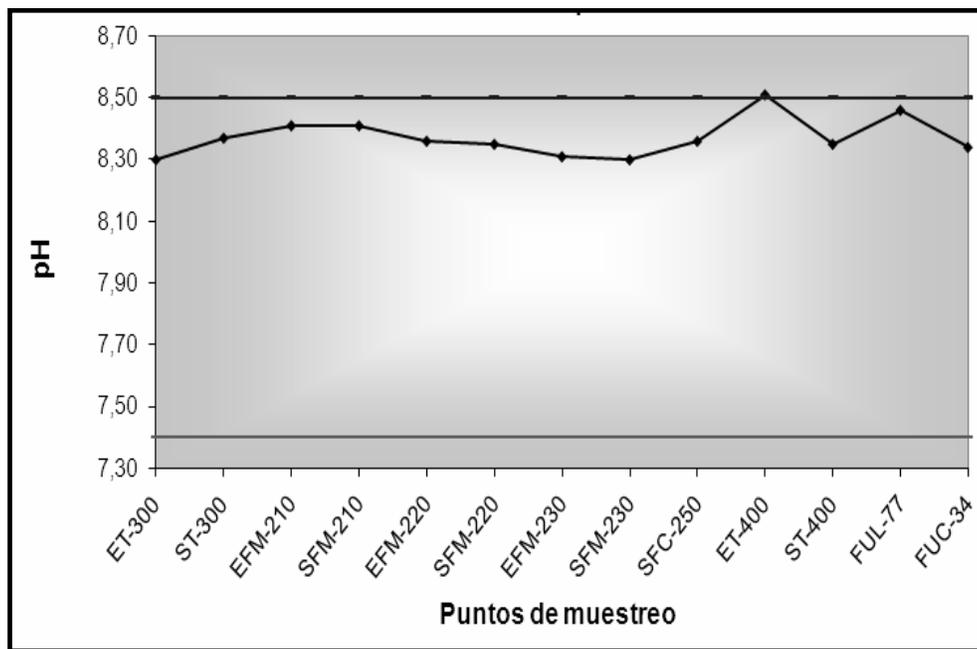


Figura 4.2. Comportamiento del pH durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

3. La alcalinidad: en la figura 4.3 de alcalinidad total mantiene su condición de alcalinidad, esta condición en el agua produce un efecto tampón ya que absorbe protones manteniendo el pH en un valor constante y lo mantiene estable a posibles variaciones en el medio, sin embargo este parámetro mantiene altas concentraciones causa de la presencia de iones carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) e iones hidróxidos (OH^-) los cuales proporcionan la tendencia incrustante del agua y puede originar la precipitación de estas sales inorgánicas y producir daños tanto a los equipos de superficie como a la formación receptora (reducción de la permeabilidad relativa del petróleo).

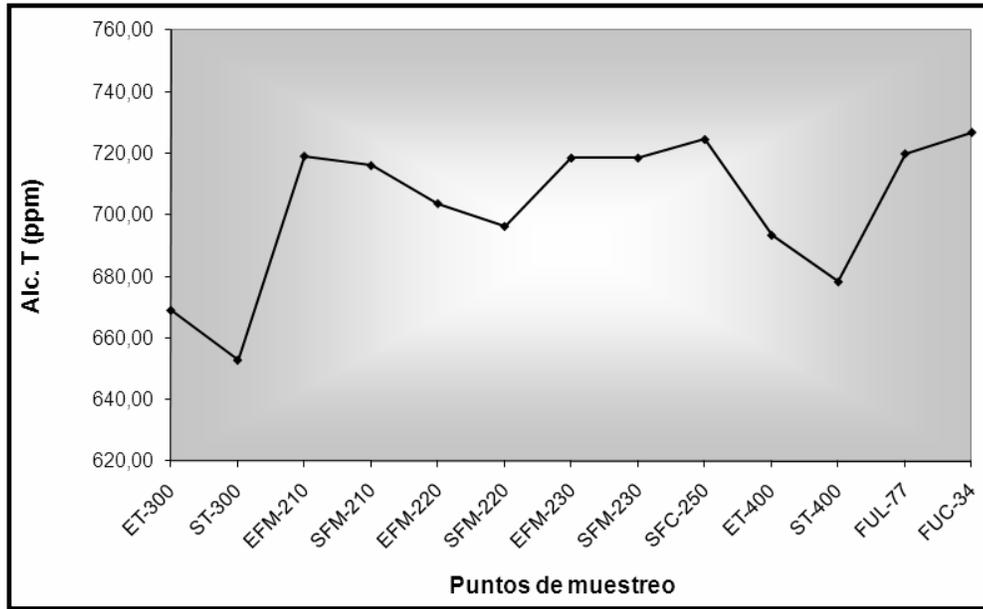


Figura 4.3. Comportamiento de la alcalinidad total durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

En la figura 4.4 se puede apreciar el comportamiento de la alcalinidad parcial, este parámetro cumple con la especificación siendo igual en la entrada y en salida, sin embargo pierde esa estabilidad en el durante el trayecto de la planta a los pozos inyectoras, lo cual puede ocasionar daños a la cara de la formación receptora.

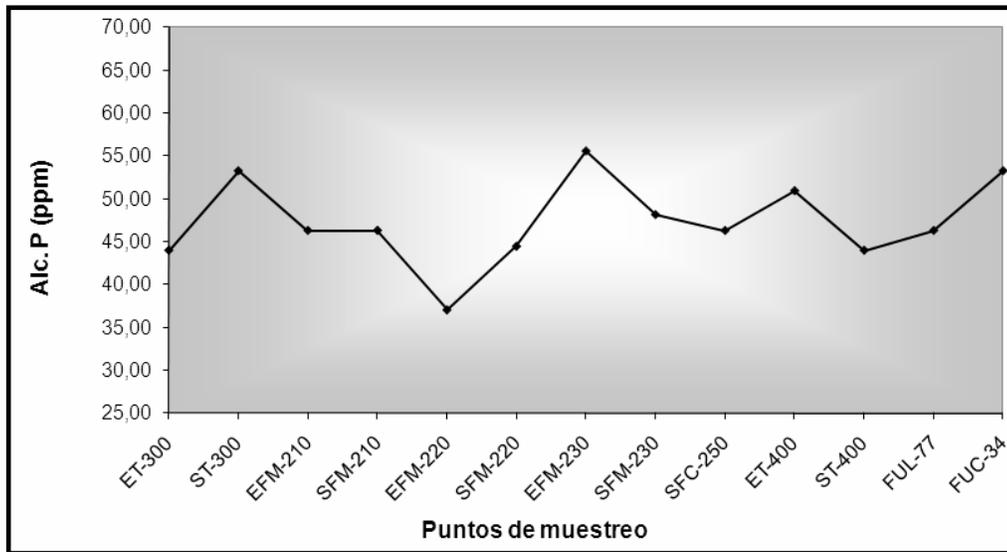
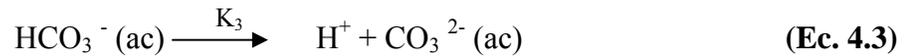
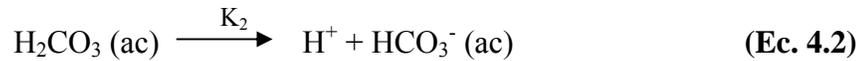


Figura 4.4. Comportamiento de la alcalinidad parcial durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

4. La dureza: es otro de los parámetros fisicoquímicos que tiene relevancia en el control de la calidad del agua, las condiciones de precipitación de estos iones dependerán de las condiciones de pH, presión y temperatura de proceso.

Para el caso de yacimientos con altas temperaturas se conoce que la calcita es la especie predominante, ya que termodinámicamente es la más estable, a continuación se presentan las ecuaciones tipo para la formación de CaCO_3 [13]:



Debido a que el ion bicarbonato tiene características anfóteras, una de las principales consecuencias de la existencia del sistema carbonato en el agua, radica en que le imparte a la misma una ligera capacidad buffer. Así, la cantidad o concentración del sistema carbonato en el agua determina su capacidad amortiguadora, mientras que la proporción entre los componentes de dicho sistema, dióxido de carbono, bicarbonato y carbonato, determinan su valor de pH, este último es el responsable de mantener al ion carbonato en equilibrio y así evitar su precipitación.

En la figura 4.5 correspondiente a la dureza total, se puede observar que este parámetro no permanece constante a lo largo del proceso de tratamiento e inyección, sin embargo el agua que sale presenta concentración similar a la de la entrada a planta Los Jabillos.

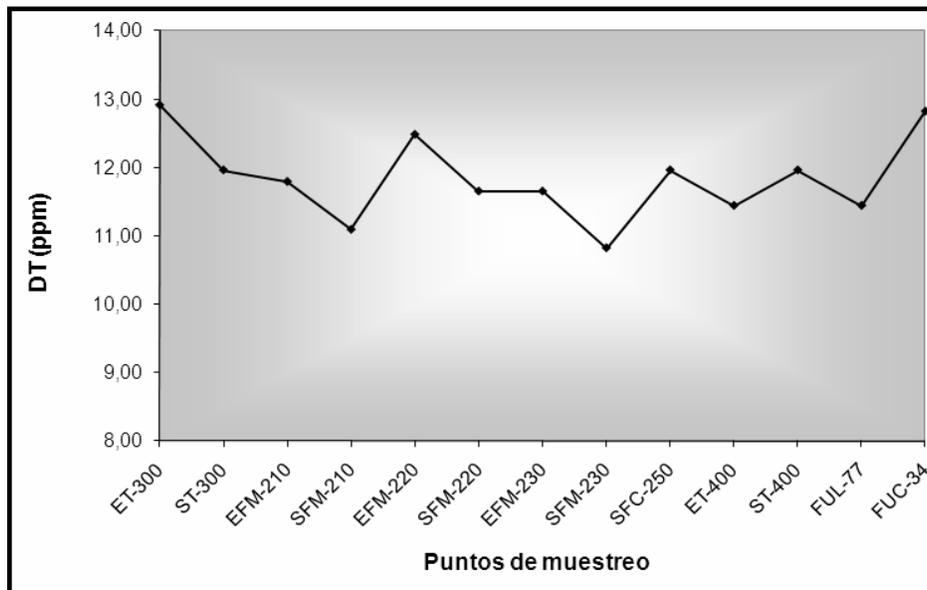


Figura 4.5. Comportamiento de la dureza total durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

El carbonato de calcio se forma cuando existen cambios en las condiciones del agua, como se puede observar en las figuras 4.5 a 4.7, correspondientes a la dureza total, cálcica y magnésica respectivamente, estos parámetros no permanecen constantes en los puntos de control de planta Los Jabillos, cabe destacar que la dureza es proporcional al pH, por tanto valores de pH mayores a 8,3 indican la presencia de iones carbonatos (CO_3^{-2}) y bicarbonatos (HCO_3^{-}) e iones hidróxidos (OH^{-}), este último favorece la inestabilidad del carbonato de calcio (CO_3^{-2}) en el agua, el cual es susceptible a cambios en las condiciones del agua, ocasionando la precipitación de estas sales inorgánicas ^[13].

Debido a que el pH del agua de la planta mantiene un valor promedio de 8,3, se puede apreciar que el comportamiento de la dureza total es similar al de la dureza cálcica y diferente al de la dureza magnésica, lo que permite suponer el dominio del sistema por parte del carbonato de calcio (CaCO_3), el cual puede causar el cambio en las propiedades petrofísicas de la roca del yacimiento tales como permeabilidad y porosidad.

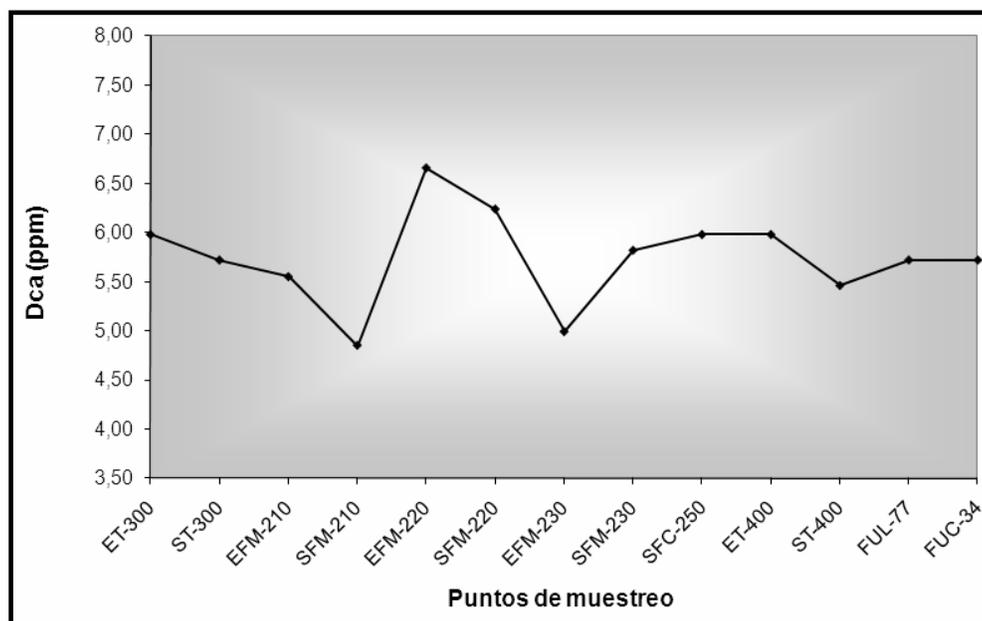


Figura 4.6. Comportamiento de la dureza cálcica durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

En la figura 4.7, se puede apreciar que la dureza magnésica del agua no se mantiene constante en los puntos de control, sin embargo sale de la planta bajo especificación, cabe destacar que las concentraciones de este parámetro son bajas, esto se debe a que el pH del agua favorece la formación de carbonatos en el agua, los cuales se encuentran en estado acuoso pero son susceptibles a precipitar si ocurre algún cambio en la temperatura o presión del sistema.

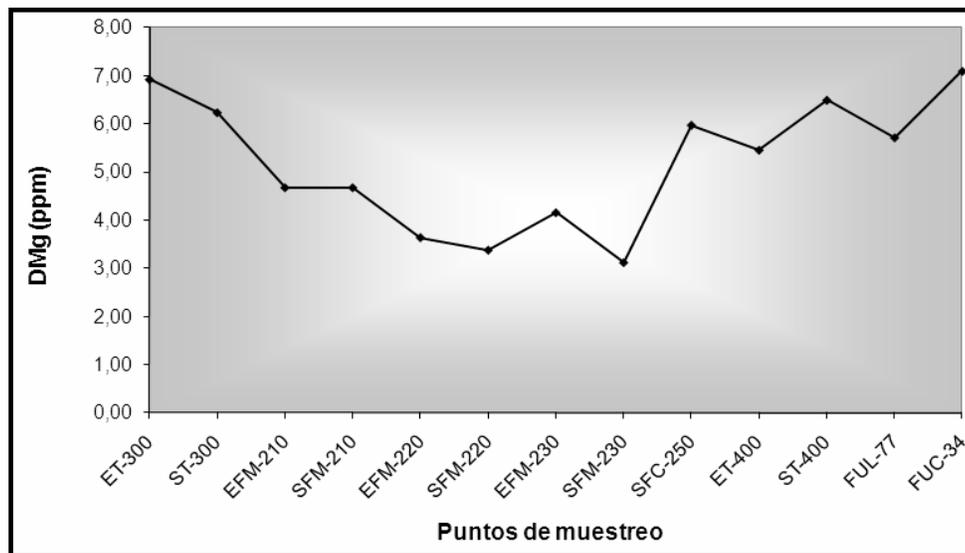


Figura 4.7. Comportamiento de la dureza magnésica durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

5. **El ion cloruro:** es otro de los parámetros fisicoquímicos que requiere control en la calidad del agua, en la figura 4.8, se observa que la concentración del ion cloruro mantiene su especificación de igual entrada a salida, sin embargo existen casos puntuales en los que su concentración varía, debido al ingreso del agua tratada con cloro al sistema de tratamiento, perteneciente a la fosa de efluentes de retrolavado de los filtros multilechos.

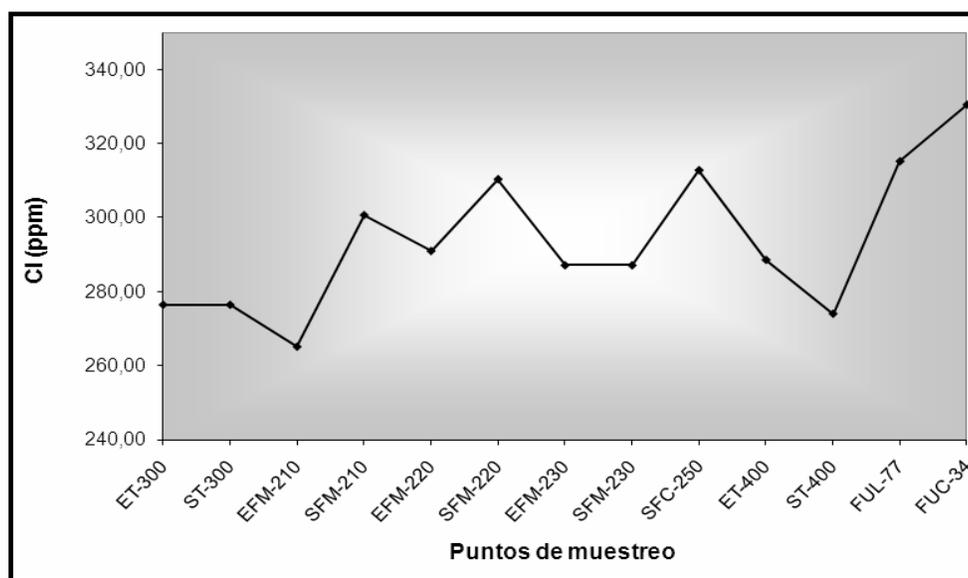


Figura 4.8. Comportamiento de la concentración de cloruros durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

6. El hierro total: es importante para el control de la calidad de agua, con un máximo permitido de 0,5 ppm. En la figura 4.9 se puede apreciar que la concentración del ion hierro, se mantiene aproximadamente constante en los puntos de control del proceso de tratamiento e inyección, también se puede observar que el hierro se encuentra en pequeñas proporciones, lo cual indica que está disuelto en forma ferrosa en el agua, sin embargo en el pozo inyector FUC-34, se aprecia un incremento en la concentración de este ion, causa por la cual es posible suponer la existencia de corrosión o picadura en el interior de la tubería de proceso, cabe destacar que el aumento de la concentración de hierro puede formar depósitos tanto en la tubería como en la cara de la formación, así como contribuir con el aumento de las bacterias sulfatoredutoras y turbidez del agua.

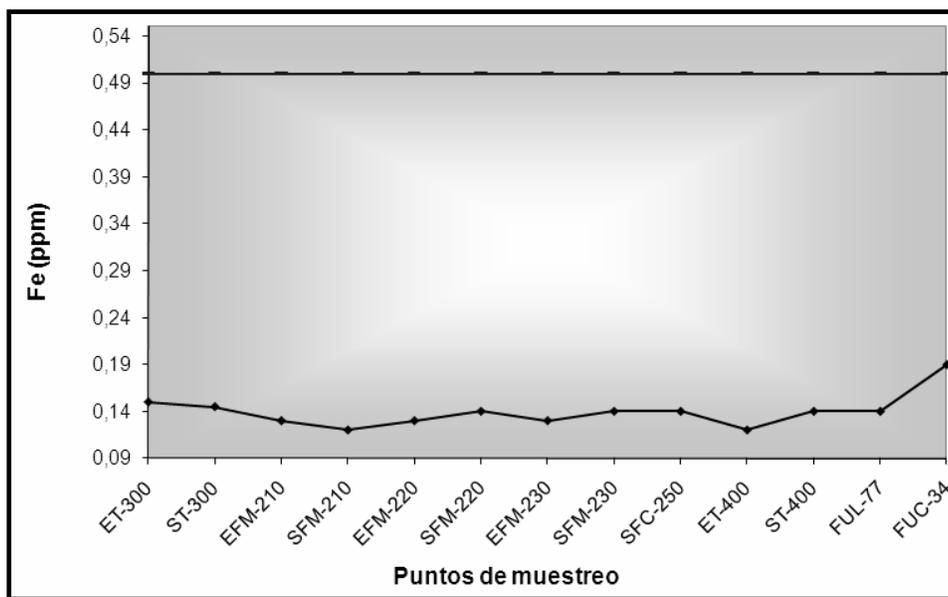


Figura 4.9. Comportamiento de la concentración de hierro durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

7. La turbidez: es uno de los parámetros a través del cual se controla la calidad del agua y tiene como máximo permitido una concentración de 0,5 NTU, como se puede observar en la figura 4.10 el estudio realizado en las distintas zonas de muestreo de planta Los Jabillos se determinó que el agua sale de la planta (ST-400) y se inyecta a los pozos inyectoras FUL-77 y FUC-34 presenta mayor turbidez que la que posee el agua al entrar al proceso de tratamiento e inyección. Esto se debe al alto contenido de sólidos y materia orgánica que se encuentra acumulada en el tanque estabilizador de agua tratada (T-400) producto de la deficiencia en el proceso de filtrado, las cuales son arrastradas hacia el yacimiento.

Este aumento en la concentración de la turbidez del agua, puede producir taponamiento en la formación receptora, lo cual disminuye el factor de reemplazo y la eficiencia de barrido en el yacimiento.

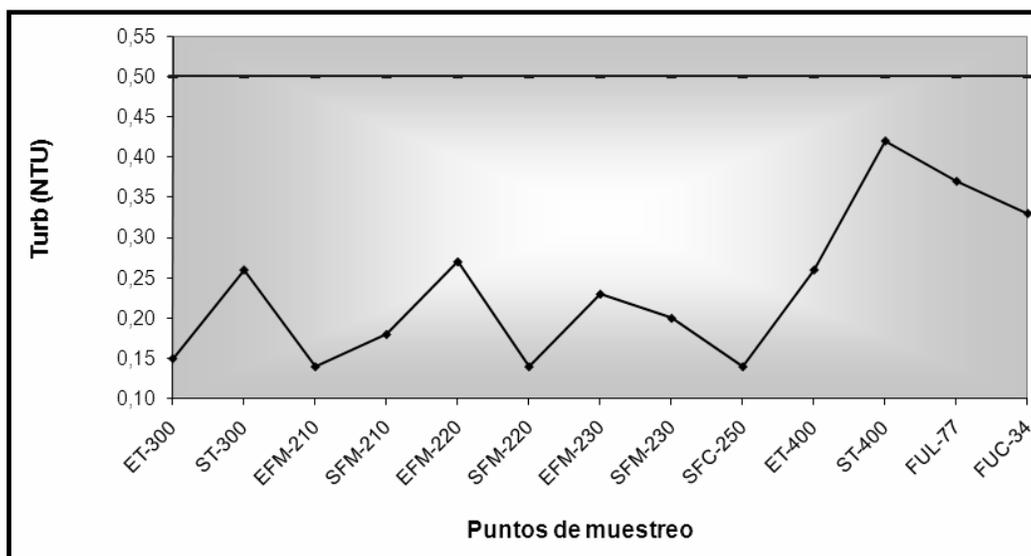


Figura 4.10. Comportamiento de la turbidez durante el proceso de tratamiento e inyección de agua

4.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE INYECCIÓN

Los sólidos suspendidos son parámetros fisicoquímicos que determinan la calidad del agua para inyección. El análisis del comportamiento de esta variable permite conocer la eficiencia del proceso en cuanto a la remoción de sólidos a fin de garantizar que el agua cumpla con las especificaciones exigidas por el yacimiento.

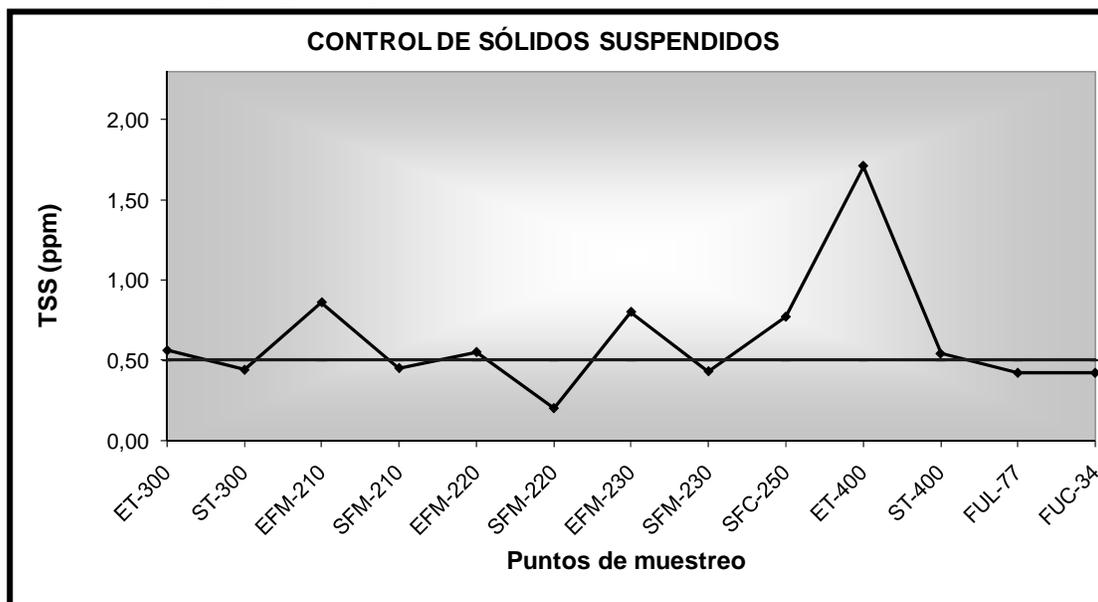


Figura 4.11. Comportamiento de los sólidos totales suspendidos durante el proceso de filtración de agua

Como se puede apreciar en la figura 4.11, los sólidos suspendidos durante el proceso de tratamiento, se encuentran fuera de especificación, esto debido al mal funcionamiento del proceso de filtrado el cual ocasiona la diferencia de sólidos que entran (ET-400) y salen (ST-400) del tanque estabilizador de agua tratada, este hecho permite suponer la acumulación de sólidos en el interior del tanque, por ende al existir modificación en el caudal manejado por la planta aumentará la concentración de sólidos consecuencia de la turbulencia generada en el tanque.

Tabla 4.3. Eficiencia de los equipos de filtración de planta Los Jabillos

Filtro	Entrada (ppm)	Salida (ppm)	Acumulado (ppm)	% Eficiencia
210	0,86	0,45	0,41	47,67
220	0,55	0,20	0,35	63,64
230	0,80	0,43	0,37	46,25

Los equipos de filtración son la etapa mas importante durante el tratamiento del agua para inyección, la eficiencia de cada filtro en general debe oscilar entre 90 y 100 % para poder cumplir a cabalidad con el proceso de remoción de sólidos.

En la tabla 4.3 se presenta la eficiencia de los filtros multilechos 210, 220 y 230 la cual es baja con respecto al funcionamiento real que deben de tener los filtros para remover sólidos.

La deficiencia que tienen los filtros multilecho se debe a la antigüedad que tienen estos equipos y al desgaste que han sufrido los lechos durante el tiempo, cabe destacar que estos lechos no han sido reemplazados sino completados por tope desde la instalación de la planta (1998). El hecho de completar los lechos continuamente no permite monitorear con eficacia los filtros debido a que se altera el arreglo original de los lechos y se permite el paso de partículas sólidas suspendidas de mayor diámetro las cuales pasarán a la siguiente etapa de filtración, por ende el filtro no reportará valores de caída de presión aproximados a los 25 psi.

Adicional a esto el empleo de cartuchos convencionales en el filtro de cartucho, el cual no cumple con las características del cartucho original y posiblemente tiene deficiencia en corregir la falla en el funcionamiento de la primera etapa de filtración, por lo que las partículas sólidas atravesaran con mayor facilidad al tanque estabilizador de agua tratada, de los cuales posiblemente cierta cantidad sedimentará en el tanque y otra cantidad pasará al yacimiento y producirá taponamiento en la formación receptora, lo cual disminuye la porosidad y por ende la permeabilidad de la roca.

4.3 ESTABLECIMIENTO DE SOLUCIONES DE CARÁCTER FÍSICAS Y/O QUÍMICAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA DE INYECCIÓN EMPLEADA EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE PLANTA LOS JABILLOS EN EL YACIMIENTO K FUC 1

Durante el proceso de Recuperación Secundaria se requiere mantener la compatibilidad entre el fluido de inyección y roca del yacimiento, para ello es necesario que el agua cumpla con ciertos parámetros de calidad exigidos por el yacimiento. Mantener esta compatibilidad permitirá disminuir el daño a la formación receptora, aumentar el factor de recobro así como realizar un barrido eficiente de las reservas de petróleo. Planta Los Jabillos presenta

dificultades en garantizar algunos de esos parámetros, por tanto para mejorar el proceso de tratamiento e inyección se plantean las siguientes soluciones:

4.3.1 Reemplazar los filtros multilechos

En la primera etapa de filtración (filtros multilecho), se descarga agua cruda la cual proviene del acuífero de la Formación Las Piedras a un caudal promedio de 7.949 m³/día (50.000 BPD) a una presión máxima de 5 kg./cm² (70 psig), cada filtro operara un caudal de 3.975 m³/día (25.000 BPD c/u).

La primera etapa de filtración consta de tres filtros que poseen las mismas características de diseño, de los cuales dos se encuentran en operación continua y el tercero fuera de operación para entrar en funcionamiento al momento que se ponga fuera de operación algunos de los anteriores.

Se desea alcanzar la especificación con respecto a la reducción de sólidos suspendidos desde 1,5 mg/L (ppm) a 0,2 mg/L (ppm) máximo y una distribución de un 99 % de partículas con un tamaño menor de 2 micrones, estos filtros son presurizados de lechos múltiples operados a alto flujo descendente (entrada por el tope), cada filtro contendrá tres capas o medios filtrantes ^[16].

4.3.1.1 Especificaciones de los lechos o medios filtrantes

Características del lecho ^[16]:

- Primera capa o capa superior de antracita con espesor de 46 cm (18 pulgadas) y granulometría entre 0,8 y 0,9 mm.
- Segunda capa o capa intermedia silícea (Garnet) con un espesor de 46 cm (18 pulgadas) y granulometría de 30 a 40 Mesh.
- Tercera capa o capa inferior, similar a la segunda con espesor de 33 cm (13 pulgadas) y granulometría de 8 a 10 Mesh.

4.3.2 Reemplazar los filtros de cartucho

La segunda etapa de filtrado o pulidor se hará mediante filtros de tipo cartucho los cuales se encargaran de corregir la eventual deficiencia operacional de la primera etapa de filtración, esta etapa consta de dos filtros los cuales manejan un caudal promedio de 7.949 m³/día (50.000 BPD c/u), de los cuales estará uno en funcionamiento y el otro fuera de operación para entran en funcionamiento al momento de realizarle mantenimiento al anterior, este filtro requiere 104 elementos internos ^[16].

4.3.2.1 Características de los cartucho o elementos filtrantes

Especificaciones del cartucho o elemento filtrante ^[16]:

Elementos pezo de filtración profunda fabricados con medio filtrante de poliester-phenolic, mediante un proceso único de trenzado que proporciona densidad uniforme a través de todo el cartucho, controlada radial y concéntricamente, de esta forma los contaminantes son atrapados no sólo en la superficie del cartucho, sino a través de todo el espesor del medio filtrante, creando así un elemento confiable con gran capacidad de retención para mayor duración. Este elemento tiene gran compatibilidad química y habilidad para filtrar amplios rangos de viscosidad en fluidos.

- Características de construcción: elemento construido en forma continúa evitando así la posibilidad de un by-pass por empalme de secciones. El elemento es autosoportado y diseñado para mayor duración y rendimiento
- Material: fibras de poliéster / celulosa, impregnadas en resina fenolica. Las fibras y resinas empleadas en la fabricación son químicamente compatibles con un amplio rango de fluidos y gases.
- Temperaturas de operación: hasta 250 F (121 C)
- Micronajes: desde 2 hasta 125 micrones
- Longitudes disponibles: 9-3/4", 10", 29-1/4", 30", 40".

4.3.3 Realizar mantenimiento general en la planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos

El mantenimiento a las instalaciones de planta Los Jabillos, tiene como finalidad eliminar todas las partículas sólidas acumuladas en los tanques y líneas de flujo (tuberías), así como realizar el reemplazo de los lechos y cartuchos de los equipos de filtración.

Realizar el mantenimiento permitirá realizar un arranque óptimo de la planta y mantendrá bajo especificación el agua que se inyectará al yacimiento K FUC 1.

Este mantenimiento incluye:

- Lavado de tanques de agua cruda (T-300) y de agua tratada (T-400)
- Limpieza de tuberías de proceso
- Cambio de lechos de filtros multilecho
- Reemplazo de elementos filtrantes del filtro de cartucho

De existir problemas en la adquisición de los filtros multilechos y cartucho, se podrían reemplazar los lechos para el caso de los filtros multilecho y los cartuchos para los filtros de cartucho, las especificaciones técnicas correspondientes a los mismos se describen en los numerales 4.3.1.1 y 4.3.2.1.

La finalidad de estas soluciones es de llevar el agua a especificación para garantizar la recuperación secundaria de crudo, cumplir con el compromiso nacional y no dañar al yacimiento.

4.4 PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO DE COSTOS DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE PLANTA LOS JABILLOS

El estudio de costo se basó en la adquisición de dos filtros multilecho y uno de cartucho, para ello se toma como parámetros de estimación los costos asociados con la ingeniería, procura y gestión por parte del personal de la Gerencia de Ingeniería de Costos de PDVSA.

Con base a este análisis se determinó el monto de recursos no reembolsables y crediticios para el proyecto, así como el impacto que el mismo tendría sobre el ambiente. Los resultados del análisis se presentaron en la tabla 4.4 se expresan los costos asociados al equipo adquirido y entregado con precios actualizados a la tasa de cambio (4.30 Bs. /US\$) correspondientes al mes de octubre de 2010.

Tabla 4.4. Costos asociados al mejoramiento de P.I.A. Los Jabillos

TOTALES	H-H	Bs.	Bs. EQUIVALENTES
PROCURA		22.257.833,07	22.257.833,07
CONSTRUCCIÓN	0,00	0,00	0,00
GESTIÓN	4.274,00	667.734,00	667.734,00
CONTINGENCIA (15%)	641,00	3.438.836,00	3.438.836,00
TOTAL	4.915,00	26.364.403,07	26.364.403,07

En la tabla 4.5, se muestra los porcentajes y costos asociados a este proyecto, sin embargo existen costos que no aplican a este proyecto debido a que estos filtros están destinados a reemplazar los que actualmente están operando en P.I.A. Los Jabillos.

Tabla 4.5. Factores relativos de estimación de inversión de capital para los diversos rubros basados en el costo de los equipos entregados ^[16]

RUBROS	PORCENTAJE DE COSTO DEL EQUIPO ENTREGADO PARA PROCESAR	
	FLUIDOS	COSTO Bs.
COSTOS DIRECTOS		
Equipo adquirido y entregado	100	26.364.403,07
Instalación del equipo adquirido	20	5.272.880,61
Instrumentación y controles	15	3.954.660,46
Cañería y tuberías	N/A	N/A
Instalaciones eléctricas	N/A	N/A
Obras civiles	N/A	N/A
Mejoras del terreno	N/A	N/A
Instalaciones de servicios	N/A	N/A
Terreno	N/A	N/A
COSTO DIRECTO TOTAL DE LA PLANTA	135	35.591.944,14
COSTOS INDIRECTOS		
Ingeniería y supervisión	10	3.559.194,41
Gastos de construcción	N/A	N/A
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS	145	39.151.138,55
Honorarios de contratistas	N/A	N/A
Eventuales	5	1.957.556,92
Inversión de capital fijo	N/A	N/A
Capital de trabajo	N/A	N/A
INVERSIÓN TOTAL DE CAPITAL	150	41.108.695,47

Como se puede apreciar en la tabla 4.5 los gastos directos asociados a cañerías y tuberías, instalaciones eléctricas, obras civiles, mejoras del terreno, instalaciones de servicio, terreno; gastos indirectos de construcción, honorarios de contratista, inversión de capital fijo y capital de trabajo no aplican a este proyecto debido a que los filtros que se adquirirán tendrán las mismas características de diseño a los que la planta posee.

Estos filtros garantizarán la calidad del agua que es tratada en la planta de inyección de agua Los Jabillos a fin de mejorar el proceso de tratamiento y ayudar a la recuperación secundaria de petróleo a fin de incrementar la extracción de dicho fluido y evitar daños a la formación receptora.

Por este motivo el proyecto cumple con la definición de desarrollo sustentable que maneja PDVSA: “Un desarrollo económico y social basado en la conservación y protección del ambiente y el uso racional de los recursos naturales”, pero considerando las necesidades actuales y futuras, así como los impactos presentes y futuros de las actividades humanas e industriales.

4.5 CONCLUSIONES

1. La evaluación realizada en planta Los Jabillos permitió conocer las fallas que tiene el sistema de tratamiento e inyección, a fin de mejorar el proceso y garantizar la calidad que requiere el agua para la inyección en yacimiento K FUC 1.
2. Los parámetros alcalinidad parcial y total, dureza total, cálcica y magnésica, pH, hierro, turbidez e iones cloruro se encuentran bajo la especificación requerida por la Gerencia de Yacimientos.
3. El sistema de tratamiento de planta Los Jabillos presenta dificultades en garantizar la remoción de los sólidos suspendidos presentes en el agua para inyección.
4. La eficiencia a la cual están operando los filtros de P.I.A Los Jabillos, es baja (52,52% promedio), por lo que los equipos no garantizan la especificación requerida para la inyección de agua.
5. Se requiere reemplazar los lechos y cartuchos de los filtros y realizar mantenimiento a la planta Los Jabillos con la finalidad de mejorar la calidad del agua de inyección, minimizar el daño a la formación y mantener la explotación racional de crudo.
6. Reemplazar los filtros multilecho y de cartucho de P.I.A. Los Jabillos tiene un valor de 41.108.695,47 Bs.

4.5 RECOMENDACIONES

1. Estudiar la presencia de oxígeno disuelto y de bacterias sulfato reductoras en el agua de la planta de tratamiento e inyección Los Jabillos.
2. Medir el tamaño de partículas sólidas y el nivel de corrosión en los puntos de control presentes en el proceso de tratamiento e inyección.
3. Incorporar los parámetros sólidos totales disueltos y conductividad en las especificaciones requeridas por la Gerencia de Yacimientos en el proceso de tratamiento e inyección de agua.
4. Analizar las causas de la pérdida de lecho de los filtros multilecho, ya que ésta es una de las causas de la disminución de la eficiencia del sistema de filtrado.
5. Incorporar en los reportes de laboratorio los errores cometidos durante la medición de los parámetros de control de calidad del agua con la finalidad de verificar la variación o similitud de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Tineo, A.**, “Evaluación de la corrosión en la red de inyección de agua al yacimiento Naricual con la finalidad de mantener la confiabilidad operacional en las plantas RESOR/SAEN PDVSA”. **Tesis de grado, Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Puerto Ordaz (2002).**
2. **Méndez, B.**, “Evaluación del proceso de filtración de la planta SAEN ubicada en Jusepín de PDVSA”. **Trabajo de grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Puerto La Cruz. (2002).**
3. **GERENCIA DE PLANTAS DE GAS Y AGUA**, “Resultados de gestión enero – septiembre 2008”. **Maturín, Venezuela (2008).**
4. **GERENCIA DE PLANTAS DE GAS Y AGUA**, “Resultados de gestión enero – octubre 2008”. **Maturín, Venezuela (2008).**
5. Barrera, J., “**Necesidad de ajuste el pH del agua de inyección al yacimiento K FUC 1 con la finalidad de disminuir la precipitación de CaCO₃ del medio poroso**”. Nota técnica, PDVSA, Maturín (2008).
6. **GERENCIA DE YACIMIENTOS**, “**Estudio geológico de las Formaciones productoras de hidrocarburos del campo El Furrial**”. Maturín, Venezuela. (1997).
7. **TIVENCA**, “**Ingeniería del proyecto, planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos**”. Maturín (1996).
8. **NALCO**, “**Manual técnico del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones**”. Tomo I, II, III: Editorial McGraw-Hill, Inc. (1989).
9. Maderev, L., “**Principios de hidrogeografía estudio del ciclo hidrológico**”, Serie Textos Universitarios, primera edición, México (2005).
10. **HIDRITEC**, “**Parámetros de caracterización del agua**”, 2009, Disponible en: <http://www.hidritec.com/doc-parametros1.htm>.
11. **Lipesa**, “Tratamiento químico del agua”. **Ediciones Impregraf, Caracas (1998).**
12. **PDVSA CIED**, “**Básico de corrosión**”. Maturín (2000).
13. Lane, R., “**Control de incrustaciones y corrosión en instalaciones hidráulicas de edificios**”. Editorial McGraw-Hill, México (1995).
14. **Mc. Cabe, W y Smith J.**, “Operaciones unitarias en ingeniería química”, **Editorial McGraw-Hill, Cuarta Edición, Barcelona-España (1998).**

15. TIVENCA y Veneagua, **“Manual de operación. Ingeniería, procura y construcción de planta de tratamiento de aguas Los Jabillos”**, Tomos I y II, Maturín (2001).
16. Timmerhaus K y Peters M., **“Diseño de plantas y economía para ingenieros químicos”**, Editorial McGraw-Hill, Tercera Edición, USA (1993).
17. COVENIN, **“Técnicas de muestreo”**, Caracas (2001)
18. COVENIN, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de alcalinidad”**, Caracas (2002)
19. COVENIN, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de dureza”**, Caracas (1991)
20. COVENIN, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de cloruro”**, Caracas (1995)
21. COVENIN, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de sólidos”**, Caracas (1987)
22. COVENIN, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de pH”**, Caracas (2002)
23. COVENIN, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de turbidez”**, Caracas (2002)
24. COVENIN, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica”**, Caracas (1991)
25. PDVSA Jusepín **“Carpeta de control de calidad de planta de tratamiento de aguas”**, Maturín (2009).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO EN P.I.A. LOS JABILLOS ASOCIADA A LA RECUPERACIÓN SECUNDARIA EN EL YACIMIENTO K FUC1”
SUBTÍTULO	

AUTOR:

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLCA / E-MAIL
BOLÍVAR ARENAS, JULIO ANTONIO	CVLAC: V-18.854.205 e-mail: 6@gmail.com

PALABRAS O FRASES CLAVES:SISTEMA DE TRATAMIENTO,FILTROS MULTILECHOS,FILTROS DE CARTUCHO,CORROSIÓN,INCRUSTACIÓN,

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En el presente trabajo se realizó una evaluación del sistema de tratamiento de la planta de inyección de agua Los Jabillos con la finalidad de verificar la calidad del agua de inyección y garantizar la continuidad operacional de la planta, minimizar el daño a la formación por depósitos inorgánicos (incrustaciones y/o escamas), y a su vez garantizar la eficiencia de barrido de las reservas y el factor de recobro en el yacimiento. Con este fin se compararon los parámetros fisicoquímicos de la planta de tratamiento e inyección de agua Los Jabillos con las especificaciones requeridas por la Gerencia de Yacimientos para analizar básicamente la calidad del agua que se está inyectando al yacimiento, de este análisis se determinó que la concentración de sólidos suspendidos se encuentra fuera de especificación. Seguidamente se realizó un balance de masa en función de los sólidos suspendidos para estudiar la eficiencia de los equipos de filtración que interactúan en la planta donde se determinó que la primera etapa (filtros multilecho) tiene una eficiencia de 52,52 % promedio, lo cual revela el mal funcionamiento de estos equipos, una vez obtenida las principales causas por la cual la planta presenta dificultades para llevar a especificación el agua de inyección se establecieron soluciones de carácter físico las cuales consisten en reemplazar los lechos de los filtros multilechos, emplear los cartuchos originales del filtro de cartucho así como realizar mantenimiento a las líneas de flujo y a la planta Los Jabillos, aplicar estas soluciones permitirá reducir la concentración de sólidos suspendidos en el agua, lo cual reducirá la turbidez del agua, pH, el taponamiento de los yacimientos; adicionalmente se evitará la caída de presión en el cabezal y disminuirá la precipitación de sales orgánicas de origen cálcico tanto en las líneas de flujo como en la cara de la formación receptora. Posterior a estos análisis se realizó el estudio de costos de clase V referente a las soluciones propuestas para el mejoramiento de la calidad de agua tomándose en cuenta la procura, gestión y contingencia (15 %) en la adquisición y entrega de los equipos anudado a los costos directos e indirectos requerido para la puesta en funcionamiento de los equipos, resultó un costo de trabajo a realizar de 41.108.695,47 Bs. basándose en un horizonte económico de 5 años.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Patiño, Rayda	ROL	CA	AS(X)	TU	JU
	CVLAC:	11.833.699			
	e-mail:	raydapatino@gmail.com			
	e-mail:				
Millán, Maritza	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:	4.009.400			
	e-mail:	mjmillansi@gmail.com			
	e-mail:				
Amundarain, Milena	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:	3.945.689			
	e-mail:	milena.amundarain@gmail.com			
	e-mail:				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

12	08	10
----	----	----

LENGUAJE: SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Eval. Sis. Tra. e Iny. Agua Los Jabillos....doc	Application/msWord

CARACTERES PERMITIDOS EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 _ -.

ALCANCE:

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO QUÍMICO

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PRE-GRADO

ÁREA DE ESTUDIO:

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE – NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de trabajos de grado: "Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario."

JULIO A. BOLÍVAR A.

AUTOR

Ing. Quím. Rayda Patiño, MSc.

TUTOR

Ing. Quím. Maritza Millán Silva, MSc.

JURADO

Ing. Quím. Milena Amundarain, MSc.

JURADO

Ing. Quím. Yraida Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS