

**EVALUACIÓN DE UNA PRUEBA TECNOLÓGICA DE UN SISTEMA DE  
REMOCIÓN DE FENOLES MEDIANTE DIÓXIDO DE CLORO PARA EL  
TRATAMIENTO EN EL AGUA DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS  
1 DE ECOPETROL S.A.**

**SANDRA PAOLA URREGO ENRIQUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2014**

**EVALUACIÓN DE UNA PRUEBA TECNOLÓGICA DE UN SISTEMA DE  
REMOCIÓN DE FENOLES MEDIANTE DIÓXIDO DE CLORO PARA EL  
TRATAMIENTO EN EL AGUA DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS  
1 DE ECOPETROL S.A.**

**SANDRA PAOLA URREGO ENRIQUEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Especialista en Producción de Hidrocarburos**

**Director**

**MSc. Jorge Enrique Forero Sanabria**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2014**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	15
1. GENERALIDADES DE LAS DIFERENTES TÉCNICAS DE TRATAMIENTO UTILIZADAS PARA LA REMOCIÓN DE FENOLES EN AGUAS.	16
1.1 DESCRIPCIÓN DEL FENOL	16
1.1.1 Propiedades Físicas y Químicas.	17
1.1.2 Efectos generados por el Fenol.	18
1.1.3 Efectos del Fenol en el medio ambiente.	21
1.1.4 Fuentes de generación de Fenoles.	22
1.2 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE FENOLES.	23
1.2.1 Extracción.	23
1.2.2 Adsorción.	24
1.2.3 Intercambio Iónico.	25
1.2.4 Oligomerización enzimática.	26
1.2.5 Oxidación con agua supercrítica.	26
1.2.6 Oxidación con aire húmedo.	27
1.2.7 Biodegradación.	27
1.2.8 Incineración.	28
1.2.9 Tratamiento electroquímico.	28
1.2.10 Procesos avanzados de Oxidación.	28
1.2.11 Oxidantes químicos para remoción de Fenoles.	31
1.2.12 Formación de subproductos de la oxidación y desinfección.	33
1.2.13 Factores que influyen en la formación de subproductos.	38
1.2.14 Tecnologías Avanzadas de Oxidación.	43
2. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO CASTILLA Y DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS 1.	47
2.1 CAMPO CASTILLA	47
2.1.1 Evaluación estructural.	49
2.1.2 Descripción del modelo y columna estratigráfica del área.	49
2.1.3 Propiedades del petróleo.	50
2.1.4 Mecanismo de producción.	50
2.1.5 Generalidades del campo.	51

2.2 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS 1.	52
2.2.1 Descripción general de los equipos del sistema de tratamiento de aguas de producción (STAP 1) de la estación Acacias 1.	54
2.2.2 Filosofía de operación del Sistema de Tratamiento Aguas de Producción STAP 1.	57
3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REMOCIÓN DE FENOLES CON DIÓXIDO DE CLORO IMPLEMENTADO EN LA ESTACIÓN ACACIAS 1	65
3.1 DESCRIPCIÓN DEL DIÓXIDO DE CLORO	65
3.1.1 Efectos potenciales para la salud por la exposición al gas de Dióxido de Cloro.	70
3.1.2 Almacenamiento y manipulación.	71
3.2 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO COMERCIAL UTILIZADO EN LA PRUEBA TECNOLÓGICA	71
3.3 GENERADOR DE DIÓXIDO DE CLORO	72
3.4 UBICACIÓN DE LA PRUEBA	76
3.5 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRUEBA DE REMOCIÓN DE FENOLES CON DIÓXIDO DE CLORO	78
3.6 PROCEDIMIENTO PARA LA PUESTA EN MARCHA DE LA PRUEBA	82
3.6.1 Alinear flujo de prueba.	82
3.6.2 Habilitar el flujo de agua motivante.	83
3.6.3 Alinear corriente de solución de Dióxido de Cloro.	85
3.6.4 Encender el generador.	87
3.6.5 Descripción del proceso.	88
4. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA TECNOLÓGICA DE REMOCIÓN DE FENOLES CON DIÓXIDO DE CLORO	90
4.1 RESULTADOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DEL CAMPO CASTILLA	92
4.2 GENERALIDADES DE LA PRUEBA	93
4.2.1 Métodos analíticos.	93
4.3 OXIDACIÓN CON DIÓXIDO DE CLORO	94
4.4 ESTEQUIOMETRIA DE LA REACCIÓN PARA LA PRUEBA	96
4.5 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE FENOLES REALIZADOS DURANTE LAS PRUEBAS	97
4.6 EFECTOS DE LA APLICACIÓN DEL DIÓXIDO DE CLORO EN ACEITES Y GRASAS	103

4.7 EFECTOS DEL PH EN LA REMOCIÓN DE FENOLES Y DOSIFICACIÓN DE DIÓXIDO DE CLORO	106
4.8 RESIDUAL DE DIÓXIDO DE CLORO	108
4.9 COSTOS GENERALES DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA	111
5. CONCLUSIONES	114
6. RECOMENDACIONES	116
BIBLIOGRAFIA	118

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura del Fenol.....	17
Figura 2. Subproductos químicos de algunos desinfectantes.....	34
Figura 3. Panorámica estación Acacias 1.....	52
Figura 4. Sistema de tratamiento aguas de producción estación Acacias 1.....	53
Figura 5. Secciones de las celdas de placas corrugadas.....	55
Figura 6. Celdas de placas corrugas y celdas de flotación STAP 1.....	58
Figura 7. Línea de entrada a foso de distribución.....	60
Figura 8. Filtro cascara de nuez STAP 1.....	60
Figura 9. Decantadores sistema de tratamiento de aguas de producción STAP 1. .....	62
Figura 10. Primera piscina de aspersion STAP 1.....	63
Figura 11. Secciones piscina de estabilización de la estación Acacias 1.....	63
Figura 12. Generador utilizado en la prueba para producir Dióxido de Cloro.....	74
Figura 13. Fluxograma del generador utilizado en la prueba para producir Dióxido de Cloro.....	74
Figura 14. Piscina de aspersion ABA 7361 perteneciente a STAP 1.....	76
Figura 15. Bomba aspersion AP7361A correspondiente a piscina de aspersion ABA7361 del STAP 1 antes de su intervención.....	77
Figura 16. Bomba aspersion AP7361A correspondiente a piscina de aspersion ABA7361 del STAP 1 después de su intervención para la prueba.....	77
Figura 17. Diagrama general de la prueba.....	80
Figura 18. Alineación de agua a tratar en la prueba y movimiento de válvulas.....	82
Figura 19. Alineación agua motivante hacia generador.....	83
Figura 20. Filtro de arena para agua motivante.....	84
Figura 21. Alineación solución de Dióxido de Cloro hacia agua de producción.....	85
Figura 22. Punto de inyección de solución de Dióxido de Cloro en agua de producción.....	86
Figura 23. Panel de control del generador utilizado en la prueba de campo.....	87
Figura 24. Flujos en generador de Dióxido de Cloro.....	88
Figura 25. Tanque de reacción de agua de producción con solución de Dióxido de Cloro.....	89
Figura 26. Vista panorámica piscina de aspersion estación Castilla 2.....	90
Figura 27. Piscina de aspersion ABA7362 estación Acacias 1.....	91
Figura 28. Corrosión en bombas centrifugas de las piscinas de aspersion.....	91
Figura 29. Compuestos formados en el proceso de oxidación del Fenol.....	95

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades físicas del Fenol .....	17
Tabla 2. Potenciales redox de agentes oxidantes.....	29
Tabla 3. Ventajas y desventajas generales de los oxidantes más comúnmente utilizados para el tratamiento de aguas. ....	30
Tabla 4. Comparación de Oxidantes.....	32
Tabla 5. Tecnologías Avanzadas de Oxidación. ....	44
Tabla 6. Propiedades de los fluidos por Yacimientos del Campo Castilla. ....	50
Tabla 7. Capacidades Tratamiento Estaciones.....	51
Tabla 8. Equipos Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción STAP 1. ....	53
Tabla 9. Listado de equipos para la prueba.....	78
Tabla 10. Resultados Análisis Fisicoquímicos de las Aguas residuales Industriales del Campo Castilla primer trimestre de 2013. ....	92
Tabla 11. Resultados de la concentración de Fenol en los puntos de entrada a aspersión y salidas después de aplicar el Dióxido de Cloro. ....	97
Tabla 12. Resultados promedio de la concentración de Fenol en los puntos de entrada y salida de aspersión y salidas después de aplicar el Dióxido de Cloro. ...	99
Tabla 13. Porcentajes promedio de eficiencia de remoción de Fenol por rangos. ....	102
Tabla 14. Resultados de la concentración de aceite en los puntos de entrada a aspersión y salidas después de aplicar el Dióxido de Cloro. ....	103
Tabla 15. Resultados promedio diarios de porcentajes de remoción y concentración de aceite residual pre y post aplicación de Dióxido de Cloro. ....	104
Tabla 16. Resultados del pH pre y post aplicación de Dióxido de Cloro. ....	106
Tabla 17. Porcentajes promedio de remoción de los Fenoles a las salidas con Dióxido de Cloro y promedio de los pH pre y post aplicación de Dióxido de Cloro .....	107
Tabla 18. Porcentaje promedio de reducción de pH en salidas pre tanque y tanque de reacción con Dióxido de Cloro. ....	107
Tabla 19. Residual de Dióxido de Cloro en el agua de producción, inmediatamente después de su dosificación. ....	108
Tabla 20. Residual de Dióxido de Cloro 5 min. después de su dosificación. ....	109
Tabla 21. Residual de Dióxido de Cloro en agua de producción con dosificación de 6 ppm de ClO <sub>2</sub> . ....	110
Tabla 22. Bases de cálculo.....	111
Tabla 23. Volúmenes de químicos requeridos para tratar 50000 BWPD.....	112
Tabla 24. Costos generales. ....	112

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Incineración del Fenol. ....	28
Ecuación 2. Reacción de Dióxido de Cloro. ....	38
Ecuación 3. Reacción de Dióxido de Cloro para producir clorito y clorato. ....	38
Ecuación 4. Reacción global de la Fotocatálisis Heterogénea. ....	45
Ecuación 5. Reacción del Clorito de Sodio con Cloro Gaseoso para producir Dióxido de Cloro. ....	66
Ecuación 6. Reacción del Clorito de Sodio con Ácido Hipocloroso para producir Dióxido de Cloro. ....	66
Ecuación 7. Formación de Clorato. ....	66
Ecuación 8. Acidificación de una solución de Clorito de Sodio. ....	66
Ecuación 9. Formación de Clorito y Clorato. ....	66
Ecuación 10. Reacción de Dióxido de Cloro con Ácido hipocloroso que produce niveles bajos de Dióxido de Cloro. ....	67
Ecuación 11. Reacción de Dióxido de Cloro con Ácido hipocloroso que produce bajos niveles de clorato. ....	68
Ecuación 12. Sistema de tres componentes para generar Dióxido de Cloro. ....	68
Ecuación 13. Reacción para producir Dióxido de Cloro a partir de Clorato de Sodio, Peróxido de Hidrógeno y Ácido Sulfúrico. ....	72
Ecuación 14. Reacción del Fenol con $\text{ClO}_2$ a $\text{pH} < 10$ . ....	94
Ecuación 15. Reacción del Fenol con $\text{ClO}_2$ a $\text{pH} > 10$ . ....	94
Ecuación 16. Reacción del producto comercial y Ácido Sulfúrico para producir Dióxido de Cloro. ....	96

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Remoción promedio diaria de concentración de Fenol con y sin aplicación de Dióxido de Cloro y cumplimiento del Decreto 1594 de 1984.....	100
Gráfica 2. Concentración diaria promedio de remoción de Fenol y Porcentaje de remoción con y sin aplicación de Dióxido de Cloro.....	100
Gráfica 3. Concentración promedio diaria de aceite residual pre y posta aplicación de Dióxido de Cloro. ....	105

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. FICHA DATOS DE SEGURIDAD PRODUCTO COMERCIAL .....	121
ANEXO B. HOJA DE DATOS DE DIOXIDO DE CLORO .....	128
ANEXO C. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACIDO SULFURICO.....	133

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN DE UNA PRUEBA TECNOLÓGICA DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE FENOLES MEDIANTE DIÓXIDO DE CLORO PARA EL TRATAMIENTO EN EL AGUA DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS 1 DE ECOPETROL S.A.\*

**AUTOR:** SANDRA PAOLA URREGO ENRIQUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Dióxido de Cloro, Fenoles, petróleo, oxidación, vertimientos industriales, desinfección, tratamiento.

### DESCRIPCIÓN

El campo castilla se encuentra ubicado en el departamento del Meta en la jurisdicción de los municipios de Acacias y Castilla la Nueva. Este campo es operado por Ecopetrol S.A y pertenece a la Gerencia de Operaciones Castilla /Vicepresidencia de Producción.

En la actualidad el campo produce aproximadamente 117369 barriles de aceite día proveniente de 352 pozos de los cuales 168 pertenecen al área norte y 184 al área sur. Así mismo produce aproximadamente 625.000 Barriles de agua día.

El agua de producción del campo, luego de ser procesada cumple con todos los parámetros de calidad para aguas de vertimiento exigido por la normatividad ambiental colombiana, entre los que se encuentran aceite y grasas, sólidos suspendidos totales y fenoles.

El campo Castilla presenta un reto hacia el futuro, debido a que tiene que cambiar la actual tecnología de aspersión, que permite reducir la concentración de los Fenoles, por una tecnología alternativa como las torres de enfriamiento. De acuerdo a lo anterior, Ecopetrol en la estación Acacias 1 realizó una prueba piloto para la remoción de fenoles en el agua de producción por medio de la aplicación de dióxido de cloro.

Entre las ventajas de esta tecnología se destaca que se encuentra libre de cloro elemental a diferencia de otras tecnologías que requieren exceso de este para producir el Dióxido de Cloro. Además este oxidante no forma Trihalometanos.

La utilización del Dióxido de Cloro como oxidante aumento significativamente la degradación de los Fenoles con relación a la fotólisis directa usada actualmente como tratamiento en la estación Acacias 1. Así mismo se comprobó que la tecnología evaluada lleva a valores menores de 0,2 mg/L las concentraciones de los Fenoles en las aguas del campo y se evidencio que la reacción es muy eficiente con poco tiempo de contacto.

---

\* Monografía para optar al título de Especialista en Producción de Hidrocarburos.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: MSc. Jorge Enrique Forero Sanabria.

## SUMMARY

**TITLE:** EVALUATION OF TECHNOLOGICAL TESTS OF A PHENOL REMOVAL SYSTEM THROUGH CHLORINE DIOXIDE FOR THE TREATMENT OF PRODUCTION WATERS IN ACACIAS 1 STATION OF ECOPETROL S.A.\*

**AUTHOR:** SANDRA PAOLA URREGO ENRIQUEZ\*\*

**KEYWORDS:** Chlorine Dioxide, Phenols, oil, oxidation, industrial discharges, disinfection, treatment.

### DESCRIPTION

Castilla's Field is located in the Department of Meta under the jurisdiction of Acacias and Castilla la Nueva. This field is operated by Ecopetrol S.A and belongs to Operations Management Castilla / Vicepresidency of production.

Currently, this field produces an average of 117369 oil barrels per day from 352 oil wells, 168 of these wells are in the north area and 184 in the south area. Also, this field produces approximately 625.000 water barrels per day.

Field's production water, after being processed, satisfies all the quality standards for water shedding required by Colombian environmental law, among which we find oil and grease, total suspended solids and phenols.

Castilla's field represents a future challenge, given that it has to change the current sprinkling technology, which allows the phenols reduction, for an alternative technology such as cooling towers. According to the previous statement, Ecopetrol did a pilot test in Acacias 1 station for phenol removal in production water via chlorine dioxide application.

One of the advantages of this technology is the lack of elemental chlorine, unlike other technologies, which require chlorine in excess to produce Chlorine Dioxide. Additionally, this oxidant does not produce Trihalomethanes.

The Chlorine Dioxide usage as oxidant increased significantly the phenols degradation relative to the direct photolysis, currently used as treatment in Acacias 1 station. Also, it was found that the evaluated technology decreased phenol concentration to values under 0,2 mg/L in field waters, and evidenced that the reaction is highly efficient in short contact times.

---

\* Monograph to apply for Specialist in Production of Hydrocarbons.

\*\*Faculty of physicochemical engineerings. School of Petroleum Engineering. Director: MSc. Jorge Enrique Forero Sanabria.

## INTRODUCCION

El campo Castilla perteneciente a Ecopetrol S.A presenta un reto hacia el futuro debido a que tiene que cambiar la actual tecnología de aspersion por una tecnología alternativa como las torres de enfriamiento.

Las actuales piscinas de aspersion ubicadas en la estación Acacias 1 del campo Castilla permiten la oxigenación del agua, la reducción de la temperatura y los fenoles, pero presentan inconvenientes en diferentes aspectos como: limitaciones en las capacidades operativas de los equipos existentes (piscinas y bombas), aspersion de agua al ambiente, requerimiento de grandes áreas, corrosión de equipos y afectación a la comunidad circundante.

Dada esta problemática y el hecho de que se requieren áreas en la estación para la ampliación de las facilidades de tratamiento, por el aumento en la producción de crudo y agua asociada al campo, Ecopetrol S.A decidió que estas piscinas deben ser eliminadas del proceso.

Así mismo la empresa dentro de su política ambiental y en busca de desarrollar proyectos de investigación para implementar formas alternativas de tratamiento de aguas que mejoren su depuración y a su vez complementen la función de las torres de enfriamiento, vio la posibilidad de hacer una prueba piloto en la estación Acacias 1 para la remoción de fenoles por medio de la adición de dióxido de cloro.

Entre las ventajas de esta tecnología probada se destaca que se encuentra libre de cloro elemental a diferencia de las otras tecnologías que requieren exceso de este elemento para producir el Dióxido de Cloro. Además este oxidante no entra en reacciones de sustitución con la materia orgánica en el mismo grado que lo hace el cloro libre y en consecuencia no forma Trihalometanos<sup>1</sup>

El presente trabajo de monografía tiene como propósito realizar la evaluación técnica de este sistema piloto de remoción de Fenoles mediante el Dióxido de Cloro para el tratamiento del agua de producción de la estación acacias 1 perteneciente a la Gerencia Castilla de Ecopetrol S.A.

---

<sup>1</sup> SINGER, Philip C. y RECKHOW, David A. Chemical Oxidation. Quinta edición. McGraw-Hill, New York, 1999. 17 p.

# 1. GENERALIDADES DE LAS DIFERENTES TÉCNICAS DE TRATAMIENTO UTILIZADAS PARA LA REMOCIÓN DE FENOLES EN AGUAS.<sup>2,3</sup>

Algunos residuos industriales son considerados como peligrosos al presentar características de riesgo, causar daño a la salud y al medio ambiente, ya sea por sí mismo o al entrar en contacto con otros residuos.

Los residuos son riesgosos por tener características inflamables, corrosivas, tóxicas, infecciosas, reactivas y mutagénicas entre otras. Dentro de estos se consideran peligrosos los que estén constituidos por:

- Metales, carbonilos
- Compuestos como cromo hexavalente
- Arsénico, selenio, cadmio, antimonio y mercurio
- Cianuros orgánicos e inorgánicos
- Fenoles y compuestos fenólicos.

Dado que las aguas de producción generadas por la industria del petróleo contienen fenoles, se hace a continuación una descripción de este compuesto y las diferentes técnicas de tratamiento para su remoción.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL FENOL<sup>4</sup>

El fenol  $C_6H_5OH$  fue aislado por primera vez en 1834 a partir del alquitrán de carbón por el químico alemán Friedlieb Ferdinand Runge, su nombre inicial fue ácido carboxílico, luego en 1841 se denominó como fenol gracias a Charles Frederick.

---

<sup>2</sup> HERNANDEZ MORENO, Claudica Patricia. Evaluación preliminar de la oxidación avanzada de compuestos fenólicos. Bogotá D.C., 2005. Memos de investigación. Universidad de los Andes. Internet: (<http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/handle/1992/713?show=full-heterogenea.shtml>).

<sup>3</sup> GONZALEZ GUZMAN, Julieta del Rocío. Aplicación de Tecnologías Combinadas para la Remoción de Fenoles en las Aguas de Producción del Campo Arauca de ECOPETROL S.A. Bucaramanga, 2008, 16 y 19p. Trabajo de Grado (Especialización en Química Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química Ambiental.

<sup>4</sup> GUÍAS PARA MANEJO SEGURO Y GESTIÓN AMBIENTAL DE 25 SUSTANCIAS QUÍMICAS. FENOL. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2002. 219p.

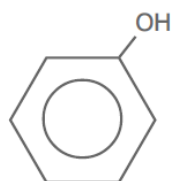
Cuando el fenol se encuentra puro, se trata de un sólido cristalino entre incoloro y blanco, que posee un olor característico dulce y alquitranado; a temperatura ambiente se puede encontrar como un polvo blanco; en contacto con el aire, sus cristales son altamente higroscópicos y toman una coloración entre rosada y roja. Así mismo al ser expuesto a la luz o en presencia de alcalinidad puede mostrar una coloración rojiza.

El fenol es soluble en la mayoría de los solventes orgánicos, Alcohol, Glicerol, petróleo y una cantidad moderada del mismo puede solubilizarse con agua; a temperaturas por encima de 68°C, el Fenol es completamente soluble en esta.

### 1.1.1 Propiedades Físicas y Químicas.

El fenol es una sustancia incolora en la que uno de los hidrógenos de la estructura molecular de los hidrocarburos aromáticos se sustituye por el grupo hidroxilo (-OH), característico de los alcoholes. Se diferencia de estos al tener un (-OH) unido directamente a su anillo aromático, se puede transformar fácilmente en éteres o esteres.

Figura 1. Estructura del Fenol.



Se encuentra en estado líquido o sólido de bajo punto de fusión (43°C) y elevado punto de ebullición (181,75°C) debido al puente de hidrogeno que se forma entre la molécula de agua y el grupo hidroxilo (-OH), siendo más soluble en agua que en otros fenoles, con una solubilidad de 7 gr en 100 gr de agua a 25 °C. A continuación se mencionan algunas propiedades físicas de este compuesto:

Tabla 1. Propiedades físicas del Fenol

Propiedad	Valor
Peso Molecular	94,1
Densidad	1,06 g/cm <sup>3</sup>
Punto de ebullición (°C) (760 mmHg)	181,75
Punto de fusión (°C)	43
Presión de vapor (mmHg)	0,357 a 20°C
Gravedad específica	1,0545 a 45°C
Solubilidad en el agua (g/ml)	0,067 a 16°C

Dadas sus condiciones de aromaticidad es bastante estable, el anillo aromático del fenol tiene una densidad electrónica superior a la del benceno, debido al efecto resonante dador de oxígeno fenólico. Esta posibilidad de estabilización del Fenol hace que pueda perder con relativa facilidad el Hidrógeno de su grupo Hidroxilo, haciendo que se comporte como un ácido débil.

El Fenol es sensible a agentes oxidantes. La escisión del átomo de Hidrógeno perteneciente al grupo Hidroxilo del Fenol, es sucedida por la estabilización por resonancia del radical feniloxilo resultante. El radical así formado puede continuar oxidándose con facilidad; el manejo de las condiciones de oxidación y del tipo de agente oxidante empleado, puede conllevar a la formación de productos tales como dihidroxiBenceno, trioxiBenceno y/o quinonas. Las propiedades químicas mencionadas, hacen del Fenol un buen antioxidante, que actúa como un agente de captura de radicales.

El Fenol sufre múltiples reacciones de sustitución electrofílica, tales como halogenación y sulfonación. También reacciona con compuestos carbonílicos, tanto en medio ácido como básico. En presencia del Formaldehído (CHOH), el Fenol es hidroximetilado con subsecuente condensación, dando como resultado la formación de resinas.

El Fenol es un material combustible en sí mismo, que se quema en presencia de Oxígeno, y puede producir Monóxido de Carbono (CO) como producto de combustión incompleta, el cual es un gas tóxico.

### **1.1.2 Efectos generados por el Fenol.**

El Fenol es un reactivo inflamable, altamente corrosivo, caustico y muy venenoso, puede causar muerte por ingestión y causa envenenamiento por absorción en la piel. Vertido como residuo industrial en el agua es toxico, es mortal para la fauna acuática a concentraciones de 1 ppm y en presencia de cloro se convierte en clorofenol. El contenido mínimo de Fenol detectable por los humanos en el aire es de 40 ppb y en el agua 1ppm.

El Fenol al ser una sustancia corrosiva produce quemaduras químicas en el sitio de contacto. El contacto de cualquier tejido con el Fenol puro provoca quemaduras profundas y de difícil sanación, sin embargo existe evidencia que indica que el Fenol no es un alérgeno. La inhalación del vapor del Fenol puede causar irritación del tracto respiratorio. Las soluciones de Fenol también son corrosivas, a la piel y los ojos. Así mismo su carácter inflamable hace posible la ocurrencia de incendios.

El Fenol se absorbe fácilmente por todas las rutas de exposición, y puede ocasionar efectos sistémicos en estas. Los síntomas del envenenamiento sistémico

involucran frecuentemente una estimulación inicial transitoria del sistema nervioso central (CNS), seguida por depresión rápida del mismo. Los efectos del Fenol tales como convulsiones y coma, pueden presentarse pocos minutos después de la exposición, o inclusive pueden retardarse hasta por 18 horas después de la misma. Otros síntomas incluyen náusea, vómito, diarrea, anemia por precipitación y ruptura de los glóbulos rojos, hipotensión, transpiración abundante, arritmia, edema pulmonar, taquicardia hipopigmentación y dermatitis.

Los síntomas clínicos después de la exposición crítica son hiper-exitabilidad muscular y convulsiones severas, necrosis de la piel y de las membranas mucosas de la garganta, efectos en los pulmones, en las fibras nerviosas, los riñones, el hígado y sensibilidad de la pupila a la luz. Se han reportado casos fatales luego de la intoxicación oral y dérmica al Fenol, pero no se han reportado muertes por inhalación de éste.

La exposición ocupacional al Fenol puede ocurrir durante su producción y derivados del mismo, durante la fabricación de resinas fenólicas y otros productos derivados, así mismo durante otras actividades.

No se han reportado estudios adecuados de los efectos reproductivos del Fenol en humanos, pero sí se han identificado efectos sobre el desarrollo en estudios con ratas y ratones. Existe evidencia de que el Fenol es genotóxico para células de mamíferos in vitro. Los ensayos de cancerogenicidad por exposición oral (solución acuosa) no dieron evidencia de potencial cancerígeno del Fenol.

El potencial de envenenamiento mediante inhalación de vapores de Fenol ha sido ampliamente reconocido, pero no se conocen casos de muerte luego de exposición por esta ruta. Los síntomas asociados con la inhalación de Fenol incluyen anorexia, pérdida de peso, dolor de cabeza, vértigo, salivación y orina oscura.

En animales, la inhalación de aire con altos niveles de Fenol resulta en irritación de los pulmones. La exposición repetida conlleva a temblor en los músculos y pérdida de coordinación. La exposición a niveles elevados de Fenol durante varias semanas causa parálisis y daños severos del corazón, el hígado, los riñones y los pulmones y en algunos casos la muerte. Estudios de mortalidad en conejillos de indias, conejos y ratas expuestos a aire con vapores de Fenol permitieron concluir que el nivel inferior de Fenol en el aire con el que se observan efectos adversos, LOAEL (lowest observed adverse effect levels), es de 26 ppm.

El Fenol como vapor o como líquido penetra en la piel con una eficiencia igual a la de absorción por inhalación. Por su parte, la exposición de los ojos puede causar conjuntivitis y opacidad de la córnea; el Fenol se considera un irritante severo en ojos sin irrigación y un irritante moderado en ojos con irrigación posterior a la exposición.

El uso de soluciones con concentraciones de Fenol de entre 5 y 10%, con propósitos antisépticos, fue causante de muchos casos de exposición que conllevaron a necrosis de la piel y de los tejidos contiguos a ésta. En algunas circunstancias particulares de exposición severa de la piel, en que se vieron involucrados los dedos, fue necesaria la amputación de los mismos. Este tipo de sucesos ha hecho que se deje de usar soluciones de Fenol como agentes desinfectantes.

La letalidad asociada con la exposición dérmica a Fenol guarda una gran relación con el área de la superficie expuesta y la concentración de la solución aplicada. La aplicación de una determinada dosis de Fenol por vía dérmica, puede producir un mayor nivel de toxicidad al encontrarse diluido; en un estudio en que se aplicó una dosis de Fenol de 53.5 mg/kg en la espalda de ratas, la solución al 100% de Fenol causó la muerte de 1 de 5 ratas, mientras que una solución de Fenol al 33% causó la muerte a 3 de 5 ratas. La dosis dérmica letal de ratas  $DL_{50}$  es de 669.4 mg/kg para el Fenol puro.

El Fenol se encuentra presente en la naturaleza y específicamente en varios tipos de peces y en productos comestibles ahumados. El Fenol y sus metabolitos conjugados se presentan naturalmente en tejidos animales y humanos, y se puede detectar en la orina, las heces, la saliva y el sudor. Su producción en el cuerpo depende del tipo de dieta, favoreciendo su formación en dietas ricas en proteína.

La ingestión de Fenol produce tanto efectos locales como sistémicos y produce síntomas similares a los que se presentan por intoxicación a través de la piel. Se ha reportado que dosis orales de 50 a 500 mg de Fenol han sido fatales en niños, mientras que la muerte de adultos se ha presentado con dosis de entre 1 y 32 g.

Los efectos más importantes, a corto plazo, que se reportan en estudios con animales son: neurotoxicidad, daño del hígado y los riñones, efectos respiratorios y retardo del crecimiento. Los efectos tóxicos en riñones de ratas han ocurrido con dosis de 40 mg/kg por día o más. Los efectos tóxicos sobre el hígado se dieron con dosis de por lo menos 100 mg/kg por día. En un estudio de 14 días con ratas, se reportó un NOAEL (Mayor nivel de exposición a una sustancia para el que no se observaron efectos adversos) oral de 12 mg/kg por día. En este experimento, la respuesta de la pupila a la luz (miosis) se inhibió con una dosis de 40 mg/kg por día o más. Un estudio de toxicidad para el desarrollo mostró un NOAEL de 60 mg/kg por día.

En cuanto a los efectos inmunológicos no se reportan estudios en humanos acerca de los efectos causados sobre el sistema inmunológico por la exposición oral al Fenol. Se ha observado disminución de la concentración de células productoras de anticuerpos en ratas sometidas a exposición oral, mediante soluciones de Fenol.

A pesar de que se han realizado estudios sobre animales, que han demostrado la posibilidad de generación de cáncer por exposición repetida a través de la piel, no

existe información acerca de la generación de cáncer en humanos a causa del contacto con Fenol, aunque sí se reconoce como un promotor de tumores). En vista de ello, organismos de vigilancia de la salud de la población en otros países no lo clasifican como cancerígeno por sí solo. Por lo cual no se reporta dentro del listado de la IARC (Agencia Internacional para la Investigación Sobre el Cáncer) para sustancias cancerígenas.

No existen estudios apropiados de la toxicidad reproductiva del Fenol en humanos. Sin embargo, el Fenol ha sido identificado como un tóxico para el desarrollo (estudios realizados sobre ratas y ratones). Estudios en animales condujeron al nacimiento de crías con bajo peso y defectos de nacimiento menores. Se ha identificado embriotoxicidad y fetotoxicidad del Fenol en animales, pero no se observó teratotoxicidad por exposición al Fenol.

Según los diferentes estudios de laboratorio la información toxicológica encontrada en ratas es la siguiente: DL50 (oral, ratas) entre 300-600 mg/kg y DL50 (piel, ratas) de 670 mg/kg.

### **1.1.3 Efectos del Fenol en el medio ambiente.<sup>5</sup>**

En muy bajas concentraciones el fenol es altamente toxico para los organismos acuáticos. Toxicidad acuática: TLm= 10-100 ppm/96h/agua fresca. CL50=0,046 g/L/24h/Pez dorado/agua fresca.

Cuando se elimina este compuesto químico en el suelo, se espera que se biodegrade rápidamente y que no se filtre en las aguas subterráneas. Este material puede evaporarse en un grado moderado, se estima que tiene una vida media entre 1 y 10 días. Al eliminarse en el agua se espera que se biodegrade rápidamente y que no se evapore significativamente, su vida media en este medio acuoso esta entre 10 y 30 días.

El fenol posee un factor de bioconcentración estimado (BCF) inferior a 100, es decir no se bioacumula significativamente.

En el aire se espera que se degrade rápidamente por la reacción con los radicales hidroxilos producidos fotoquímicamente, puede ser moderadamente degradado por fotolisis. Al eliminarse en el aire el fenol tiene una vida media menor de 1 día.

A continuación se presenta su ecotoxicidad:

---

<sup>5</sup> HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL FENOL, DATAQUIM. Bogotá D.C, 2013. Consejo Colombiano de Seguridad.

**Test EC50 (mg/l)<sup>6</sup>:**

- ✓ Bacterias (*photobacterium phosphoreum*): 25 mg/l.  
Clasificación: Extremadamente tóxico.
- ✓ Crustáceos (*daphnia magna*): 100 mg/l.  
Clasificación: Extremadamente tóxico.
  
- ✓ Peces (*C. auratus*): 44,5 mg/l.  
Clasificación: Extremadamente tóxico.

**Medio receptor:**

- ✓ Riesgo para el medio acuático: alto.
- ✓ Riesgo para el medio terrestre: alto.

**Observaciones:** elevada toxicidad.

**1.1.4 Fuentes de generación de Fenoles.<sup>7</sup>**

Los fenoles y compuestos fenólicos se encuentran frecuentemente en las aguas residuales de diferentes industrias, entre ellas, las industrias papeleras, de remoción de pinturas, industrias químicas de producción de pesticidas, herbicidas y fungicidas, las diferentes etapas de la industria del petróleo, generadoras de resinas y la preservación de madera.

Algunas concentraciones típicas de efluentes fenólicos industriales importantes son: en hornos de coque de 28 a 3900 mg/L, en procesos de conversión de carbón de 9 a 6800 mg/L y en la industria petroquímica de 2.8 a 1250 mg/L. La industria del petróleo en sus procesos de producción, refinación, transporte y almacenamiento de hidrocarburos genera gran cantidad de corrientes fenólicas, las cuales poseen concentraciones de fenol que oscilan entre 0.7 y 500 mg/L. La composición química de estas aguas es variable pues dependen de la naturaleza del hidrocarburo, método de tratamiento de emulsiones del yacimiento y del funcionamiento de las diferentes operaciones del proceso.

Las concentraciones de Fenol en los efluentes se clasifican en:

- Concentrada: 500-2000 mg/L.
- Intermedia: 5-500 mg/L.

---

<sup>6</sup> HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL FENOL 90% SOLUCIÓN ACUOSA. México, Junio 2008. Analytyca. Internet: (<http://www.analytyka.com.mx/spanish/FDS/F/141323.htm>).

<sup>7</sup> RUBIANO HERNANDEZ, Claudia y LAGUNA CABEZAS, William. Estudio sobre las Posibilidades de Aplicación de la Fotocatálisis Heterogénea a los Procesos de Remoción de Fenoles en Medio Acuoso. Medellín, 2004. 9-14p. Trabajo de grado (Ing. de Petróleos e Ing. Química). Universidad Nacional Sede Medellín. Facultad de Minas. Internet: (<http://www.monografias.com/trabajos21/fotocatalisis-heterogenea/fotocatalisis-heterogenea.shtml>).

- Diluida: 5 mg/L o menos.

## 1.2 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE FENOLES.<sup>8</sup>

En general existen tres formas para remover la mayor cantidad de contaminantes fenólicos de las aguas residuales. i) Retención (adsorción) sobre un agente externo cuya reutilización o disposición final esté asegurada, ii) Uso de agentes físicos que destruyen químicamente las moléculas hasta llevarlas a subproductos menos contaminantes y, iii) Técnicas que se basan en el aprovechamiento de la capacidad de los fenoles para reaccionar con otras sustancias dando lugar a compuestos de menor solubilidad.

### 1.2.1 Extracción.<sup>9</sup>

El método consiste en poner en contacto la corriente acuosa residual que contiene el compuesto orgánico con un disolvente orgánico selectivo en el que el compuesto orgánico se disuelve en forma preferencial, lográndose la transferencia de masa del contaminante desde la fase acuosa hacia el solvente, por el cual en este caso el Fenol tiene gran afinidad. El proceso incluye extracción, recuperación y separación del disolvente arrastrado por la corriente acuosa. Los aspectos que se deben tener en cuenta al seleccionar el solvente es que debe presentar una disolución selectiva hacia el compuesto orgánico, una rápida cinética de extracción, así como fácil manejo y economía.

Industrialmente el contacto entre las fases de este proceso se efectúa en mezcladoras-sedimentadoras, columnas o mezcladores centrifugos. El problema principal que se presentan en este método es la obtención de una eficiente transferencia de materia.

De otro lado la extracción líquido-líquido resulta eficiente cuando se tienen concentraciones iniciales de Fenol mayores del 2 % en peso, no obstante, los solventes y equipos utilizados pueden resultar poco viables desde el punto de vista económico.<sup>10</sup>

---

<sup>8</sup> RUBIANO HERNANDEZ, Claudia y LAGUNA CABEZAS, William. Estudio sobre las Posibilidades de Aplicación de la Fotocatálisis Heterogénea a los Procesos de Remoción de Fenoles en Medio Acuoso. Medellín, 2004. 9-14p. Trabajo de grado (Ing. de Petróleos e Ing. Química). Universidad Nacional Sede Medellín. Facultad de Minas. Internet: (<http://www.monografias.com/trabajos21/fotocatalisis-heterogenea/fotocatalisis-heterogenea.shtml>).

<sup>9</sup> ORTIZ LOZOYA, Carlos. Eliminación de Fenol Mediante Procesos de Oxidación Avanzada. México D.F, 2002. 14p. Trabajo de grado (Maestría en Ciencias e Ing. Ambiental). Universidad Autónoma Metropolitana. Internet: (<http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/184/Eliminacion%20de%20fenol.pdf?sequence=1>).

<sup>10</sup> SERNA, Iveth y TORRES, Jesús. Recuperación de Fenol de Aguas Residuales Industriales por tratamiento con NaCl. DYNA Revista Facultad de Minas, Vol. 70, Nro. 139, Julio 2003. 26p. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

Así mismo se debe tener en cuenta que las pérdidas por solvente y la corriente fenol-solvente pueden ser significativas creando problemas adicionales de contaminación.

### 1.2.2 Adsorción.<sup>11</sup>

La adsorción es la transferencia de masa del contaminante desde la fase acuosa hacia una superficie sólida (adsorbente), la eficiencia de adsorción depende en general del tipo de adsorbente, concentración del componente orgánico, temperatura, presencia de otras sustancias orgánicas y de sales en la corriente acuosa. Los compuestos fenólicos se pueden adsorber sobre una serie de materiales como carbón activado, resinas poliméricas sintéticas y biopolímeros. Una vez el contaminante se encuentre adsorbido se debe realizar tratamientos para reutilizar el adsorbente y obtener el Fenol a concentraciones mayores.

El proceso se debe a las fuerza de Van der Waals que se presentan entre el soluto y la superficie sólida. Los métodos de adsorción manejan concentraciones iniciales de fenol menores del 4% en peso, dependiendo del adsorbente utilizado, sin embargo, la regeneración del adsorbente requiere procedimientos costosos y en algunos casos se degrada el fenol adsorbido.

Existen resinas absorbentes sintéticas que poseen una alta área superficial para recuperar compuestos orgánicos, entre las más frecuentes se encuentran las de estructura basada en polimetacrilato o estireno.

La adsorción por carbón activado es utilizada en corrientes con concentraciones bajas de compuestos orgánicos, quedando este retenido en la superficie del carbón, el cual posteriormente se regenera para su reutilización. En este proceso las aguas residuales se pasan de forma ascendente o descendente, por gravedad o presión a través de una columna que posee un lecho fijo de carbón activado granular entre 0,4 - 2,4 mm. El tiempo de contacto se encuentra entre 30 y 200 minutos y la corriente debe tener una concentración de sólidos en suspensión de 60 ppm y aceite máximo de 20 ppm. La capacidad de saturación del carbón activado se encuentra entre 0,9 y 0,4 g de fenol/g de carbón activado.

---

<sup>11</sup> ORTIZ LOZOYA, Carlos. Eliminación de Fenol Mediante Procesos de Oxidación Avanzada. México D.F, 2002. 15p. Trabajo de grado (Maestría en Ciencias e Ing. Ambiental). Universidad Autónoma Metropolitana. Internet: (<http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/184/Eliminacion%20de%20fenol.pdf?sequence=1>).

### 1.2.3 Intercambio Iónico.<sup>12</sup>

Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, poseen forma de esferas o perlas de 0.3 a 1.2 mm de tamaño efectivo, aunque también las hay en forma de polvo.

Están compuestas de una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz de un polímero sintético (resinas estirénicas, resinas acrílicas, etc.) y actúan tomando iones de las soluciones y cediendo cantidades equivalentes de otros iones. La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante.

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Este proceso tiene lugar constantemente en la naturaleza, tanto en la materia inorgánica como en las células vivas.

Las resinas de intercambio iónico poseen un radical fijo y un ión móvil o ión de sustitución. El ión móvil es el ión que es intercambiado por iones que desean eliminarse de la solución, este intercambio sólo funciona entre iones de igual carga eléctrica: cationes por cationes y aniones por aniones.

En general las resinas de intercambio iónico operan en columnas, para favorecer el proceso de intercambio. Esta reacción se desplaza generalmente hacia los niveles inferiores en el lecho de resina.

Al producirse el intercambio iónico, la capacidad de la resina comienza a decrecer, debido a que posee una capacidad limitada para la remoción de iones de las soluciones y debido a esto, en un momento dado habrá cedido la mayoría de sus iones de sustitución y se producirá un cierto pase de iones no deseados en el agua producida (resina agotada o saturada de los iones que ha atrapado). Por este motivo, al diseñar una columna de intercambio iónico, se establece como prioridad la concentración máxima admisible de iones indeseables en la salida del proceso. Cuando se llega a la concentración establecida, se debe proceder a regenerar la resina, para poderla utilizar en un nuevo ciclo.

Pese a que el intercambio es una reacción reversible, con cada regeneración del lecho, se pierde cierta capacidad de intercambio, bien sea por la pérdida de sitios de intercambio superficiales, sometimiento a condiciones rigurosas de pH, temperatura y/o por acción de oxidantes severos.

---

<sup>12</sup> PUGA BULLÓN, Jose. Resinas de Intercambio Iónico. Lima, 2007. Internet: (<http://www.monografias.com/trabajos51/intercambio-ionico/intercambio-ionico.shtml>).

Este proceso es empleado para la remoción de fenoles en estado ionizado y se justifica su utilización cuando la concentración del fenol es superior a 1000mg/L. Su desventaja principal es su alto costo.

#### **1.2.4 Oligomerización enzimática.**<sup>13</sup>

En este campo se aprovecha la posibilidad de ciertas sustancias (óxidos de magnesio, hierro y manganeso) y enzimas (polimerasas) para sustraer del medio oxígeno elemental y llevar a cabo una oxidación secuencial que da como resultado la formación de enlaces C – O – C entre anillos fenólicos, generando compuestos de mayor peso molecular. Su principal desventaja se presenta en el crítico control de los procesos, siendo necesario garantizar temperaturas inferiores a 40° C, pH entre 6.5 y 7.5 y concentración de entrada no superior a 200 ppm., para evitar una disminución irreversible en la actividad enzimática, que tiene carácter irreversible.

#### **1.2.5 Oxidación con agua supercrítica.**<sup>14</sup>

Por encima de su punto crítico el agua se transforma en un medio único de reacción donde los hidrocarburos y el oxígeno molecular tienen una solubilidad infinita. Con estas propiedades, el agua en condiciones supercríticas es atractiva para la oxidación de fenoles, clorofenoles y bifenilos policlorados.

Los principales productos de oxidación son: ácido acético, alcoholes, óxidos de carbón y residuos orgánicos. Para lograr una oxidación completa se han utilizado catalizadores en este sistema. Una ventaja del sistema de oxidación catalítica con agua supercrítica es la ausencia de formación de coque y de envenenamiento del catalizador. Las principales desventajas de este sistema son los requerimientos de altas temperaturas (450-500°C), altas presiones (240-300 atm) y oxígeno molecular puro, así como también problemas de corrosión. Todos estos hechos hacen que esta tecnología sea costosa. Algunas plantas pilotos con este sistema están operando en Estados Unidos y Alemania.

---

<sup>13</sup> FLORES SUAREZ, Lenin Javier. Diseño de un Proceso de Tratamiento de Fenoles en las Aguas Residuales de la Refinería de Shushufindi, "CIS". Ecuador, 2008, 28 p. trabajo de grado (Ing. En Recursos Naturales Renovables). Universidad Técnica del Norte. Internet: (<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/201?mode=full>).

<sup>14</sup> FLORES SUAREZ, Lenin Javier. Diseño de un Proceso de Tratamiento de Fenoles en las Aguas Residuales de la Refinería de Shushufindi, "CIS". Ecuador, 2008, 29 p. trabajo de grado (Ing. En Recursos Naturales Renovables). Universidad Técnica del Norte. Internet: (<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/201?mode=full>).

### **1.2.6 Oxidación con aire húmedo.<sup>15</sup>**

Los compuestos orgánicos también pueden ser oxidados por oxígeno del aire a temperaturas y presiones más bajas que la temperatura y presión crítica del agua.

Este proceso se conoce como oxidación con aire húmedo. La ventaja comparada con la oxidación con agua supercrítica es el menor costo, pero la oxidación no es completa y debe estar asociada con un proceso de biodegradación.

### **1.2.7 Biodegradación.**

En este proceso los microorganismos presentes en las raíces de las plantas y rizomas utilizan los compuestos orgánicos presentes en el agua (en este caso el fenol) como fuente de carbono y energía, transformándolos en biomasa, gas carbónico e intermedios. Este tratamiento puede ser aerobio o anaerobio.

Los procesos de biodegradación para los efluentes fenólicos han sido reportados desde hace unos años, pero debido a su toxicidad, aun a concentraciones bajas (> 200mg/L), pueden afectar gravemente el proceso, inhibiendo el crecimiento microbiano, convirtiéndose en biocida o en algunos casos los intermediarios formados pueden ser tóxicos para los microorganismos. Algunos fenoles son intrínsecamente refractarios (no biodegradables), y además otros compuestos comúnmente presentes en estas aguas pueden también afectar la eficiencia del proceso.

La biodegradación es muy sensible a cambios inesperados en las concentraciones de las corrientes de alimentación, las cuales pueden matar los microorganismos o disminuir considerablemente la velocidad del proceso. Así mismo, se requieren grandes volúmenes de almacenamiento, pues los tiempos de residencia pueden llegar a ser de varios días. Los efluentes poseen algunas características indeseables en cuanto a turbiedad, color, salinidad y en algunos casos presenta una baja sedimentación del lodo.

Los procesos biológicos para el tratamiento de efluentes que contienen compuestos disueltos o emulsionados como hidrocarburos residuales, fenoles, gases, entre otros han demostrado que la biomasa requiere un tiempo de reacción largo para eliminar los compuestos refractarios. En el caso de fenol, la eliminación eficaz solo se consiguió después de un tiempo de residencia prolongado y las concentraciones de fenol por debajo de 200 mg/L. Además, los procesos biológicos aplicados en las aguas residuales de producción tienen varias desventajas que reducen

---

<sup>15</sup> FLORES SUAREZ, Lenin Javier. Diseño de un Proceso de Tratamiento de Fenoles en las Aguas Residuales de la Refinería de Shushufindi, "CIS". Ecuador, 2008, 30 p. trabajo de grado (Ing. En Recursos Naturales Renovables). Universidad Técnica del Norte. Internet: (<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/201?mode=full>).

notablemente las tasas de eliminación, tales como los efectos inhibidores de los compuestos fenólicos complejos, el marcado efecto sobre la estabilidad y la eficiencia producido por altas concentraciones de sólidos e hidrocarburos y la descarga incontrolada de Fenol concentrado en las corrientes de plantas de tratamiento, que interfieren con el proceso biológico hasta el punto en que lo cortan por completo<sup>16</sup>.

### 1.2.8 Incineración.<sup>17</sup>

La incineración es una técnica usada para la destrucción de fenoles y de compuestos aromáticos clorados. Aquí el fenol se destruye transformándose en dióxido de carbono y agua:

Ecuación 1. Incineración del Fenol.



La EPA exige 1600°C como temperatura de operación para este proceso, el cual resulta costoso y genera además algunos subproductos por la combustión incompleta.

### 1.2.9 Tratamiento electroquímico.

El tratamiento electroquímico es llevado a cabo aplicando una corriente o una diferencia de potencial entre dos metales llamados electrodos. En uno de ellos ocurre una reacción de oxidación (ánodo) mientras que en el otro tiene lugar una reacción de reducción (cátodo). Presenta como desventajas el alto costo y consumo de energía. .

### 1.2.10 Procesos avanzados de Oxidación.<sup>18</sup>

Los procesos de oxidación química desempeñan varias funciones importantes en el tratamiento de agua. Los oxidantes químicos se utilizan para la oxidación de

---

<sup>16</sup> FORERO, Jorge, et al. Ozone for phenol treatment in industrial wastewater. En *Sciencia, Technology and Future Journal*, CT & F. Vol. 2, No. 2 (Dic. 2001); 18p. Internet: (<http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v2n2/v2n2a02.pdf>).

<sup>17</sup>FLORES SUAREZ, Lenin Javier. Diseño de un Proceso de Tratamiento de Fenoles en las Aguas Residuales de la Refinería de Shushufindi, "CIS". Ecuador, 2008. 28p. trabajo de grado (Ing. En Recursos Naturales Renovables). Universidad Técnica del Norte. Internet: (<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/201?mode=full>).

<sup>18</sup> SINGER, Philip C. y RECKHOW, David A. *Chemical Oxidation*. Quinta edición. McGraw-Hill, New York, 1999. p. 1-46.

especies inorgánicas reducidas, tales como hierro ferroso, Fe (II); manganeso, Mn (II); y sulfuro, S (-II); y compuestos orgánicos sintéticos peligrosos como el tricloroetileno (TCE) y atrazina. Los oxidantes también se pueden utilizar para destruir compuestos que causan sabor y olor, y pueden eliminar el color. Además, en algunos casos, pueden mejorar el desempeño de los coagulantes o reducir su cantidad inyectada.

Debido a que muchos oxidantes también tienen propiedades biocidas, se utilizan en las cuencas de pre-tratamiento para controlar el molesto crecimiento acuático de algunas especies, tales como algas, así mismo se pueden usar como desinfectantes primarios. Estos oxidantes se agregan a menudo al inicio de la planta de tratamiento, antes de o en la etapa de mezcla rápida, pero también se pueden emplear después de la clarificación o antes de la filtración.

Los oxidantes químicos fuertes son capaces de reaccionar con los productos químicos orgánicos sintéticos, tales como pesticidas y solventes clorados, que pueden estar presentes en el agua. Estas reacciones son altamente dependientes de la naturaleza del compuesto orgánico, el oxidante específico en cuestión, otros constituyentes del agua, pH, y temperatura. Algunos compuestos orgánicos son relativamente fáciles de oxidar, mientras que otros son mucho más resistentes. Además, para cualquier oxidante particular los productos de la reacción pueden variar, dependiendo del oxidante, la relación de la concentración del oxidante con el contaminante y las características generales de calidad del agua.

En estos procesos avanzados de oxidación se utilizan generalmente reactivos como ozono, cloro, dióxido de cloro, hipocloritos, permanganatos, peróxido y algunas combinaciones de estos. El ozono se utiliza a veces en conjunción con peróxido de hidrógeno o la irradiación ultravioleta para producir radicales que tienen potentes propiedades oxidativas. En ellos el contaminante orgánico es transformado por la acción oxidante de estos compuestos, algunas veces hasta productos inocuos como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. El potencial de oxidación del ozono es mayor que la del ácido hipocloroso o cloro, siendo superado solamente por el radical hidroxilo (OH•) y el fluoruro en su capacidad de oxidación. Esto indica que el ozono tiene una acción más eficaz que el cloro en el tratamiento del agua. A continuación se muestra algunos de los potenciales de oxidación de las distintas especies utilizadas como oxidantes para el tratamiento de aguas:

Tabla 2. Potenciales redox de agentes oxidantes.

Especie	Eo (V,25°C)	Especie	Eo (V,25°C)
Flúor	3,03	Radical perhidróxilo	1,7
Radical hidroxilo	2,8	Permanganato	1,68
Oxígeno atómico	2,42	Dióxido de cloro	1,57
Ozono	2,07	Ácido hipocloroso	1,49
Peróxido de hidrógeno	1,78	Cloro	1,36

El cloro libre ha sido tradicionalmente el oxidante y desinfectante de elección en los Estados Unidos, pero las preocupaciones sobre la formación de subproductos de la desinfección (DBPs) producido por las reacciones entre el cloro libre y la materia orgánica como lo son los halogenados, los cuales son potencialmente dañinos, agravado en algunos casos, por la presencia de bromuro, han hecho que muchos sistemas de tratamiento de agua adopten oxidantes químicos alternativos para bajar la formación de los DBPs halogenados. Estos otros oxidantes también puede reaccionar con la materia orgánica y bromuro en diversos grados, dependiendo de las propiedades del oxidante, para formar subproductos de oxidación, algunos de los cuales también tienen efectos adversos para la salud pública o pueden llegar a causar problemas de operación aguas abajo de la planta de tratamiento o del sistema de distribución.

En la siguiente tabla se presentan las ventajas y desventajas generales de los oxidantes más comúnmente utilizados para el tratamiento de aguas.

Tabla 3. Ventajas y desventajas generales de los oxidantes más comúnmente utilizados para el tratamiento de aguas.

Oxidante	Ventajas	Desventajas
Cloro	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oxidante fuerte</li> <li>Desinfectante fuerte</li> <li>Produce residual persistente</li> <li>Fácil de usar</li> <li>Económico</li> <li>Larga historia de uso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produce los subproductos de desinfección halogenados</li> <li>Puede contribuir a problemas de sabor y olor</li> </ul>

Tabla 3. (Continuación)

Oxidante	Ventajas	Desventajas
Cloraminas	<ul style="list-style-type: none"> <li>No produce Trihalometanos (THM)</li> <li>Produce residual persistente</li> <li>Controles de crecimiento microbiano</li> <li>Fácil de usar</li> <li>Larga historia de uso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oxidante débil</li> <li>Desinfectante débil</li> <li>Produce tóxicos no identificados</li> <li>Puede con llevar a problemas de nitrificación en los sistemas de distribución</li> <li>Puede contribuir a problemas de sabor y olor</li> </ul>

Ozono	Oxidante muy fuerte Desinfectante muy fuerte Efectivo para el sabor y olor No produce subproductos de desinfección halogenados excepto en aguas ricas con Bromuro Puede ayudar en la coagulación y floculación.	No produce desinfectante residual persistente Relativamente costoso Produce Bromato en aguas ricas con Bromuro Produce materia orgánica biodegradable que debe ser controlada
Ozono y TAOs	Oxidante muy fuerte Más efectiva para el control de olor y sabor No produce subproductos de desinfección halogenados	Propiedades de desinfección limitadas Relativamente costosa Produce materia orgánica biodegradable que debe ser controlada
Oxigeno	Fácil de alimentar No produce subproductos de desinfección halogenados	Oxidante relativamente débil para la mayoría de aplicaciones de tratamiento de agua, excepto para Fe(II) y oxidación de sulfuro
Dióxido de Cloro	Oxidante fuerte Desinfectante fuerte Efectivo para ciertos tipo de olor y sabor No produce subproductos de desinfección halogenados No reacciona con amoniaco	Produce clorito como una DBP inorgánico, lo cual dependen de los reactivos utilizados para su generación. Puede producir olores indeseables Dificultad para mantener una desinfección persistente para sabor y olor residual
Permanganato	Fácil de alimentar Eficaz para la oxidación de Fe y Mn No produce subproductos de desinfección halogenados Efectivo para ciertos tipo de olor y sabor	Produce dióxido de manganeso que debe ser eliminado Puede conducir a agua de color rosa si la dosis no es cuidadosamente controlada Capacidades de desinfección limitada

### 1.2.11 Oxidantes químicos para remoción de Fenoles.<sup>19</sup>

El Fenol y los compuestos fenólicos constituyen materias primas o productos intermedios en numerosas industrias petroquímicas, químicas y farmacéuticas y son

<sup>19</sup> SINGER, Philip C. y RECKHOW, David A. Chemical Oxidation. Quinta edición. McGraw-Hill, New York, 1999. p. 27-28.

así mismo productos de degradación oxidativa de hidrocarburos aromáticos de mayor peso molecular.

Por ejemplo, la oxidación de Fenol por dosis bajas de cloro conduce a la formación de los mono-, di-, y triclorofenoles. En el caso de ozono, la oxidación de fenol a dosis bajas de ozono resulta en la formación de catecol y o-quinona antes de que el anillo se rompa en dosis más altas para producir una variedad de ácidos carboxílicos de bajo peso molecular. Con el dióxido de cloro, la oxidación de fenol produce hydroxophenoles, quinonas, y varios clorofenoles y chloroquinones a bajas dosis de oxidantes. El rompimiento del anillo a dosis más altas de dióxido de cloro conduce a la formación de ácidos carboxílicos, como en el caso del ozono. Con el dióxido de cloro no es claro si las especies cloradas formadas evolucionaron a partir del cloro reactivo producido durante la reacción entre el dióxido de cloro y el fenol o de la presencia de cloro libre como un contaminante en la solución de alimentación de dióxido de cloro.

El fenol y naftaleno se oxidan rápidamente por el ozono molecular. Las olefinas, hidrocarburos aromáticos, aminas primarias y secundarias, aldehídos, cetonas e hidratos de carbono no son muy reactivas con el dióxido de cloro bajo las condiciones de tratamiento de agua, mientras que las aminas terciarias, tioles y fenoles tienen constantes de velocidad de reacción altas.

Entre los oxidantes químicos más utilizados para la remoción de fenoles se encuentran el permanganato de potasio, peróxido de hidrogeno y dióxido de cloro. La oxidación química dependiendo del agente oxidante, se puede utilizar para un amplio intervalo de concentraciones iniciales de fenol y puede alcanzar los niveles finales <1 mg/L. Una de las ventajas de este proceso es que es más económico que la incineración y los tratamientos biológicos. Este método presenta una gran desventaja, pues degrada irreversiblemente el fenol siendo imposible su reutilización.

A continuación se presenta la comparación de los diferentes oxidantes más utilizados para la remoción de los Fenoles:

Tabla 4. Comparación de Oxidantes

Oxidante	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	KMnO <sub>4</sub>	ClO <sub>2</sub>
Rata de reacción	Moderada	Moderada	Rápida
Selectividad	Baja	Moderada	Alta
Pre-tratamiento	Si	Si	No

Tabla 4. (Continuación)

Oxidante	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	KMnO <sub>4</sub>	ClO <sub>2</sub>
Pulimiento	No	Si	Si

Retiro de Demanda Bioquímica de Oxígeno	Si	Si	Si
Reducción de Toxicidad	Si	Si	Si

### 1.2.12 Formación de subproductos de la oxidación y desinfección.

Los subproductos de la oxidación son compuestos químicos producidos como resultado involuntario de la desinfección del agua y la oxidación. Los compuestos generados de mayor preocupación contienen átomos de cloro y bromo, se ha encontrado que algunos de estos pueden ser cancerígenos o causan efectos adversos en el desarrollo reproductivo de animales. Otros han demostrado ser mutagénicos y hepatotóxicos. Como resultado de ello, la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. promulgo en 1979 y 1998 normas que regulan las concentraciones de subproductos de la desinfección (DBP) en aguas.

Los oxidantes para el tratamiento de agua y desinfección derivan su eficacia de su general reactividad química. Los mismos atributos que dan la capacidad a los desinfectantes de reaccionar con las membranas celulares, materiales nucleicos y proteínas celulares también dan lugar a reacciones con la materia orgánica disuelta (factor abiótico). De hecho, la mayor parte de la demanda de oxidante puede ser atribuida a las reacciones con estas moléculas abióticas en agua.

Parte de la materia orgánica en aguas superficiales y subterráneas es altamente reactiva con una amplia gama de oxidantes. Los productos incluyen formas reducidas de los oxidantes, por ejemplo, cloruro, hidróxido, clorito y formas oxidadas de los reactivos orgánicos o inorgánicos.

Los sitios de ataque del desinfectante sobre la materia orgánica suelen ser a menudo sobre los enlaces dobles carbono-carbono. A medida que aumenta el grado de reacción, la materia orgánica se convierte en más fragmentos y los subproductos específicos son más simples en su estructura. Los subproductos de la oxidación en general incluyen los ácidos C1-C3, diácidos, aldehídos, y cetonas. Los ejemplos específicos incluyen el ácido oxálico, ácido acético y ácido fórmico.

Algunos de los desinfectantes son capaces de producir subproductos que tienen incorporados en su estructura átomos halógenos como el cloro, bromo y yodo.

Desde el descubrimiento de los Trihalometanos (THM) a principios de la década de los setenta, cientos de compuestos específicos han sido identificados como subproductos del tratamiento del agua, muchos de los cuales los podemos observar en la Figura 2.

Dado que la producción de los subproductos varía en gran escala, en la tabla siguiente se clasifican en: muy alto > 100 µg/L, alto = 10-100 µg/L, media = 1-10 µg

/L, bajo <1 µg/L), según lo determinado en un promedio de agua bajo condiciones típicas de tratamiento.

Figura 2. Subproductos químicos de algunos desinfectantes.

By-product class	Examples	Chlorine	Chlorine dioxide	Ozone
Compounds with O-X bonds				
Oxychlorines	Chlorate, chlorite		Very high <sup>34,35</sup>	
Oxybromines	Bromate, hypobromate			Medium <sup>50-52,56</sup>
Compounds with C-X bonds				
Trihalomethanes	Chloroform, bromodichloromethane, chlorodibromomethane Bromoform	High Medium		Medium <sup>48,51</sup>
Other haloalkanes	1,2-dibromoethane, 1,2-dibromopropane	Low <sup>14,15</sup>		
Halohydrins	3-bromo-2-methyl-2-butanol 9-chloro-10-hydroxyl methyl stearate	(NOM <sup>20</sup> )	(Models <sup>37</sup> )	Medium <sup>66</sup>
Haloacids (saturated)	Dichloroacetic acid, trichloroacetic acid Monochloroacetic acid, bromochloroacetic acid, bromodichloroacetic acid Monobromoacetic acid, dibromoacetic acid, tribromoacetic acid 6,6,-dichlorohexanoic acid	High Medium  Low	(NOM <sup>29</sup> )	Medium <sup>49</sup>
Haloacids (unsaturated)	3,3-dichloropropenoic acid	(NOM <sup>15</sup> )		
Halodiacids	2,2-dichlorobutanedioic acid 2,3-dichlorobutenedioic acid	(NOM <sup>15,16</sup> )		
Halohydroxy-acids	3,3,3-trichloro-2-hydroxypropanoic acid 2-chloro-4-hydroxybutanoic acid 2,3-dichloro-3,3-dihydroxy propanoic acid 4-chloro-4-hydroxypentenoic acid	(NOM <sup>15</sup> )		
Haloketones	1,1,1-trichloropropanone Chloropropanone Bromopropanone 1,1,3,3-tetrachloropropanone 1,1,1-trichloro-2-butanone, pentachloro-3-buten-2-one	Medium <sup>1,2,3</sup>   (NOM <sup>4</sup> )	Unknown <sup>28</sup>	Unknown <sup>58</sup>
Haloaldehydes	Chloral Chloroacetaldehyde, dichloroacetaldehyde Dichloropropanal, 3-chlorobutanal 2,3,3-trichloropropenal	Medium  (NOM <sup>4</sup> )		
Haloketoacids	2,3-dichloro-4-oxopentenoic acid 2,5-dichloro-4-bromo-3-oxopentanoic acid	(NOM <sup>15</sup> )		
Halonitriles	Dichloroacetonitrile, trichloroacetonitrile Dibromoacetonitrile	Medium <sup>1,2,5</sup>		
Cyanogen halides	Cyanogen chloride Cyanogen bromide	Low		
C-chloro amines				
Halophenols		(NOM <sup>1,6</sup> )		
Chloroaromatic acids	5-chloro-2-methoxybenzoic acid Dichloromethoxybenzoic acid	(NOM <sup>7,8</sup> )		
Halothiophenes	Tetrachlorothiophene	(NOM <sup>1</sup> )		
Chlorinated PAHs		Unknown <sup>9</sup>		
MX and related compounds	MX, EMX, red-MX, ox-EMX 2,2,4-trichlorocyclopentene-1,3-dione	Low <sup>11-13</sup> Low <sup>10</sup>		
Halonitromethanes	Chloropicrin Bromopicrin	Medium Low		Medium
Compounds with N-X bonds				
N-chloro-amino acids	N-chloroglycine	(Models)		
N-chloro-amines		(Models <sup>26</sup> )		

Figura 2. (Continuación)

Compounds without halogens				
Aliphatic	Formic acid, acetic acid, butyric acid, pentanoic acid	High	High <sup>28,29,38,40</sup>	High <sup>43,56</sup>
Monoacids	Hexadecanoic acid			Low <sup>58</sup>
Aliphatic diacids (saturated)	Oxalic acid Succinic acid, glutaric acid, adipic acid	High	High <sup>32,40</sup> (NOM <sup>29</sup> )	Very high <sup>56</sup> Unknown <sup>46</sup>
Aliphatic diacids (unsaturated)	Butenedioic acid 2-tert-butylmaleic acid, 2-ethyl-3-methylmaleic acid	(NOM <sup>15,16</sup> )	Unknown <sup>28,32</sup>	
Aromatic acids	Benzoic acid, 3,5-dimethylbenzoic acid	(NOM <sup>15,16</sup> )	Unknown <sup>28</sup>	Unknown <sup>44-46</sup>
Other aromatics	p-benzoquinone Hydroxy-PAHs 3-ethyl styrene, 4-ethyl styrene Naphthalene, 1-methylnaphthalene		(Models <sup>33</sup> ) (Models <sup>36</sup> ) Unknown <sup>28</sup> Unknown <sup>28</sup>	
Aldehydes	Formaldehyde, acetaldehyde, propanal Glyoxal, methylglyoxal Benzaldehyde, ethylbenzaldehyde		Unknown <sup>30</sup>	High High Unknown <sup>46,56</sup>
Ketones	Acetone, propyl ethyl ketone Dioxopentane, 1,2-dioxobutane Acetophenone, 4-phenyl-2-butanone 2-hexenal, 6-methyl-5-hepten-2-one 2,3,4-trimethylcyclopent-2-en-1-one 2,6,6-trimethyl-2-cyclohexene-1,4-dione		Unknown <sup>28</sup>	Medium <sup>41,53</sup> Unknown <sup>41</sup> Unknown <sup>46</sup> Low <sup>58</sup>
Ketoacids	Pyruvic acid, glyoxalic acid, ketomalonic acid Oxobutanoic acid, 4-oxo-2-butenic acid Ketosuccinic acid, ketoglutaric acid Dioxopropanoic acid, dioxopentanoic acid			High Unknown <sup>41,46</sup> Unknown <sup>41,59</sup> Unknown <sup>41</sup>
Hydroxy acids	Hydroxymalonic acid			(NOM <sup>44</sup> )
Hydroxy carbonyls	Hydroxyacetaldehyde			(Models <sup>57</sup> )
Furans	Methylfurancarboxylic acid		(NOM <sup>29</sup> )	

Notas: Los datos marcados "(NOM)" y "(Modelos)" son de los estudios que utilizan soluciones de materia orgánica y compuestos modelos, respectivamente.

Fuente Singer, Philip C. y Reckhow, David A.

Cada uno de los tres oxidantes presentados en este cuadro tiene su propia química única. Por ejemplo, el ozono parece ser el único que produce cantidades medibles de bromato. Sin embargo, muchas clases de subproductos y compuestos específicos son comunes a dos o más de los oxidantes principales, esto se aprecia con los ácidos carboxílicos alifáticos simples (ejemplo el ácido acético) que son subproductos universales independientemente del oxidante utilizado. Itoh y Matsuoaka en el año de 1996 encontraron que todos los oxidantes producen carbonilos como el formaldehído.

Algunos compuestos halogenados como los ácidos dihaloacéticos pueden ser producidos por los tres oxidantes, pero las cantidades producidas varían dependiendo del que se utilice, la dosis de oxidante y el nivel de bromuro.

A continuación se hablara de los subproductos de algunos procesos de oxidación:

#### ✓ Subproductos de la cloración.

Los subproductos de la cloración incluyen una amplia gama de compuestos orgánicos halogenados y no halogenados. Las agencias de reguladores se han centrado en los compuestos halogenados, especialmente los Trihalometanos y

ácidos Haloacéticos. Se trata de pequeños productos finales de la reacción de cloro con la materia orgánica. En aguas con niveles bajos de bromuro, predominara completamente la cloro-sustitución, por ejemplo, cloroformo, di- y ácido tricloroacético. Aguas con niveles moderados a altos de bromuro formarán niveles elevados de Bromo con contenido de análogos, por ejemplo, bromodiclorometano y ácido bromodicloroacético.

Casi todos los estudios relacionados con los subproductos de la desinfección (DBP) en la década de los setenta se centraron en los Trihalometanos, debido a su volatilidad, estabilidad química y alta relación de halógeno/carbono. En cuestión de pocos años, se reconoció que los Trihalometanos estaban siempre presentes cuando se utilizó el cloro como desinfectante.

Los Ácidos Haloacéticos (HAA) al igual que los Trihalometanos están presentes siempre en las aguas cloradas, aunque estos se encuentran en niveles ligeramente más bajos.

Muchos otros subproductos halogenados han sido ampliamente reportados en las aguas cloradas. Los más intensamente estudiados de estos compuestos no regulados son los halopropanonas, los haloacetnitrilos, cloropicrina y el hidrato de cloral, los cuales deben su base de datos al método analítico que comparte con los trihalometanos (es decir por cromatografía de gases con detección de captura de electrones). Los haloacetnitrilos se creen que son productos de la cloración de aminoácidos y materiales proteínicos. Estructuras nitrogenadas en las sustancias húmicas también formaran haloacetnitrilos a través de intermedios de ácido ciano. Los halopropanonas, por ejemplo, 1,1,1-trichloropropanona e hidrato de cloral (un haloaldehído) son análogos halogenados de algunos subproductos de la ozonización común, estos se encuentran comúnmente en concentraciones elevadas en las aguas que habían sido previamente ozonizadas.

Alrededor del 50% de los tóxicos producidos por la cloración se puede atribuir principalmente a los subproductos discutidos anteriormente, los demás son desconocidos en gran parte. Un balance de masa similar sobre la actividad mutagénica revela que más del 50% puede ser contabilizado entre los subproductos conocidos. Gran parte de la mutagenicidad identificado es encontrado en un solo compuesto, el cual es una furanona clorada que se produce en pequeñas cantidades por el cloro libre y las cloraminas, se sabe relativamente poco acerca de este pues es muy costoso de medir.

Debido a que los tóxicos representan sólo una pequeña fracción de la demanda de cloro total (típicamente menos de 10%), se puede concluir que la mayoría de subproductos de la cloración orgánica no contienen cloro. Un número de estos subproductos no halogenados han sido identificados, la mayoría son mono- y di-ácidos alifáticos y ácidos bencenopolicarboxílico, estos no han sido estudiados

ampliamente debido a que probablemente no presentan problemas para la salud. Cabe señalar que muchos de estos compuestos son fácilmente biodegradables.

#### ✓ **Subproductos de la ozonización.**

El ozono puede conducir a la formación de subproductos bromados cuando se aplica a las aguas con niveles moderados a altos de bromuro. Este es un resultado directo de la capacidad del ozono para oxidar el bromuro a ácido hipobromoso y especies relacionadas. Parte de este bromo oxidado continuara reaccionando para formar ion bromato. Así mismo gran parte del ácido hipobromoso restante reaccionará con la materia orgánica formando compuestos orgánicos bromados. Estos subproductos abarcan las mismas clases generales reportadas para los subproductos halogenados del cloro, es decir los Trihalometanos (bromoformo), HAAs (ácido dibromoacético), HANs (haloacetonitriles, por ejemplo dibromoacetónitrilo). Un estudio reciente mostró que el 7% del bromuro del agua cruda se incorpora como haluro orgánico total (o bromuro orgánico total, TOBr) después de la ozonización bajo condiciones típicas de tratamiento.

La mayoría de los subproductos de la ozonización no son halogenados. La mayoría de sus subproductos son similares a los productos de oxidación de otros desinfectantes. Por ejemplo, estudios de campo en paralelo con ozono y dióxido de cloro encuentran que ambos producen niveles similares de ácidos carboxílicos con peso molecular bajo. Sin embargo, un número de estudios sugieren que el ozono produce los niveles más altos de aldehídos simples y ceto-ácidos (o aldo-ácidos) que los otras desinfectantes principales.

Otros subproductos de oxidación atribuidos al ozono incluyen los hidroxí-ácidos, ácidos aromáticos y hydroxyaromaticos (Ver tabla 5). Los peróxidos orgánicos y epóxidos también son subproductos esperados de la ozonización.

Debido a la fuerte relación entre los subproductos de la ozonización y materia orgánica biodegradable (BOM) en el agua, se han presentado intentos de atribuir esta materia orgánica a compuestos específicos. Krasner et al. demostraron que hasta un 40% del carbono orgánico asimilable y un 20% del carbono orgánico disuelto biodegradable puede ser asignado a los principales subproductos de la ozonización. Sin embargo, este total todavía representa menos del 5% del carbono orgánico disuelto (DOC) compuesto.

#### ✓ **Subproductos del Dióxido de Cloro.**

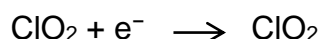
El dióxido de cloro se somete a una amplia variedad de reacciones de oxidación con la materia orgánica para formar compuestos orgánicos oxidados y clorito (ver Tabla

5 y la Ecuación 2). Las concentraciones de clorito representan que un 50 a 70% del dióxido de cloro se consume. También se puede formar el clorito, junto con el clorato ( $\text{ClO}_3^-$ ), por la desproporción de dióxido de cloro (véase la ecuación. 3). El dióxido de cloro, clorito y clorato se consideran que tienen efectos adversos sobre la salud y su presencia en el agua tratada es una fuente de preocupación.

El dióxido de cloro puede someterse también a un número limitado de reacciones de sustitución de cloro. Las reacciones con modelos compuestos específicos demuestran la formación de compuestos aromáticos clorados y alifáticos clorados. Los Trihalometanos, sin embargo, no se han detectado como productos de reacción. Al igual que con los otros oxidantes que contienen cloro, productos de la adición/sustitución del cloro son favorecidos a bajas relaciones de oxidante-carbono y las reacciones de oxidación son favorecidos a altas relaciones. Estudios que han utilizado aguas y materia orgánica demostraron que pequeñas cantidades de haluro orgánico total (TOX) se forman tras el tratamiento con los niveles típicos de dióxido de cloro. Esto puede ser debido a la formación de HOCl cuando el dióxido de cloro reacciona con la materia orgánica y la posterior reacción con otros compuestos orgánicos. La cantidad relativamente pequeña de HOCl formado de esta manera, conduce probablemente a macromoléculas escasamente halogenadas (TOX), lo que explicaría la falta de identificación de subproductos de haluros orgánicos.

El dióxido de cloro por lo general reacciona con la mayoría de los agentes reductores (por ejemplo, hierro ferroso, materia orgánica), a través de una transferencia de un electrón. Ver la ecuación a continuación.

Ecuación 2. Reacción de Dióxido de Cloro.



Una vez generado, el dióxido de cloro se puede disolver en agua y es estable en ausencia de luz y temperaturas elevadas. En presencia de esta última, o con altos valores de pH, reaccionara para formar tanto clorito y clorato, como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 3. Reacción de Dióxido de Cloro para producir clorito y clorato.



### 1.2.13 Factores que influyen en la formación de subproductos.

A continuación se nombran los diferentes factores que influyen la formación de subproductos de las reacciones de oxidación:

✓ **Tiempo.**

El tiempo es uno de los factores más importantes para determinar las concentraciones de los subproductos de desinfección (DBP) en condiciones donde un residual de desinfectante persiste. Los principales subproductos de desinfección son los halogenados como los Trihalometanos (THM) y Ácidos Haloacéticos (HAA), los cuales son químicamente estables. Estos se acumulan en el agua tratada y sus concentraciones aumentan con el tiempo de reacción durante el tiempo que existe un residual de oxidante. Sin embargo, hay casos en los que las concentraciones de HAA caen cerca a cero después de largos tiempos de residencia en los sistemas de distribución de agua. Este fenómeno se atribuye generalmente a la biodegradación y no parece ocurrir con los THM (este último parece ser biodegradable sólo bajo condiciones anaeróbicas).

Las pruebas de laboratorio han demostrado que los HAA se forman más rápidamente que los THM. Esto hace que la relación de HAA/THM sea más alta en las primeras etapas de la reacción y caiga lentamente con el tiempo de reacción. Estas observaciones están respaldadas por los datos obtenidos de las plantas de tratamiento a gran escala y los sistemas de distribución. En contraste los subproductos del cloro y la ozonización se forman rápidamente y muestran poco aumento a largo plazo. Lo cual es debido a la rápida disipación del residual de ozono. Una vez que el ozono disuelto se ha ido, la formación de subproductos sólo puede continuar por medio de reacciones de hidrólisis, que representan una contribución relativamente menor a la concentración total del subproducto. Muchos DBPs halogenados son químicamente inestables y están sujetos a la hidrólisis o la oxidación adicional. Para estos compuestos, hay un tiempo de reacción durante el cual la concentración alcanza un máximo. Algunos DBPs, como dicloroacetoneitrilos, se descomponen lentamente y alcanzan su máxima concentración solamente después de tiempos de reacción del orden de días. Otros son más reactivos y se descomponen a niveles indetectables en cuestión de minutos u horas (por ejemplo, 1,1-dichloropropanone).

#### ✓ **Dosis de oxidante.**

Dosis de oxidante tiene un impacto variable sobre la formación de DBPs. Pequeños cambios en la dosis utilizada para la desinfección residual a menudo tienen efectos menores sobre la formación de DBP, esto es debido a que estos sistemas tienen un exceso de oxidante y son por lo tanto precursores limitados. Cuando el residual desciende por debajo de aproximadamente 0,3 mg/L, se convierte oxidante limitado para la formación de DBP. Bajo estas circunstancias, los cambios en dosis de oxidante tienen un gran efecto. Dado lo anterior se probó que cuando se aplica de 3 a 5 mg/L de cloro al agua del río Connecticut, produce trihalometanos en directa proporción a dichas dosis. Sin embargo, cuando se añade un exceso (> 5 mg / L), un residuo persiste y los niveles de formación de THM caen.

Como regla general, la dosis de oxidante juega un papel más importante en la formación de los DBP durante desinfección primaria que durante desinfección

secundarias, esto porque los desinfectantes primarios se añaden normalmente en cantidades muy por debajo de la demanda requerida a largo plazo. Por lo tanto, el desinfectante es el reactivo limitante, no los precursores orgánicos.

#### ✓ **pH.**

La reacción global entre el cloro y la materia orgánica es relativamente insensible a pH. Sin embargo, la concentración de haluro orgánico total (TOX) y subproductos halogenados específicos está fuertemente influenciada por el pH. Casi todos los subproductos disminuyen su concentración al aumentar el pH, una excepción importante son los THM.

Muchos DBP por ejemplo, 1,1,1-trichloropropanone se descomponen por efecto de la hidrólisis, estos compuestos son menos frecuentes en aguas con altos pH, y su concentración tiende a caer con largos tiempos de residencia. Los trihalometanos aumentan en alto pH debido a que muchas reacciones de hidrólisis en realidad conducen a la formación de estos. Otros subproductos son a su vez afectados por la hidrólisis (por ejemplo, la HAA), pero sus vías de formación se pueden alterar a alto pH, lo que resulta en menos compuesto producido a pH alto.

Ninguno de los principales subproductos de la ozonización están sujetos a la hidrólisis básica, en lugar de ello, el pH juega un papel importante al alterar la velocidad de descomposición de ozono a los radicales hidroxilo. A medida que aumenta el pH, se acelera la descomposición del ozono, y por lo tanto se cree que esto es responsable de la disminución en los subproductos clásicos de la ozonización, por ejemplo, los aldehídos. Sin embargo, la química de las reacciones del ozono y el radical hidroxilo con la materia orgánica no se conocen aun bien y pueden existir casos en los que algunos subproductos carbonilo aumenten con el pH.

El bromato se forma en aguas ozonizadas a partir de una serie de reacciones entre el ozono o radicales hidroxilo y el bromuro de origen natural. Un intermedio clave en este mecanismo es el ión hipobromito, a pHs más bajos este se convierte en protonado formando el menos reactivo ácido hipobromoso. Esto hace que la formación general de bromato se reduzca a medida que el pH disminuye. Por otro lado, valores más bajas de pH favorecen la formación de haluro orgánico total (TOX) durante la ozonización.

#### ✓ **Temperatura.**

La velocidad de formación de subproductos de la oxidación generalmente aumenta con el aumento de la temperatura. Los datos obtenidos de laboratorio y a gran escala sugieren que la formación del cloroformo es más sensible a la temperatura que la formación de ácido dicloroacético (DCAA), la relación no es tan clara para la formación de ácido tricloroacético (TCAA). A altas temperaturas, el acelerado

agotamiento del residual de cloro retarda la formación de los DBP, a pesar de que pueden aumentar las constantes de velocidad para las reacciones de producción de los DBP, lo cual es especialmente cierto para el TCAA, pues su formación es más sensible al cloro residual que el cloroformo y el DCAA.

Las altas temperaturas también pueden acelerar los procesos de degradación de los subproductos de la oxidación. La biodegradación de ácidos haloacéticos (HAAs) se espera suceda más rápidamente a alta temperatura. Los DBPs experimentan reacciones abióticas con bases o cloro activo a una rata más rápida a medida que aumenta la temperatura, por esta razón, el aumento de temperatura puede en realidad causar una disminución en la concentración de ciertos subproductos de la oxidación.

#### ✓ **Material precursor.**

Está bien establecido que la formación de compuestos halogenados (DBP) es proporcional a la concentración de carbono orgánico total (TOC) en el punto de la cloración. Es por ello que en aguas con altas concentraciones de precursores de DBPs, cambiando el punto de cloración desde antes de la coagulación y sedimentación para después de esta, se obtiene reducciones sustanciales en la formación de estos DBPs. Por otra parte, una reducción del 40% en el TOC a través de tratamientos convencionales a menudo se traduce en una reducción de un 50% o más en algunos DBPs, esto se atribuye en parte a la eliminación preferencial de los precursoras orgánicas por la coagulación y el acompañamiento del cambio en la naturaleza de la materia orgánica en el punto de cloración.

#### ✓ **Bromuro.**

El Bromuro se oxida fácilmente con cloro acuoso y ozono para formar ácido hipobromoso. Esta reacciona en concierto con otros oxidantes forman los subproductos de oxidación llamados bromados. A medida que aumentan los niveles de bromuro aumenta la formación los DBPs bromados. Cuando el cloro es el oxidante, familias mixtas de cloro y bromo resultaran, tales como los Trihalometanos.

Muchos estudios de laboratorio han demostrado que la formación molar de los THMs aumenta ligeramente con la concentración de bromuro, puesto que las compuestos bromados son más pesadas que sus análogos clorados, el nivel de THM en base masa (mg/L) aumenta aún más fuertemente con el aumento de nivel de bromuro.

La formación de subproductos de oxidación no halogenados es probablemente insensible a la variación en los niveles de bromuro. Un estudio de los subproductos de la ozonización mostró sólo efectos muy leves del bromuro en los niveles de aldehído.

✓ **Efectos estacionales.**

Concentraciones de DBP están fuertemente influenciadas por las estaciones. Siendo los factores subyacentes la temperatura y los cambios inducidos por estacionalidad en la calidad del agua (características de materia orgánica, bromuro, pH). En general, las concentraciones de DBP son más altas en verano, lo cual se atribuye a las altas temperaturas que aceleran las reacciones formadoras de DBPs. Además, las reacciones que demandan oxidantes son más rápidas, requiriendo mayor dosis de oxidante. Así mismo la degradación química es más rápida a altas temperaturas y la biodegradación juega un papel mayor.

Existen tres enfoques generales para el control de las concentraciones de los subproductos de la desinfección (DBPs): i) Reducir al mínimo la formación de DBP mediante la reducción del material orgánico precursor en el punto de oxidación, ii) Minimizar la formación de DBP mediante la reducción de la dosis de oxidante, cambiando la naturaleza del oxidante u optimizando las condiciones de la oxidación y iii) Eliminar los subproductos de la oxidación después de su formación.

La mayoría de los esfuerzos se han centrado en la primera enfoque, tal como se representa por el interés en la "coagulación mejorada." Sin embargo, las estrategias de control también deben considerar cambios en el proceso, de acuerdo con el segunda enfoque.

✓ **Minimizar los precursores orgánicos.**

El objetivo de esta estrategia en particular es reducir al mínimo la cantidad y reactividad de los precursores orgánicos en el punto de la oxidación. Esto puede hacerse reduciendo el contenido de precursores en el agua sin tratar, mejorando la eliminación del precursor a través de la planta, cambiando el punto de oxidación a una etapa posterior de tratamiento, o alguna combinación de los tres.

Las reducciones en los precursores orgánicos y niveles de bromuro, también pueden lograrse a través de una cuidadosa mezcla de agua de la fuente. Una vez que han entrado en la planta, los precursores de DBP pueden ser eliminados por coagulación, adsorción, oxidación, o filtración por membrana. La coagulación con sales férricas y de aluminio ha demostrado ser un medio muy eficaz para la eliminación de los precursores orgánicos hidrofóbicos, así mismo la adsorción con carbón activado granular (GAC) también puede ser muy eficaz. . Otros métodos que han mostrado eliminar el carbono orgánico total (TOC) también pueden ser utilizados para quitar los precursores de DBP, por ejemplo, los procesos de membrana y el intercambio de iones.

✓ **Modificar la oxidación.**

Varios elementos de la etapa de oxidación pueden ser modificados para ayudar al control de la formación de los subproductos de desinfección (DBPs). Un enfoque

obvio es reducir al mínimo la dosis de oxidante a la medida de lo posible dentro de las limitaciones de una buena desinfección práctica. Por ejemplo, la dosis de desinfectante primario y secundario puede estar reducida en algunas plantas de tratamiento haciendo una desinfección de refuerzo en el sistema de distribución en áreas susceptibles. El ajuste del pH puede ser también utilizado para afectar favorablemente la formación de DBP. Además la adición de base para el control de la corrosión podría retrasarse hasta después de la oxidación con cloro para ayudar a deprimir la formación de Trihalometanos (THM).

Un enfoque ampliamente utilizado es el de sustituir un oxidante por otro oxidante alternativo, los ejemplos más comunes incluyen el uso de cloraminas como desinfectante secundario en lugar de cloro libre, o el uso de preozonación como desinfectante primario en lugar de precloración.

#### ✓ **Eliminar los subproductos.**

En general, los subproductos de la desinfección (DBPs) son hidrófilicos y de bajo peso molecular, características que los hacen difíciles de eliminar mediante la mayoría de los procesos fisicoquímicos. Por ejemplo, la eliminación de los trihalometanos en agua tratada requiere ya sea la separación por aire o adsorción con generación frecuente (GAC). Por otra parte, algunos subproductos de la desinfección son biodegradables y por lo tanto pueden ser removidos mediante filtración biológicamente activa. El ejemplo más común de esto es la eliminación de los aldehídos, ácidos y ceto-ácidos tras la ozonización, también hay evidencia de que el ácido haloacético (HAA) se puede eliminar de esta forma.

### **1.2.14 Tecnologías Avanzadas de Oxidación.<sup>20 21</sup>**

Las Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAO's) se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios fundamentales en la estructura química de los contaminantes. Inicialmente se definieron los Procesos Avanzado de Oxidación (PAO's) como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias de alto poder oxidante, principalmente el radical hidroxilo (OH•). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica.

---

<sup>20</sup>FORERO, Jorge, ORTIZ, Olga y RIOS, Fabian. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de Fenol en aguas residuales industriales de refinería. En *Sciencia, Technology and Future Journal*, CT & F. Vol. 3, No. 1 (dic. 2005); p 97-109.

<sup>21</sup>DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F y LITTER, Martha. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes, in: M.A. Blesa y, B. Sánchez Cabrero (Ed.), *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*. Texto Colectivo Elaborado por la Red CYTED. VIII-G, Ediciones CIEMAT, Madrid, España, 2004, p. 7-34.

Algunas TAOs, como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, recurren además a reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados.

La tabla 5 muestra un listado de las TAO's existentes, clasificadas en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos

Tabla 5. Tecnologías Avanzadas de Oxidación.

Tecnologías Avanzadas de Oxidación	
Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino ( $O_3/OH^-$ )	Oxidación en agua sub/y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ )	Procesos fotoquímicos

Tabla 5. (Continuación)

Tecnologías Avanzadas de Oxidación	
Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Procesos Fenton ( $Fe^{2+}/H_2O_2$ ) y relacionados	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
Oxidación electroquímica y Oxidación anódica	UV/peróxido de hidrogeno
Radiólisis y y tratamiento con haces de electrones	UV/ $O_3$
Plasma no térmico	Foto-Fenton y relacionadas
Descarga electrohidráulica – Ultrasonido	Fotocatalisis heterogénea

Las principales ventajas de las TAO respecto a los métodos tradicionales son:

- ✓ Transforman y destruyen químicamente los contaminantes orgánicos hasta la mineralización.
- ✓ En general, no generan subproductos que requieran posterior procesamiento.
- ✓ Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- ✓ Operan en rangos donde los sistemas convencionales no son factibles.
- ✓ Son ideales para preparar las corrientes a tratamientos convencionales. Aumentan la biodegradabilidad.
- ✓ Reactividad con una gran mayoría de compuestos orgánicos. Lo cual es muy importante, para los casos en que los tratamientos secundarios y los

tratamientos con químicos convencionales, no consiguen unas degradaciones adecuadas de algunos contaminantes, especialmente de elevado peso molecular, poco biodegradables o se quiere evitar la presencia de subproductos potencialmente tóxicos.

- ✓ Usualmente no generan barros que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- ✓ Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
- ✓ No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.

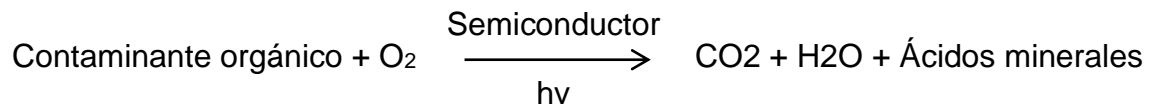
Las TAOs son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o para reducir la toxicidad de los residuos con alta concentración de fenol, como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores. Su principal función es la detoxificación.

Estas tecnologías de tratamiento presentan algunas de las siguientes desventajas:

- ✓ Utilización de reactivos costosos como el peróxido de hidrogeno y el ozono.
- ✓ Costos elevados para la generación de radiación UV.
- ✓ Baja eficacia de la radiación.
- ✓ Requiere que el compuesto a degradar absorba en el UV.
- ✓ Presencia de carbonatos, bicarbonatos y otros neutralizantes de radicales.

**Fotocatálisis Heterogénea:** En esta se hace referencia a una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. Una de las aplicaciones de la fotocatalisis se encuentra en la resolución de problemas de interés ambiental, como puede ser la depuración de agua o de aire, utilizando un semiconductor sensible a la luz como catalizador. En este caso se habla de fotocatalisis heterogénea porque las fotorreacciones transcurren en la superficie del catalizador (en la interfase líquido-sólido o gas-sólido, respectivamente). La fotocatalisis heterogénea permite la degradación, e incluso la mineralización, de gran variedad de compuestos orgánicos según la reacción global siguiente:

Ecuación 4. Reacción global de la Fotocatálisis Heterogénea.



La fotocatalisis heterogénea muestra buenos resultados de degradación de compuestos orgánicos como fenoles. Entre sus ventajas se encuentran:

- ✓ La facilidad para el tratamiento de mezclas de compuestos (el método no es selectivo).
- ✓ Los tiempos cortos para la remoción.

- ✓ La obtención de efluentes de óptima calidad.
- ✓ La fácil adaptación a diferentes condiciones.

Cualquier tipo de intermediario de naturaleza orgánica formado en el proceso de oxidación fotocatalítica será finalmente oxidado a CO<sub>2</sub>, agua y en algunos casos hasta ácidos minerales, permitiendo la mineralización completa del contaminante.

Un estudio efectuado por la Universidad Nacional de Colombia acerca de la aplicación de la fotocatalisis heterogénea para la remoción del Fenol en medio acuoso concluyo lo siguiente<sup>22</sup>:

- ✓ La concentración de Fenol se degrada de forma consistente con una relación de primer orden, alcanzando la concentración cero al final del experimento.
- ✓ Las especies intermedias perceptibles en la fase líquida aparecen inicialmente y luego disminuyen hasta que desaparecen totalmente.
- ✓ La completa desaparición de las especies intermedias ocurre a veces cerca del punto de desaparición completa del Fenol
- ✓ El Carbono Orgánico Total cae de manera monótona desarrollando esencialmente una cinética de orden-cero, indicando un muy corto tiempo para la oxidación completa.

---

<sup>22</sup> GONZALEZ GUZMAN, Julieta del Rocío. Aplicación de Tecnologías Combinadas para la Remoción de Fenoles en las Aguas de Producción del Campo Arauca de ECOPETROL S.A. Bucaramanga, 2008, 66p. Trabajo de Grado (Especialización en Química Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química Ambiental.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO CASTILLA Y DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS 1.

### 2.1 CAMPO CASTILLA<sup>23</sup>

En 1969, en el marco del contrato de Concesión Cubarral, firmado el 5 de noviembre de 1968, Chevron descubre el campo Castilla, con resultados comercialmente aceptables. El primer pozo que perforó fue el pozo Castilla 1 que inició su producción oficial en el año de 1977, este hallazgo dio origen en 1973 a un nuevo contrato de asociación entre Chevron y Ecopetrol, con derecho a la producción del campo Castilla en una división porcentual de 50/50.

En el año de 1973, Chevron había perforado tres pozos en el campo Castilla y se deducía que en cada uno de los sitios, posiblemente, existía una estructura petrolífera. Según los registros eléctricos, se consideraba que el campo Castilla albergaba en su interior una columna de aceite, una estructura con espesor de formación petrolífera con petróleo de 13 grados API, con reservas estimadas de mil millones de barriles, y con un factor de extracción o petróleo producible de aproximadamente el 10%, o sea 100 millones de barriles para una producción diaria entre 20 y 30 mil barriles.

El acuerdo de asociación Cubarral entre Chevron y Ecopetrol nace debido a las siguientes situaciones:

- ✓ Chevron ve la posibilidad de ampliar su capital, gracias a las alzas en los precios del petróleo y a la reducción de costos por medio de la asociación, proponiendo a Ecopetrol que entrara a participar con un 50% en la perforación de nuevos pozos (Yali y Umadea).
- ✓ Ecopetrol ve la oportunidad para que la zona estuviese bajo el esquema actualizado de asociación y aprueba entrar en participación con 600,000 dólares.
- ✓ Ley 20 de 1969, por la cual Ecopetrol estaba autorizado para asociarse en contratos de exploración y explotación.

Según el decreto 2756 de 29 de diciembre de 1973, Ecopetrol hace un aporte para la exploración y explotación en el área de Castilla. El acuerdo final, determinaba que por los campos ya explorados, Castilla 1 y Chichimene 1, Ecopetrol aportaría el 50% de los gastos incurridos; Chevron estaría a cargo de la administración y operación del campo y el contrato tendría una regalías totales del 20% de la producción obtenida, la cual sería

---

<sup>23</sup> PLAN DE DESARROLLO CAMPO CASTILLA. Superintendencia de Yacimientos ECOPETROL S.A. 2012.

cancelada a Ecopetrol en producto. Además Chevron estaría a cargo del pago de regalías al Gobierno y a los municipios de la zona de influencia.

El contrato de asociación inicio oficialmente el 31 de enero de 1975, con vigencia hasta el 30 de enero del 2000, en este tiempo Chevron perforó 24 pozos en el campo Castilla, construyó tres estaciones de recolección y tratamiento de crudo Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene; y el oleoducto de 10" de diámetro y 40.5 km de longitud para transportar el producto desde la estación Chichimene hasta la Estación de Bombeo Apiay, para que después éste fuera transportado por la red nacional de oleoductos.

Para los años entre 1990 a 1995, el campo Castilla mantenía una producción entre 10.000 y 20.000 BOPD. Durante la década de los 90' la producción promedio mensual aproximada era de 19.594 barriles, en estos años la producción fue aumentando alrededor de 25.000 barriles, para 1999.

A partir del 31 de enero del 2000 a las 12 a.m finalizo el contrato de asociación Cubarral entre Ecopetrol y Chevron, pasando los campos de Castilla y Chichimene a manos de Ecopetrol.

En el momento en que Ecopetrol asumió la operación de los campos, estos prometían unas reservas aproximadas de 242.5 millones de barriles, de los cuales 220.2 correspondían a crudos pesados. La Gerencia Llanos llevó a cabo un plan de desarrollo adicional del campo, el cual consistía en:

- ✓ Ampliación de la capacidad instalada en el tratamiento de crudo y Agua.
- ✓ Perforación de pozos de desarrollo, incrementando el nivel de producción.
- ✓ Remodelación de la estación de bombeo Castilla.
- ✓ Remodelación de los oleoductos Castilla – Chichimene (11.7 km.) y Castilla - Apiay (44 km.), con el fin de conectar el campo con la red nacional de oleoductos.

El desarrollo adicional del campo Castilla, constituyó la fase inicial del proyecto "Crudos Pesados", de la Vicepresidencia de Exploración y Producción cuyo objetivo era recuperar 500 millones de barriles de crudo de los campos Castilla, Rubiales y Nare hacia el año 2026.

El primer pozo perforado por Ecopetrol cuando inicio la operación directa del campo fue el pozo horizontal Castilla 25H, luego perforo el pozo desviado C26.

En el año 2003 se realizó el Programa Sísmico Castilla 3D, obteniendo una lectura actualizada del yacimiento, con esta información Ecopetrol perforó los pozos: Castilla 27 a Castilla 31, Castilla Norte 3 a Castilla Norte 6, y el pozo Castilla Norte 4.

Así, la producción de Castilla pasó de 27.205 barriles día a 52.389 entre el 2004 y el 2005. Durante la presente década la producción continuó en crecimiento, alcanzando aproximadamente los 100.000 BOPD.

### **2.1.1 Evaluación estructural.**

La estructura del Campo Castilla corresponde a un anticlinal cuyo eje presenta una orientación N 60° E, de 5 Km. de ancho y 13 Km. de largo. La estructura se encuentra afectada por una serie de fallas normales con dirección NE-SW, algunas asociadas a la falla principal. Las fallas normales presentan saltos que varían de 30 a 120 pies y las fallas inversas con saltos muchos menores que varían entre 30 y 50 pies. Al parecer las fallas internas que afectan la estructura no presentan carácter sellante, ya que el contacto agua aceite no presenta cambios abruptos al lado y lado de las fallas, mostrando en general a lo largo del campo una misma inclinación. Las unidades son continuas en el área del Campo.

Geológicamente el Campo Castilla se encuentra localizado en el sector suroccidental de la cuenca subandina de los llanos orientales, dentro de la cuenca de los Llanos Orientales, subcuenca Apiay-Ariari. Posee una estructura anticlinal de aspecto cóncavo con dirección NE-SW, con doble cabeceo y una mayor inclinación en su parte más Oriental, presentando dos planos de alto ángulo inclinado al NW, que cortan desde el Terciario hasta el Basamento.

La cuenca subandina de los Llanos orientales es una depresión estructural asimétrica con tendencia NE, que ha tenido un desarrollo a través de diferentes etapas como producto de la superposición de varios eventos, logrando su configuración actual durante la orogénesis Andina del Mio-Plioceno y posterior a esta.

### **2.1.2 Descripción del modelo y columna estratigráfica del área.**

En el Campo Castilla se depositaron rocas que van desde el Precretáceo hasta el Reciente. La secuencia deposicional en el área Castilla está caracterizada por sistemas extensionales similares en las unidades Cretácica (K2/K1) y Terciaria (T2). Regionalmente las Unidades K2 y K1 representan una secuencia depositacional de larga duración en el Cretáceo Medio a Superior, separada por inconformidades a la base y al tope, con numerosas secuencias de menor orden dentro de esta.

La secuencia de estratos define los ciclos deposicionales en sistemas extensionales presentes como eventos correlativos, que permiten que las secuencias cron-estratigráficas y ciclos de capas presentes en el campo coincidan con los toques de las unidades reservorio. Así se evidencia una continuidad estructural de las

unidades K1/K2, mientras que la Unidad T2 muestra una correlativa disminución de espesor hacia el norte.

### 2.1.3 Propiedades del petróleo.

Los yacimientos definidos para el área Castilla comprenden las unidades K1 Inferior, K2 y T2.

Los objetivos principales del campo son las arenas de las unidades K1 Inferior y K2 para las cuales se realizaron las auditorías de reservas y se enfoca el plan de desarrollo actual del campo. La formación T2, es un objetivo secundario del campo.

Las características de los yacimientos se presentan a continuación:

Tabla 6. Propiedades de los fluidos por Yacimientos del Campo Castilla.

<b>Hidrocarburos</b>		
Formación	<b>K1 - K2</b>	<b>T2</b>
Tipo	MEDIO	PESADO
Gravedad API	12,5 – 13	10
Relación Gas-Aceite GOR (SCF/STB)	15	ND
Factor Volumétrico (Cond. Inicial) (RB/STB)	1,042	1,03
Densidad (gr/cc)	0,983	1,007
Viscosidad @ P burbuja (cp)	120	450
Presión Burbuja (psi)	150	ND
Compresibilidad del Aceite (1/psi)	0,974	ND
Gravedad específica del Gas	ND	ND
<b>Agua</b>		
Formación	<b>K1-K2</b>	<b>T2</b>
Salinidad (ppm)	300-500	2045-2339
Resistividad (Ohm.m)	7-10	2.58-2.84

### 2.1.4 Mecanismo de producción.

El principal mecanismo de producción del campo está asociado a un fuerte empuje de agua con componente lateral y de fondo, evidenciado por el comportamiento histórico de la presión de yacimiento que a pesar de los altos volúmenes de fluidos extraídos solamente ha disminuido en 400 psi desde su inicio de explotación, lo que

indica la influencia de un acuífero de gran tamaño como mecanismo de mantenimiento de la presión.

### 2.1.5 Generalidades del campo.

El campo castilla se encuentra ubicado en el departamento del Meta en la jurisdicción de los municipios de Acacias y Castilla la Nueva. Es operado por Ecopetrol S.A y pertenece a la Gerencia de Operaciones Castilla /Vicepresidencia de Producción.

En la actualidad el campo produce aproximadamente 117369 BOPD<sup>24</sup> asociado a 352 pozos de los cuales 168 pertenecen al área norte y 184 al área sur<sup>25</sup>. Así mismo produce aproximadamente 625.000 BWPD.

Los fluidos provenientes de los pozos son tratados en tres estaciones: Castilla 1, Castilla 2 y Acacias 1. Cuyas capacidades de tratamiento de crudo y agua de producción son:

Tabla 7. Capacidades Tratamiento Estaciones.

Estación	BOPD	BWPD	BWPD (STAPs Portátiles)
Castilla 1	8000	0	30000
Castilla 2	65000	330000	50000
Acacias 1	60000	480000	100000

Cabe anotar que adicional a las facilidades de tratamiento de agua de producción existente en las estaciones, en la actualidad se cuenta con sistemas de tratamiento de aguas de producción portátiles (STAPs portátiles).

<sup>24</sup> INFORMES DIARIOS DE PRODUCCIÓN. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A. Abril-Junio 2013.

<sup>25</sup> POTENCIAL DE PRODUCCION CAMPO CASTILLA. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A. 2013.

## 2.2 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ACACIAS 1.<sup>26 27</sup>

La estación Acacias 1 recibe el fluido con un 93% BS&W proveniente de las troncales T1, T3, T4, T5, T8 y T9 de los pozos del área Castilla Norte en cinco colectores. En cada uno de estos colectores se inyectan los siguientes productos químicos: rompedor de emulsión directo (LA3262C) y rompedor inverso (03VC057) para favorecer la separación y posterior retiro de agua libre que se encuentra emulsionada, además se le adiciona antiespumante (EC9059A) para impedir la formación de espuma en los tanques de surgencia (Figura 3).

Figura 3. Panorámica estación Acacias 1.



Cortesía de Gerencia de Operaciones Castilla. ECOPETROL S.A.

El agua que es separada debido al tiempo de residencia y diferencia de densidades durante el proceso de deshidratación de crudo en los tanques de surgencia, compensación y lavado, es tratada en los STAP 1 y 2 (sistemas de tratamiento de agua de producción), antes de su vertimiento al Río Guayuriba y al Área de Sostenibilidad en Agroenergía ASA.

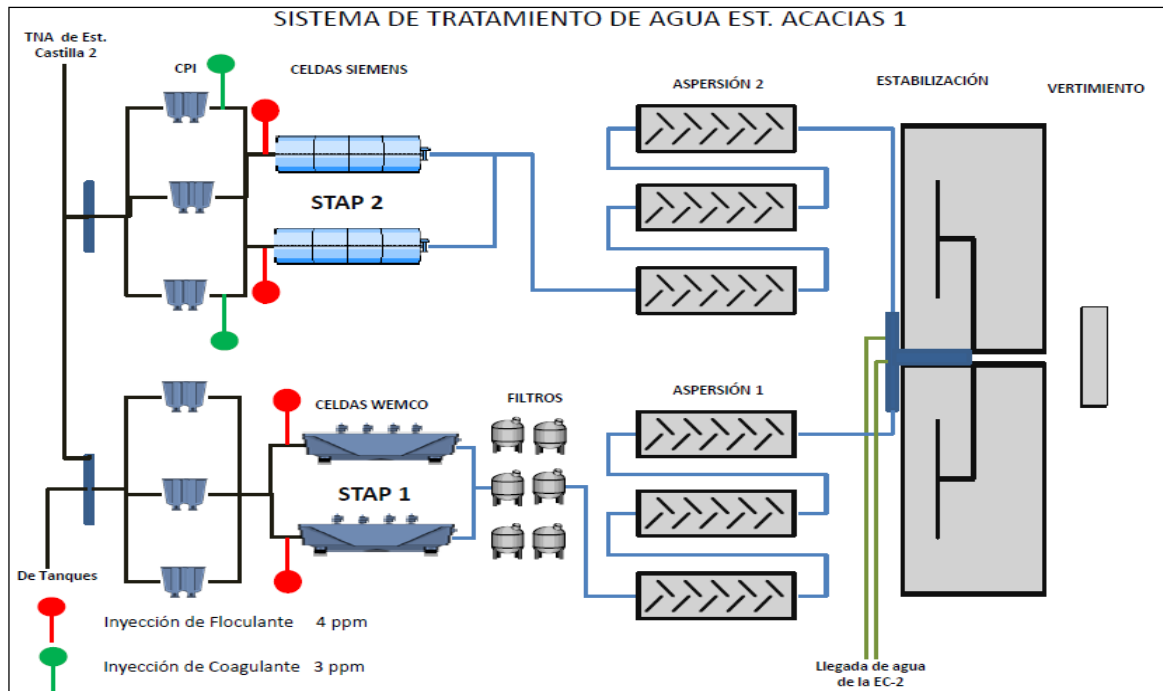
<sup>26</sup> DESCRIPCIÓN STAP 2 ACACIAS. Superintendencia de Operaciones Castilla - Chichimene ECOPETROL S.A. 2011.

<sup>27</sup> MANUAL DE OPERACIONES ESTACION DE RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO CASTILLA 2. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A. 2007.

La capacidad de diseño de cada sistema de tratamiento de aguas de producción (Figura 4) es de 240.000 BWPD y se encuentran constituidos por los siguientes equipos:

- ✓ Interceptores de placas corrugadas (CPI).
- ✓ Celdas de flotación de gas inducido.
- ✓ Filtros de alta tasa de filtración tipo cáscara de nuez negra.
- ✓ Aspersión para oxidación de los fenoles
- ✓ Piscina de estabilización
- ✓ Sistema de bombas de vertimiento hacia el Rio Guayuriba.

Figura 4. Sistema de tratamiento aguas de producción estación Acacias 1.



Fuente Ecopetrol S.A.

El STAP 1 con capacidad para tratamiento de 240000 BWPD está conformado por:

Tabla 8. Equipos Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción STAP 1.

Equipo	Capacidad (KBWPD)	Unidades
CPI	80	3

Celdas de Flotación con gas inducido IGF	120	2
Filtros	50	6

### 2.2.1 Descripción general de los equipos del sistema de tratamiento de aguas de producción (STAP 1) de la estación Acacias 1.<sup>28</sup>

**Celdas de placas corrugadas:** constituyen la primera etapa del proceso de tratamiento de aguas, por su configuración interna y por la diferencia de densidades efectúa la separación de las tres fases (agua, lodo y aceite). Además lleva a cabo dos etapas dentro del tratamiento, la coalescencia y la separación:

- ✓ **Coalescencia:** En la cual mediante el transporte de agua-crudo a través de un distribuidor primario, las gotas de aceite se dispersan y los sólidos se suspenden. Dicho distribuidor crea la oportunidad de colisión aleatoria para las gotas de aceite dispersas en el agua, cuando las gotas dispersadas chocan, se agrupan las gotas pequeñas formando gotas grandes.
- ✓ **Separación:** el efluente pasa por un amortiguador que distribuye el flujo hacia las placas corrugadas coalescentes (CPI Plate Pack). Estas placas tienen la forma de un panal de abejas y logran atrapar al aceite libre, cuando el tamaño de la partícula sea lo suficientemente grande, lo dejará escapar hacia la superficie, mientras que el lodo se irá hacia el fondo.

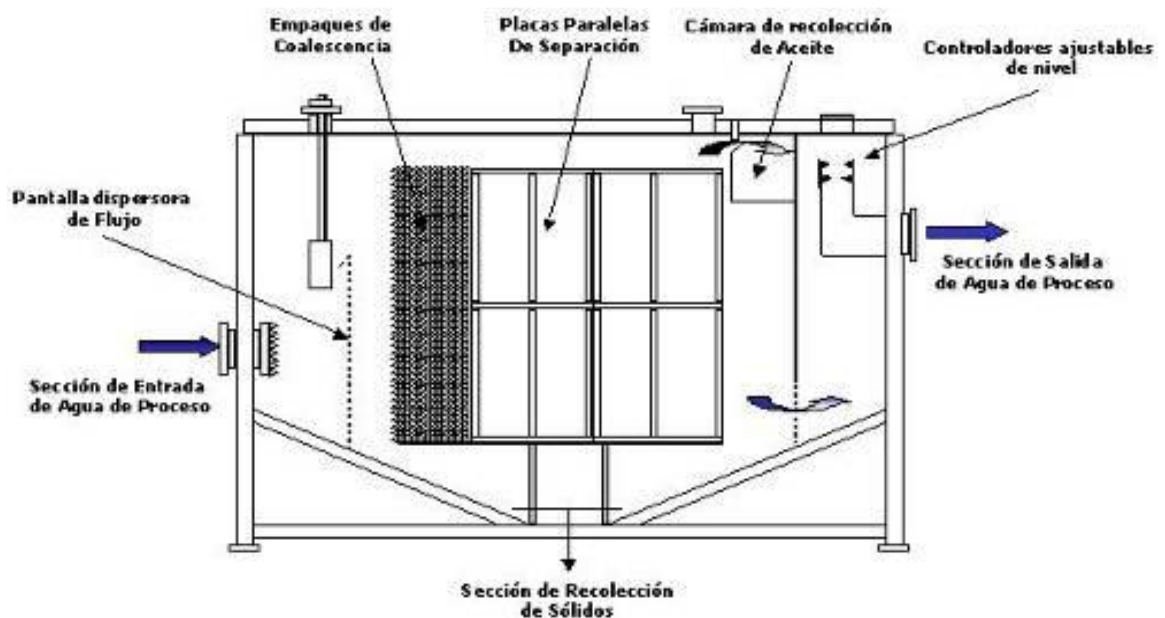
Estas celdas presentan 5 secciones esenciales para lograr la remoción de partículas de aceite y sólidos suspendidos que vienen contenidas en el agua de proceso:

- ✓ Pantalla dispersora de flujo, ubicada a la entrada de la unidad para optimizar el área de tratamiento.
- ✓ Compartimiento de empaques de coalescencia, donde el flujo de agua que lleva consigo aceite disperso y sólidos suspendidos, pasa a través de éste haciendo que las pequeñas partículas de aceite colisionen y se agrupen formando sucesivamente gotas más grandes y por otro lado las Placas paralelas de separación, donde el flujo de agua proveniente de la coalescencia pasa horizontalmente a través de los módulos estableciendo un flujo laminar de la corriente. Este módulo está compuesto por placas de 3 dimensiones hexagonales con inclinación de 60° y espaciadas 0.8, 0.46 o 1.33 pulgadas. Debido a esta disposición, se apoya la separación por diferencia de densidades conduciendo el aceite hacia la parte superior y los sólidos suspendidos hacia la parte inferior (Ver Figura 5).

<sup>28</sup> MONTES, Erik. Manual de operaciones estación de recolección y tratamiento Castilla 2. Castilla la Nueva, ECOPETROL S.A, 2007; p 42-70.

- ✓ Sección de recolección de aceite, que permite la acumulación de aceite proveniente de la separación y su posterior evacuación. En la parte superior de los CPIs, el aceite por rebose llega al compartimiento de aceite,
- ✓ Sección de recolección de sólidos, que permite la acumulación de sólidos provenientes de la separación y su posterior evacuación.
- ✓ Sección de salida de agua del proceso, que permite la evacuación del agua tratada y el control del nivel por rebose ajustable.
- ✓ Sección de cubierta, que permite el acceso hacia el interior del equipo y adicionalmente presenta sello en caso de desearse utilizar el equipo aislado de la atmósfera.

Figura 5. Secciones de las celdas de placas corrugadas.



Fuente Ecopetrol S.A.

**Celdas de flotación con gas inducido IGF:** La Celda de Flotación por gas Inducido (Depurador) es utilizada para remover aceite y sólidos suspendidos del agua. Estas celdas tienen un requerimiento de remoción del 100 % de partículas con diámetro entre 20-45 micrones, a la salida de las celdas de flotación la concentración de grasas y aceites y sólidos deberá ser inferior a 50 ppm, para garantizar la operación en los filtros cáscara de nuez. La celda cumple con esto

introduciendo una gran cantidad de burbujas de aire finamente diseminadas dentro del líquido. Bajo condiciones apropiadas de tratamiento químico, el aceite contaminante y las partículas de sólidos llegan a ser adheridos a las burbujas de aire y son llevados a la superficie del líquido para ser removidos como un material flotante por los desnatadores de la Celda.

La flotación de la espuma es un proceso de separación por gravedad mediante el cual unas burbujas de gas (o aire) son obligadas a colisionar y adherirse a una especie separable. A causa de la naturaleza hidrófoba de la superficie de la especie se establece una matriz gas-especie. Como resultado de la adherencia de las burbujas de gas, el efecto de boyanza (el cuerpo menos denso flota sobre el más denso) hará que dicha matriz ascienda a la superficie del líquido donde la especie es concentrada por medio de la colisión de la espuma previa a la remoción mediante desnatado.

**Sistema de filtración de agua de producción:** El flujo viaja a través del lecho filtrante a presión haciendo que atraviese los microespacios intergranulares y quedan retenidos los sólidos. El medio filtrante consiste de un lecho de tipo oleaginoso (cáscara de nuez), el cual por ser oleofílico retiene con facilidad grasas y aceites contenidos en el agua.

El requerimiento de remoción de estos filtros de cáscara de Nuez es del 100 % de partículas con diámetro entre 20 y 2 micrones. El proceso de filtración cuenta con tres secuencias básicas: Filtración, retrolavado y detención.

- ✓ Secuencia de Filtración: esta secuencia inicia con un ciclo de recirculación del agua del foso de succión de bombas, con el fin de evacuar y limpiar el agua que se encuentra quieta al interior del filtro, este ciclo tiene una duración de 3 minutos, luego de este tiempo el sistema inicia la filtración automáticamente y cada 55 minutos realiza un venteo del filtro durante 1 minuto. El ciclo continua durante 24 horas hasta el momento que se realice el retrolavado programado del filtro, este también se efectúa cuando se presenta una condición de alta presión diferencial o una solicitud de retrolavado manual por parte del operador.
- ✓ Secuencia de Retrolavado: para que la secuencia de retrolavado se ejecute se deben cumplir alguna de las tres condiciones requeridas (retrolavado programado, presión diferencial mayor de 10 psi o solicitud manual de retrolavado por parte del operador), cuando se inicia la secuencia se realiza un venteo durante 2 minutos para garantizar que el filtro este totalmente lleno de agua, después se alinean las válvulas de tal manera que ingrese agua por la parte inferior del filtro (abre válvula de habilitación de retrolavado y válvula salida de retrolavado), luego arranca la agitación durante 10 minutos en los cuales toda el agua se envía hacia el decantador asignado. Al finalizar se realiza un ciclo de recirculación para estabilizar y asentar el lecho filtrante, al terminar el sistema inicia la secuencia de filtración nuevamente.

- ✓ Secuencia de detención: esta secuencia se ejecuta cuando el operador detiene el sistema de filtración desde la pantalla de filtración general en el sistema de control, cuando el filtro entra en mantenimiento o cuando entra en falla, la secuencia detiene en modo seguro el filtro (cierra todas las válvulas y detiene el agitador) y detiene la bomba de succión correspondiente al filtro.

**Piscinas de aspersión:** permite la aireación, vaporización de las sustancias volátiles y foto-oxidación por la acción de factores climáticos tales como los rayos solares y los vientos, así como la biodegradación microbiana de los restos de hidrocarburos y la deposición por gravedad de los sólidos suspendidos. Así mismo permiten la remoción de los Fenoles.

En estas el agua es sometida a un proceso de enfriamiento por medio de un sistema de aspersión. En esta etapa del tratamiento se toma el agua de producción a una temperatura promedio de 180°F y su temperatura decrece hasta cerca de 80°F. El principio de operación del sistema de aspersión, como su nombre lo indica es dispersar el agua hasta llevarla al rocío, el objetivo es aumentar el área máxima de transferencia entre las gotas de agua y la corriente natural de aire, de esta manera se asegura una transferencia óptima de calor entre las dos corrientes.

**Piscinas de estabilización:** estas permiten la sedimentación de algunos sólidos suspendidos, grasas, la disminución de la temperatura.

Estas piscinas tienen una profundidad aproximada de 1,50 m y una inclinación de pared de aproximadamente 27° con respecto a la horizontal. Para disminuir el impacto al ambiente por filtración, éstas poseen capas de filtrante con material granular, arena, concreto y están provistas finalmente de una geomembrana.

### 2.2.2 Filosofía de operación del Sistema de Tratamiento Aguas de Producción STAP 1.<sup>29</sup>

Cabe mencionar que el agua a través de todo el proceso es monitoreada permanentemente por los técnicos de laboratorio para cumplir con las exigencias ambientales.

**Tratamiento Primario:** en esta etapa se recibe el agua de producción proveniente de la separación realizada en los tanques de surgencia, compensación y lavado a través de un cabezal.

---

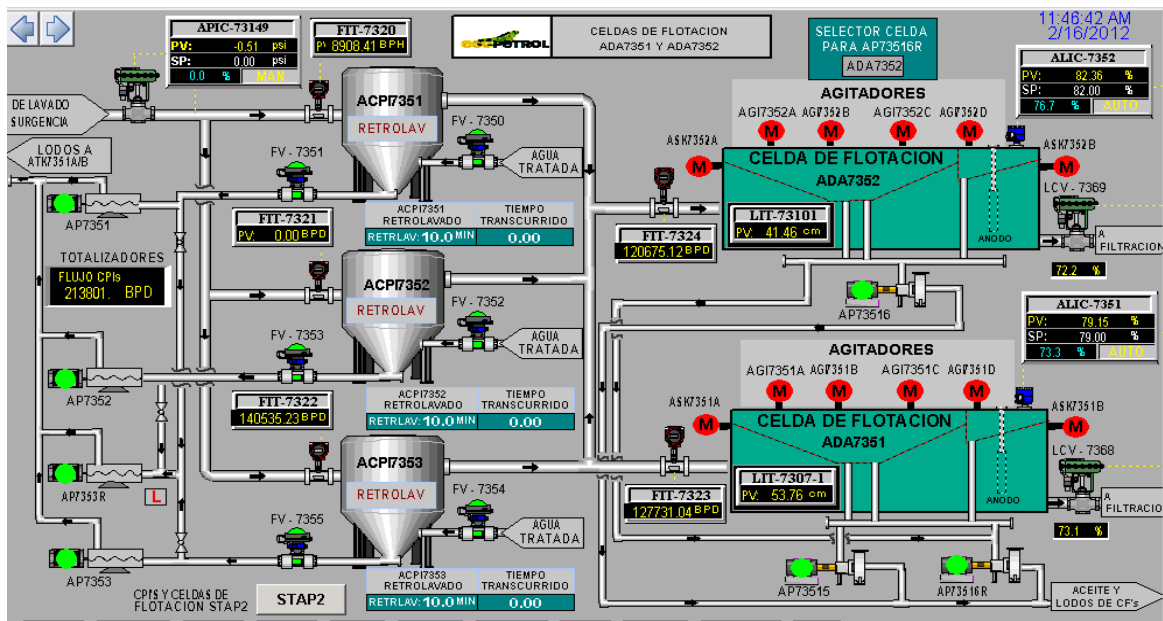
<sup>29</sup> MANUAL DE BASES DE DISEÑO. ECOPEPETROL S.A. 2011.

El cabezal principal de agua sale de los tanques de surgencia, donde se ha separado el 60-70% del agua proveniente de los pozos. Posteriormente a este cabezal se le une el agua retirada en el tanque de compensación y en los tanques de lavado.

Esta agua posteriormente es enviada al colector principal del STAP 1, luego la corriente es alineada a través de un arreglo simétrico de tal forma que la hidráulica garantiza un flujo igualitario a cada uno de los equipos y así se evita el flujo preferencial hacia alguna de las unidades de CPI's que constituyen la primera etapa de separación del sistema, el arreglo inicia en un cabezal de 20" donde se divide en dos líneas de 18" y posteriormente en tres líneas de 16" de diámetro

La primera etapa de tratamiento en los STAP tiene como objetivo principal realizar una separación de aceite y sólidos, a través de un proceso físico de separación por diferencia de densidades con la ayuda de medios mecánicos como CPI. El aceite separado fluye ascendentemente y es recogido en la parte superior de los equipos para posteriormente ser bombeado al sumidero principal. El agua resultante del proceso, aún con trazas de aceite y sólidos, pasa a través de una línea como se aprecia en la siguiente figura que intercomunica los equipos de esta primera etapa con la siguiente, proceso que se realiza por gravedad para no aumentar los requerimientos de energía del sistema.

Figura 6. Celdas de placas corrugadas y celdas de flotación STAP 1.



El compartimiento donde se recoge el aceite del CPI tiene un sistema de control de nivel con alarmas que permita su evacuación sin que se presenten derrames.

Los lodos separados del agua en esta etapa van hacia el fondo de los recipientes, los cuales son evacuados mediante un sistema de bombas de retrolavado hacia las barcasas. Dependiendo de las variaciones en la concentración de sólidos de la corriente de entrada la acumulación será mayor o menor, por lo cual el sistema de evacuación de lodos tiene un sistema temporizado en el que puedan graduarse los tiempos dependiendo de la acumulación observada a través del monitoreo por parte del operador de la planta. Así mismo se cuenta con un sistema de control de nivel con protección bajo-bajo para las bombas.

Adicionalmente, sí se observa algún comportamiento anormal de los equipos, producto de una elevada acumulación de lodos en el fondo, el sistema cuenta con el mecanismo para que el técnico operador manualmente pueda efectuar el proceso de evacuación de lodos en cualquier momento desde el cuarto de control.

**Tratamiento Secundario:** la segunda etapa del tratamiento de agua consiste en realizar un proceso de flotación por gas inducido, para lograr la separación de aceites con la ayuda de burbujas ascendentes que arrastren el aceite a la superficie y pueda ser retirado mediante un sistema de rebose.

El agua proveniente de los CPI's fluye por gravedad hacia las celdas de flotación por un arreglo simétrico para evitar flujo preferencial al igual que la entrada a los CPI's. Cada uno de los CPI's cuenta con dos salidas de agua de 16" que se unen a una línea común de 18", esta conduce la corriente de forma proporcional hacia las 2 celdas de flotación. Se debe tener en cuenta que estas salidas de CPI's no cuentan con válvula de control.

Antes de ingresar el agua de producción a las celdas de flotación se le inyecta entre 60 y 70 gls/día de polímero diluido al 0.5%, cuya función es decantar los sólidos.

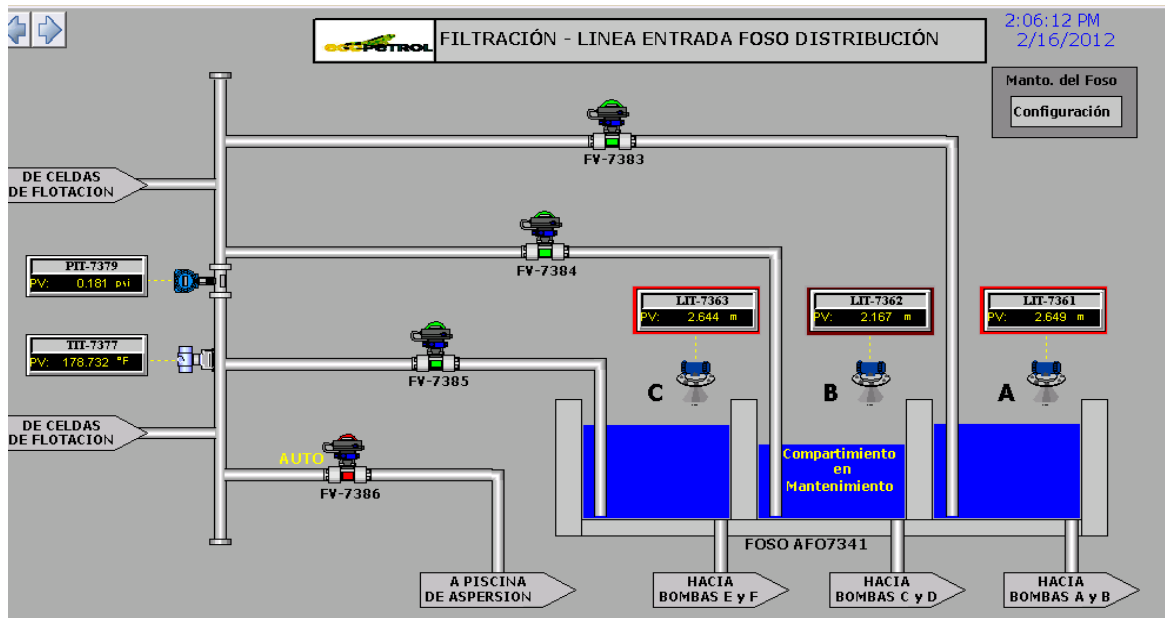
Cada una de las celdas de flotación del STAP 1 cuentan con 4 agitadores verticales y 2 desnatadores o skimer uno por cada lado, transmisores de nivel y válvula de control de nivel a la salida, los cuales son parte principal del proceso de separación. (Ver figura 6).

El aceite separado es recogido en la parte superior de las celdas mediante raspadores y almacenado en una cámara para ser bombeado a las barcasas junto con los lodos. Gracias a la señal enviada por los transmisores ubicados en la parte superior de cada celda, las bombas de lodos se accionan automáticamente.

La corriente de agua tratada en flotación es conducida a un foso que cuenta con 6 bombas que envían el agua hacia la siguiente etapa de tratamiento. Este sistema

cuenta con tres transmisores de nivel, un transmisor de temperatura y uno de presión. Por lo tanto posee su respectivo control de nivel y alarmas. (Ver figura 7).

Figura 7. Línea de entrada a foso de distribución.



Cortesía Ecopetrol S.A.

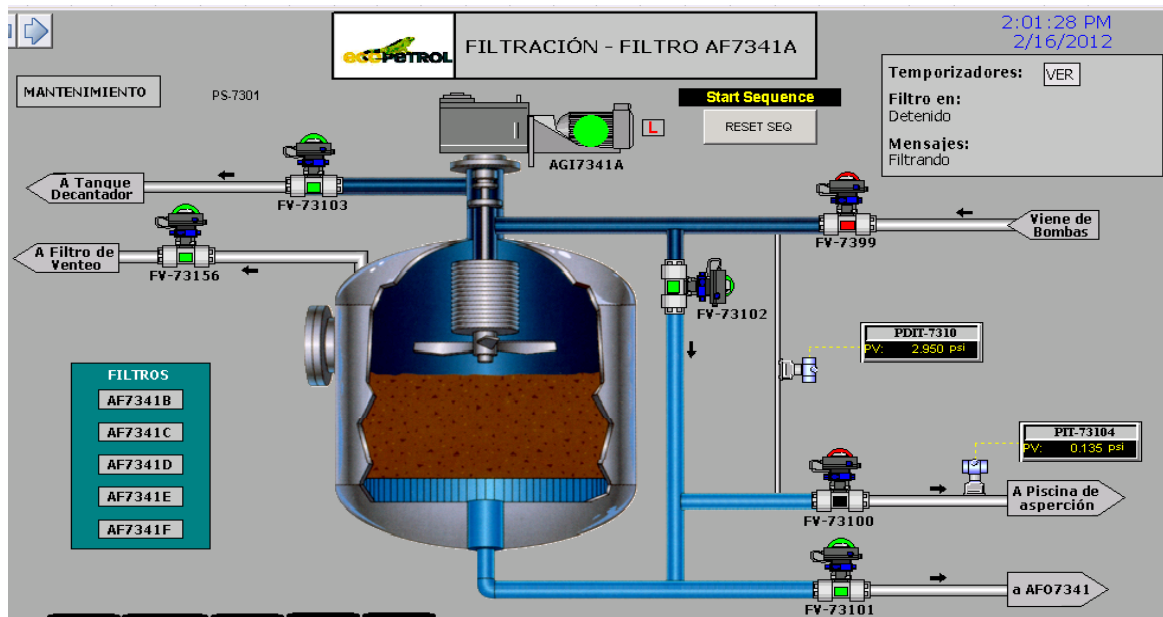
Se debe tener en cuenta que el foso se encuentra dividido en tres compartimientos interiores (A/B/C), en los que se garantiza niveles similares en cada uno por la aplicación del principio de vasos comunicantes. Las bombas se encuentran por parejas succionando de cada uno de estos compartimientos.

Las bombas succionan agua del foso y la descargan en el filtro asignado para cada bomba. Sin embargo, se cuenta con la facilidad de alineación de las bombas con cualquiera de los filtros disponibles por medio del cabezal de 10" y la operación de las válvulas ubicadas en el múltiple principal y en el múltiple de respaldo ubicados en el área de entrada a filtros. Las bombas de filtros en su línea de descarga posee transmisores de presión y temperatura con alarmas para alto y bajo.

**Tratamiento Terciario:** la tercera etapa del tratamiento es la filtración en filtros de cáscara de nuez negra, en esta etapa se retiran el remanente de aceites y sólidos de las etapas anteriores.

A continuación se muestra un esquema de estos filtros. .

Figura 8. Filtro cascara de nuez STAP 1.



Cortesía Ecopetrol S.A.

El agua de alimentación a filtración proviene de un sistema de bombas que garantizan un caudal constante para garantizar el correcto funcionamiento de los filtros.

El retro lavado para retirar los aceites y sólidos acumulados dentro del filtro funciona automáticamente con temporizador, por alta presión diferencial ( $\geq 10$  psi) o por acción manual desde el cuarto de control. El sistema de control garantiza que sólo un filtro esté en proceso de retro lavado, pues nunca pueden estar dos filtros en retrolavado al mismo tiempo.

La corriente de salida de agua del proceso de filtración es direccionada hacia la etapa de enfriamiento en las piscinas de aspersión.

**Tratamiento de lodos de retro lavado de filtros:** los lodos provenientes del retro lavado de los filtros son deshidratados en los decantadores. Estos tienen un tiempo de retención de 8 horas que permita obtener a la salida lodos parcialmente deshidratados para ser tratados en las barcazas.

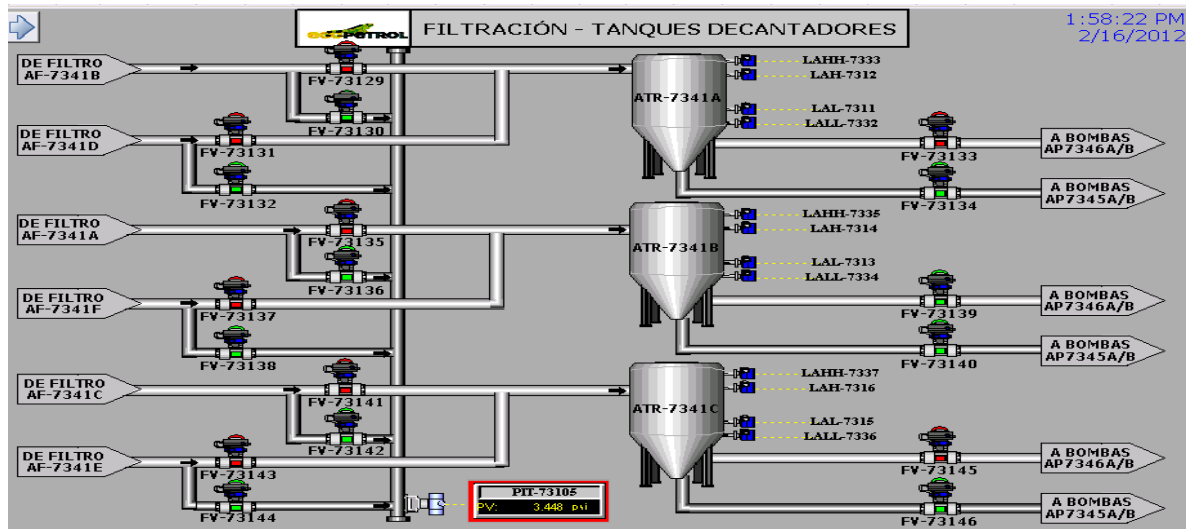
Cada decantador recibirá normalmente los retrolavados de 2 filtros (pareja), sin embargo en caso de contingencia podrán ser alineados con las respectivas válvulas ON/OFF desde el Delta V para recibir retrolavados de los otros filtros.

Cada decantador cuenta con 4 interruptores de nivel (Alto-Alto, Alto, Bajo y Bajo-Bajo), cuya función es informar al operador del estado del nivel en las diferentes etapas (llenado, tratamiento y vaciado).

Los decantadores a la entrada cuentan con un múltiple, donde se encuentran normalmente abiertas las válvulas que se usan para alinear el decantador con sus dos filtros asignados y un segundo múltiple de válvulas que permiten alinear cualquier filtro con cualquier decantador (Ver figura 9), esta función la realiza automáticamente el sistema de control según las dos condiciones de disponibilidad siguientes:

- ✓ El proceso de decantación dura 8 horas, después de una hora de proceso el decantador no estará disponible para recibir el retrolavado de otro filtro.
- ✓ El decantador está diseñado para realizar el tratamiento de máximo dos retrolavados, cuando esto sucede el switch de nivel LAH se activara y el sistema no permitirá el recibo de otro retrolavado

Figura 9. Decantadores sistema de tratamiento de aguas de producción STAP 1.



Cortesía Ecopetrol S.A.

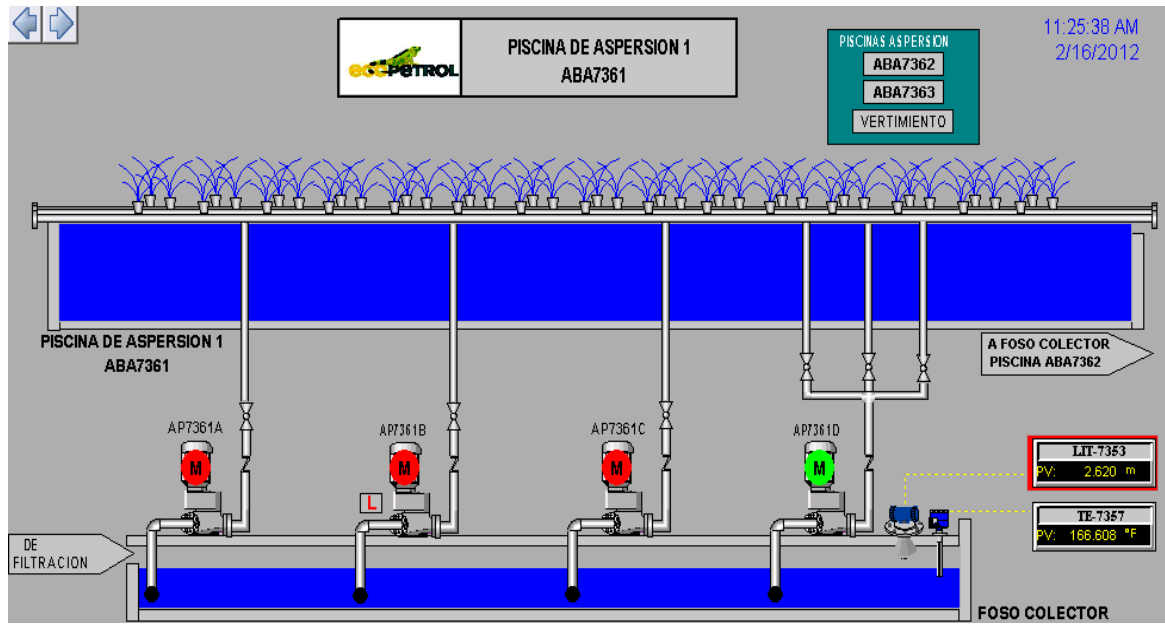
El agua resultante de la decantación es succionada con una bomba centrífuga que posteriormente la descarga al colector principal del STAP 1.

**Enfriamiento y estabilización:** el sistema de enfriamiento está conformado por piscinas de aspersión, que cuentan en cada una de sus secciones con 4 bombas verticales tipo centrifugas.

La piscina de aspersión para el STAP 1 cuenta con 3 pasos, los cuales se comunican mediante canales en serie (Ver figura 10). El proceso inicia con el ingreso del agua proveniente del colector de filtros por una línea de 24" a un foso, el cual se comunica con el canal de entrada de la primera piscina que conduce el fluido a un foso de bombas, las cuales posteriormente descarga en tres líneas. A continuación el agua se esparce por medio de unos difusores, que se encargan de oxigenarla, reducir los Fenoles y bajarle la temperatura, después de esto sale a un

canal que se encuentra en la parte de atrás de la primera piscina, que se comunica con el canal de entrada de la segunda piscina. El proceso se repite para las demás piscinas.

Figura 10. Primera piscina de aspersión STAP 1.



Cortesía Ecopetrol S.A.

Se debe tener en cuenta que las piscinas se intercomunican mediante compuertas, las cuales permiten la mezcla del fluido procedente de cualquiera de ellas, esto se efectúa para bajarle temperatura mediante transferencia de calor.

El sistema cuenta con control de nivel y alarmas para la protección de las bombas y el posible desborde de las piscinas de aspersión.

El agua tratada en la tercera piscina es enviada mediante un canal a la piscina de estabilización. Allí el fluido realiza su recorrido hasta llegar a una trampa de aceite en concreto que se encuentra en la mitad de la primera sección de la piscina. Luego continúa fluyendo hasta la segunda sección de la piscina donde pasa por una trampa de grasa metálica, por último esta llega a un canal que distribuye el agua hacia una cámara de aquietamiento y al canal de entrada del foso de vertimiento como se muestra en la siguiente figura.

En esta etapa del tratamiento, al agua se le da un tiempo de residencia aproximadamente de 3 horas.

Figura 11. Secciones piscina de estabilización de la estación Acacias 1.





**Bombeo hacia vertimiento:** se tiene un foso con 8 bombas para vertimiento. El sistema opera con control de nivel para garantizar que el foso no se rebose y no se desocupe. El sistema cuenta con alarmas de alto nivel y protección de bajo-bajo nivel para las bombas.

Estas bombas envían el agua tratada por una línea de 36" hacia el río Guayuriba y el Área de sostenibilidad en Agroenergía (ASA).

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REMOCIÓN DE FENOLES CON DIÓXIDO DE CLORO IMPLEMENTADO EN LA ESTACIÓN ACACIAS 1

En la actualidad el agua de producción de la Gerencia de Operaciones Castilla cumple los criterios de calidad establecidos en el decreto 1594/84 artículo 74 para usos de aguas y residuos líquidos.

Las futuras facilidades de tratamiento de aguas de producción en la estación Acacias 1 son los STAP 3, 4 y 5, estas contemplan el uso de torres de enfriamiento y la eliminación de las actuales piscinas de aspersión de los STAP 1 y 2 que contribuyen a la eliminación de los fenoles del agua de producción. Por lo tanto Ecopetrol S.A. en busca de alternativas que le permitan cumplir con la normatividad ambiental, realizó una prueba tecnología para remoción de fenoles mediante la utilización del Dióxido de Cloro.

Así mismo esta prueba constituye la primera evaluación de un sistema alternativo para remoción de fenoles en la estación Acacias 1, puesto que se tenía la disponibilidad del producto cercana al campo, su instalación era sencilla, se contaba con el área necesaria para ubicarla y finalmente porque requirió bajos costos de inversión para la empresa.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL DIÓXIDO DE CLORO<sup>30 31</sup>

El dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) es un selectivo y poderoso agente oxidante, es un gas con un peso molecular de 67,46 de color amarillo verdoso a temperatura ambiente y tiene un olor similar al cloro. Es inestable a altas concentraciones y puede explotar con la exposición al calor, luz, chispas eléctricas o golpes, por lo tanto nunca es envía a granel, sino que se genera *in situ*. Ya que el dióxido de cloro es muy soluble en el agua las soluciones acuosas se preparan generalmente a partir del dióxido de cloro gaseoso generado. Este no se hidroliza en el agua como el cloro y se mantiene en su forma molecular como  $\text{ClO}_2$ .

La capacidad biocida del Dióxido de Cloro sobrepasa a la del cloro y sus derivados. Debido a sus cualidades de oxidante selectivo, su aplicación es una alternativa a ser considerada donde además de la desinfección se requiere mejorar la calidad organoléptica del agua. Tiene un gran efecto en el control del

---

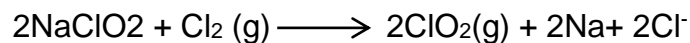
<sup>30</sup> DEININGER, R.; ANCHETA, A.; ZIEGLER, A. Dióxido de Cloro. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva. 1998. Publicado también en CD-ROM Disponible en la OPS/CEPIS.

<sup>31</sup> SINGER, Philip C. y RECKHOW, David A. Chemical Oxidation. Quinta edición. McGraw-Hill, New York, 1999. p. 16-18.

sabor y el olor, además destruye sustancias orgánicas que proporcionan color o que son precursoras de trihalometanos (THM). Por ello, se aplica especialmente cuando las aguas contienen altas concentraciones de precursores, que con la cloración tradicional darían lugar a la formación de subproductos de la desinfección.

El dióxido de cloro se genera normalmente por reacción de clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ) con cloro gaseoso ( $\text{Cl}_2$ ) o ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ) en condiciones ácidas, de acuerdo con las siguientes reacciones:

Ecuación 5. Reacción del Clorito de Sodio con Cloro Gaseoso para producir Dióxido de Cloro.

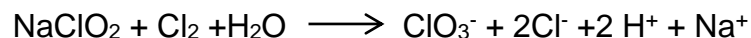


Ecuación 6. Reacción del Clorito de Sodio con Ácido Hipocloroso para producir Dióxido de Cloro.



Con el fin de llevar la reacción hasta su finalización y evitar la presencia de clorito sin reaccionar ( $\text{ClO}_2^-$ ) en la corriente de producto, algunos generadores utilizan cloro en exceso, aunque se han desarrollado diversas variaciones en el diseño del generador que permiten que el clorito de sodio se convierte completamente en dióxido de cloro sin utilizar el exceso de cloro. Adicionalmente, para superar la basicidad del clorito de sodio y el hidróxido producido (ecuación 6), se añade a veces ácido junto con el ácido hipocloroso para mantener el pH óptimo para la generación de dióxido de cloro. Normalmente, son preferibles los valores de pH en el rango de 3.5 a 5.5; los valores de pH más ácidos conducen a la formación de clorato ( $\text{ClO}_3^-$ ):

Ecuación 7. Formación de Clorato.



El dióxido de cloro también puede ser preparado por la acidificación de una solución de clorito de sodio:

Ecuación 8. Acidificación de una solución de Clorito de Sodio.



Una vez generado el dióxido de cloro se puede disolver en agua y es estable en la ausencia de luz y elevadas temperaturas. En presencia de este último, o con alto valores de pH, formara clorito y clorato, los cuales son indeseables en el agua:

Ecuación 9. Formación de Clorito y Clorato.



Como se mencionó anteriormente una de las principales aplicaciones del Dióxido de Cloro es el control del gusto y el olor, aunque también es un oxidante eficaz para la reducción de hierro y manganeso y es un buen desinfectante primario. Una de las propiedades más interesantes del Dióxido de Cloro es su eficacia biocida en un amplio rango de pH (3 a 9). Una de sus principales ventajas es que no reacciona con el amoníaco. Por lo tanto, se requiere dosis mucho más bajas de dióxido de cloro para la mayoría de las aplicaciones de oxidación en comparación con la dosificación requerida por el cloro. Otra ventaja es que el dióxido de cloro no entra en reacción de sustitución con la materia orgánica en el mismo grado que lo hace el cloro libre y en consecuencia no forma Trihalometanos, Ácidos Haloacéticos, o la mayoría de otros subproductos halogenados comúnmente observados que resultan de la cloración. Se han identificado en el tratamiento de agua un número de subproductos de la oxidación con dióxido de cloro, por ejemplo: aldehídos, ácidos carboxílicos y algunos compuestos halogenados, pero la mayoría de estos estaban presentes en concentraciones extremadamente bajas.

Debido a que no tienden a formar subproductos halogenados en un grado significativo, el Dióxido de Cloro en la actualidad es de gran interés como oxidante en el tratamiento de agua. Un beneficio adicional es que el Dióxido de Cloro reacciona muy lentamente con el bromuro, por lo tanto los subproductos bromados ya sean orgánicos o inorgánicos (bromato), no son una preocupación después del tratamiento con dióxido de cloro.

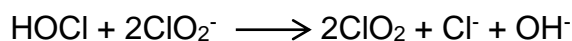
Como resultado, el clorito se considera que es el principal subproducto de la oxidación con dióxido de cloro. La mayoría de los investigadores como Werdehoff y Singer en 1987 han informado que aproximadamente el 50 al 70% (en masa) del dióxido de cloro aplicado durante el proceso de tratamiento de agua termina como clorito.

Basados en estudios con animales de laboratorio se ha demostrado que el clorito exhibe un número potencial de efectos adversos sobre la salud. Dado lo anterior las entidades regulatorias establecen niveles máximos de este contaminante.

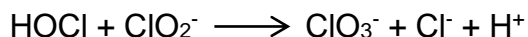
Teniendo en cuenta que el Dióxido de Cloro es rápidamente consumida durante el proceso de tratamiento de agua y que hasta un 70% de la Dióxido de Cloro aplicado se reduce a clorito, el límite superior práctico para la dosis del Dióxido de Cloro sería aproximadamente 1.4 a 1.5 mg/L a menos que se elimina el clorito.

Una preocupación adicional asociada con el residual de clorito es que este reacciona con el cloro libre, produciendo bajos niveles de dióxido de cloro o clorato:

Ecuación 10. Reacción de Dióxido de Cloro con Ácido hipocloroso que produce niveles bajos de Dióxido de Cloro.



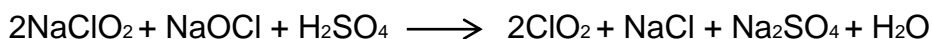
Ecuación 11. Reacción de Dióxido de Cloro con Ácido hipocloroso que produce bajos niveles de clorato.



El clorito, si está presente como resultado de la oxidación incompleta del clorito de sodio en el generador de dióxido de cloro (Ecu. 5 y 6) o por la reducción química del Dióxido de Cloro durante el proceso del tratamiento, puede eliminarse del agua mediante la aplicación de sales de hierro ferroso o compuestos de azufre reducido. No está disponible ningún método práctico para la eliminación del clorato; por lo tanto su formación durante la generación de dióxido de cloro debe ser minimizada.

Otras de las formas comunes de generar el Dióxido de Cloro es mediante la reacción de clorito de sodio con hipoclorito de sodio y ácido sulfúrico (sistema de tres compuestos químicos):

Ecuación 12. Sistema de tres componentes para generar Dióxido de Cloro.



Una aclaración es, sin embargo, pertinente. Se han desarrollado nuevas tecnologías y formas de producción de Dióxido de Cloro que hacen que esta técnica de tratamiento sea más atractiva e innovadora, entre las cuales se encuentra la evaluada en esta monografía.

El Dióxido de Cloro reacciona en el agua con compuestos fenólicos, sustancias húmicas, sustancias orgánicas e iones metálicos. Este se ha utilizado ampliamente en el tratamiento de aguas residuales industriales para eliminar los fenoles presentes en las corrientes residuales de la producción de químicos, plásticos y petróleo. Así mismo gracias a su poder biocida es usado en la desinfección de torres de refrigeración, tratamiento de emisiones industriales, producción de alimentos, oxidación de residuos industriales y esterilización de equipo médico.

El Dióxido de Cloro es utilizado como un tratamiento rentable en las siguientes aplicaciones:

- ✓ Eliminación de películas biológicas: La película biológica protege a los patógenos de los efectos de los biocidas que los pueden matar o inhibir sus funciones. El Dióxido de Cloro ( $\text{ClO}_2$ ) rompe esta película eliminando dichos patógenos y no permite que vuelvan a generarse.
- ✓ Es usado en el tratamiento de aguas para consumo humano, en la remoción de manganeso, hierro olores y sabor del agua, garantizando una excelente calidad al consumidor.

- ✓ Elimina la coloración de la lignina presente en la pulpa del papel, obteniéndose resultados óptimos en la fabricación de papel de alta calidad.
- ✓ En campos petroleros, se está evaluando su eficiencia para romper emulsiones y geles, en las fases de perforación y exploración de los pozos.
- ✓ En la industria de alimentos, el dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) se ha utilizado con mejores resultados que el cloro, evitando formación de trihalometanos y otros compuestos que puedan afectar la calidad de vida de los consumidores.
- ✓ Actualmente se desinfectan alimentos, utensilios y máquinas procesadoras de alimentos.
- ✓ Tratamiento de agua de proceso para industria textil.
- ✓ Tratamiento de agua de inyección en la industria del petróleo y fluidos de fracturamiento.
- ✓ Reducción de color, control de olores.
- ✓ Oxidación de H<sub>2</sub>S.
- ✓ Tratamiento de agua para usos agrícolas.
- ✓ Soluciones de procesamiento de cuero.

Entre las ventajas del Dióxido de Cloro se encuentran las siguientes:

- ✓ Es más eficaz que el cloro y las cloraminas para la inactivación de virus, Cryptosporidium y Giardia. .
- ✓ Oxida el hierro, manganeso y sulfuros. .
- ✓ Puede mejorar el proceso de clarificación. .
- ✓ El gusto y los olores resultantes de las algas y la vegetación en descomposición, así como compuestos fenólicos, son controlado por el dióxido de cloro.
- ✓ Bajo condiciones adecuadas de generación (es decir sin exceso o presencia de cloro), los subproductos sustituidos con halógeno no son formada.
- ✓ El dióxido de cloro es fácil de generar y provee residuales.

Las desventajas del Dióxido de Cloro para cuando se genera con cloro en exceso son:

- ✓ El proceso de dióxido de cloro se forma el clorito y el clorato subproductos específica.
- ✓ La eficiencia del generador y la dificultad de optimización pueden causar un exceso de cloro para ser alimentado en el punto de dosificación, lo que potencialmente puede formar subproductos de desinfección halógenos sustitutos. .
- ✓ Los costos asociados con la capacitación, muestreo y pruebas de laboratorio para el clorito y clorato son altos. .
- ✓ Equipo está típicamente alquilado, y el costo del clorito de sodio es alto. .

Algunas de las desventajas para todos los sistemas de generación de Dióxido de Cloro son:

- ✓ El gas de dióxido de cloro es explosivo, por lo que debe generarse en el lugar.
- ✓ El dióxido de cloro se descompone en la luz del sol. ·

La tasa de producción apropiada de dióxido de cloro dependerá de la gravedad de la contaminación, el grado de control deseado, el tamaño del sistema y la concentración necesaria para el control eficaz.

### **3.1.1 Efectos potenciales para la salud por la exposición al gas de Dióxido de Cloro.**<sup>32</sup>

El gas de dióxido de cloro es un fuerte irritante de las vías respiratorias. Una elevada exposición al mismo puede producir espasmo bronquial y edema pulmonar, cuya aparición puede demorarse. También puede producir fuerte dolor de cabeza, náuseas y tos. Todos los síntomas pueden tardar en aparecer y ser de larga duración. Una exposición prolongada puede causar bronquitis.

Es irritante con el contacto con la piel, se pueden presentar quemaduras cutáneas graves y enrojecimiento. En fase gaseosa puede absorberse, causando daños en los tejidos y las células sanguíneas.

El dióxido de cloro es irritante del ojo. La exposición puede causar quemaduras graves y perturbaciones visuales, tales como visión de halos en torno a las luces. El daño en la córnea puede ocurrir si no se lava inmediatamente los ojos.

El dióxido de cloro es tóxico por ingestión, este puede causar anemia por exposición oral. El dióxido de cloro seco tiene un LD50 oral (ratas) de 165 mg/kg y en solución tiene un LD50 oral (ratas) de 350 mg/Kg. El dióxido de cloro seco y en solución tiene un LD50 dérmico (conejos) mayor a 2 g/Kg.

No hay estudios de cáncer en seres humanos expuestos al dióxido de cloro, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la EPA han determinado que el dióxido de cloro y el clorito de sodio no son clasificables en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. Además no hay ninguna evidencia de que el dióxido de cloro afecte la reproducción en seres humanos.

---

<sup>32</sup> TECHNICAL DATA SHEET, Treatment of Drinking Water with Chlorine Dioxide (ClO<sub>2</sub>). Vulcan Chemicals. Alabama. Internet: (<http://www.elaguapotable.com/ClO2.pdf>).

### 3.1.2 Almacenamiento y manipulación.<sup>33</sup>

La mejor manera de almacenar el dióxido de cloro es en su forma líquida a 4°C de temperatura para que sea estable, no se debe almacenar durante mucho tiempo porque se disocia lentamente en cloro y oxígeno. No se suele almacenar como gas porque es explosivo bajo presión. Cuando las concentraciones alcanzan más del 10% en el aire, puede existir un peligro de explosión. En solución acuosa, el dióxido de cloro permanece estable y soluble. El dióxido de cloro disuelto en agua hasta concentraciones de un 1% ClO<sub>2</sub> (10 g/L) pueden almacenarse de manera segura respetando ciertas condiciones particulares como la no exposición a la luz o interferencias de calor. El dióxido de cloro no se transporta normalmente, por su riesgo explosivo y de inestabilidad, este se genera normalmente en el sitio donde va a ser utilizado.

Se debe tener en cuenta no contaminar, ni almacenar, ni transportar el dióxido de cloro con materiales incompatibles, tales como suciedad, materia orgánica, oxidantes, agentes reductores, productos químicos, productos de jabón, disolventes, ácidos, productos de pintura o materiales combustibles. La contaminación de este puede iniciar una reacción química con generación de calor y emisiones de dióxido de cloro (gas explosivo venenoso). Puede producirse un incendio o una explosión.

El dióxido de Cloro es incompatible con el monóxido de carbono, metano, etano, propano, etileno o butadieno, a contacto con estos puede explotar espontáneamente.

No permita que la solución se evapore hasta estar seco, pues representa un riesgo de incendio o explosión si se deja secar y puede arder en contacto con materias combustibles.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO COMERCIAL UTILIZADO EN LA PRUEBA TECNOLÓGICA<sup>34 35</sup>

El producto químico utilizado es un agente oxidante relativamente fácil de manejar cuando se usan las debidas precauciones de seguridad (Ver anexo A). Este es una mezcla patentada de dos productos químicos, el clorato de sodio (40% en peso) y el peróxido de hidrógeno (8% en peso), como se muestra en la ecuación 13.

---

<sup>33</sup> TECHNICAL DATA SHEET, Treatment of Drinking Water with Chlorine Dioxide (ClO<sub>2</sub>). Vulcan Chemicals. Alabama. Internet: (<http://www.elaguapotable.com/ClO2.pdf>).

<sup>34</sup> ECOLAB. Purate. Internet: (<http://www.ecolab.com/product/purate/?program=purate-chlorine-dioxide-systems>).

<sup>35</sup> PURATE, LEADING ClO<sub>2</sub> TECHNOLOGY. AKSOL NOBEL, EKA CHIMICAL. 2008.

De ahora en adelante se denominara en esta monografía “**producto comercial**” a la mezcla del Peróxido de Hidrogeno y Clorato de Sodio.

Ecuación 13. Reacción para producir Dióxido de Cloro a partir de Clorato de Sodio, Peróxido de Hidrógeno y Ácido Sulfúrico.



La reacción química que tiene como producto el Dióxido de Cloro requiere el producto comercial y ácido sulfúrico como químicos precursores.

Basados en el catálogo del producto comercial utilizado se encuentra que entre sus ventajas se destaca que se encuentra libre de cloro elemental a diferencia de las otras tecnologías que requieren exceso de este elemento para producir el Dióxido de Cloro, por lo tanto previene la formación de subproductos derivados de la cloración directa con la materia orgánica, como los Trihalometanos.

Se debe tener en cuenta que la solución de Clorato de Sodio y Peróxido de Hidrogeno debe mantenerse entre 40°F y 100°F para conservar las condiciones adecuadas de almacenamiento. En casos que la temperatura de la solución descienda por debajo de 40°F, el clorato de sodio puede comenzar a cristalizarse y precipitarse fuera de la solución, lo cual dará lugar a problemas de funcionamiento con la unidad de generación.

Este oxidante ha sido probado en varias industrias como: papelera, química, sistemas de tratamiento de aguas potables y residuales.

En el anexo B se muestra la hoja de datos de seguridad del Dióxido de Cloro utilizado en la prueba de la estación Acacias 1. En el anexo C se encuentra la hoja de datos de seguridad del ácido sulfúrico.

### **3.3 GENERADOR DE DIÓXIDO DE CLORO<sup>36</sup>**

Para la producción de Dióxido de Cloro gaseoso in situ se utilizó un equipo de generación de Dióxido de Cloro, que tiene la capacidad de producir aproximadamente 18 kg/hora, lo suficiente para tratar un volumen de 480.000 BWPD, con niveles de fenol superiores a 1 ppm. Por lo tanto este generador tiene la capacidad de producir el Dióxido de Cloro necesario requerido para tratar el volumen actual de agua de producción manejado por los dos sistemas de tratamiento de aguas de producción (STAP´s 1 y 2) de la estación acacias 1, cuya capacidad individual es de 240000 BWPD.

---

<sup>36</sup> ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARA GENERADOR DE DIÓXIDO DE CLORO SVP-PURE MSA-M18-M18. AKSOL NOBEL, EKA CHIMICAL. 2008.

El sistema de generación de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) está constituido por un generador que a través de dosificaciones precisas de producto químico y de ácido sulfúrico al 78% en peso, alimentan un reactor diseñado para producir Dióxido el cloro, con una eficiencia superior al 95% y una rata de producción de 2 a 18 kg/h sin la generación de cloro elemental como lo indica la ecuación 12.

El generador es una unidad de multi-ácido concentrado que tiene la capacidad de aceptar concentraciones de ácido sulfúrico por encima de 78% en peso. La concentración inicial de ácido sulfúrico es inserta en el programa del PLC y el generador ajusta la dosificación de las bombas para dar la cantidad requerida de ácido sulfúrico al 78% al reactor. Esta unidad incluye una bomba adicional para la el agua de dilución y un intercambiador de calor para enfriar el ácido diluido antes de la inyección en el reactor. El agua de refrigeración de alivio de presión está instalada para proteger de daño el intercambiador de calor por una presión excesiva. Un sensor de flujo supervisa el flujo de agua de refrigeración y desconecta el generador si se indica un bajo flujo.

El gabinete permite visualizar desde afuera los equipos de generación, su carcasa es resistente a los materiales corrosivos y compatibles con los insumos utilizados, tiene un sistema de colectores de químicos y no necesita de sistema de aireación para dispersión de gas, o uso de sistemas de vacío adicionales.

Las bombas dosificadoras de químicos y de agua de dilución para el ácido tienen un control de velocidad variable (VFD) o de impulsos electrónicos (medición prominente o similar) y se utilizan para dosificar la cantidad correcta de químicos en el reactor. Las bombas dosificadoras tienen un recubrimiento que las hace compatibles con los productos bombeados.

El reactor opera manteniendo un vacío y no requiere de un tanque pulmón. El generador necesita un suministro de agua a través de una bomba booster. Esta es la responsable de presurizar el agua de arrastre aproximadamente a 7 bar y de esta forma generar el vacío al ser pasada por el eyector (venturi) del generador. (Ver figura 12).

El generador tiene un sistema de monitoreo y bloqueos para garantizar la completa seguridad en la generación de  $\text{ClO}_2$ , incluyendo el control de vacío y el seguimiento de la variación del flujo de agua de proceso en la que el  $\text{ClO}_2$  será absorbido. Así mismo este ajusta automáticamente la tasa de producción. La operación del generador es controlada y monitoreada por un controlador lógico programable (PLC).

El generador utilizado en la prueba está compuesto por: un gabinete, un reactor fabricado en fibra de vidrio, tres bombas de dosificación de productos químicos, tres columnas de calibración en PVC para las bombas dosificadoras, un eyector fabricado en CPVC, un medidor de flujo de agua tipo magnético (flujo de agua en el

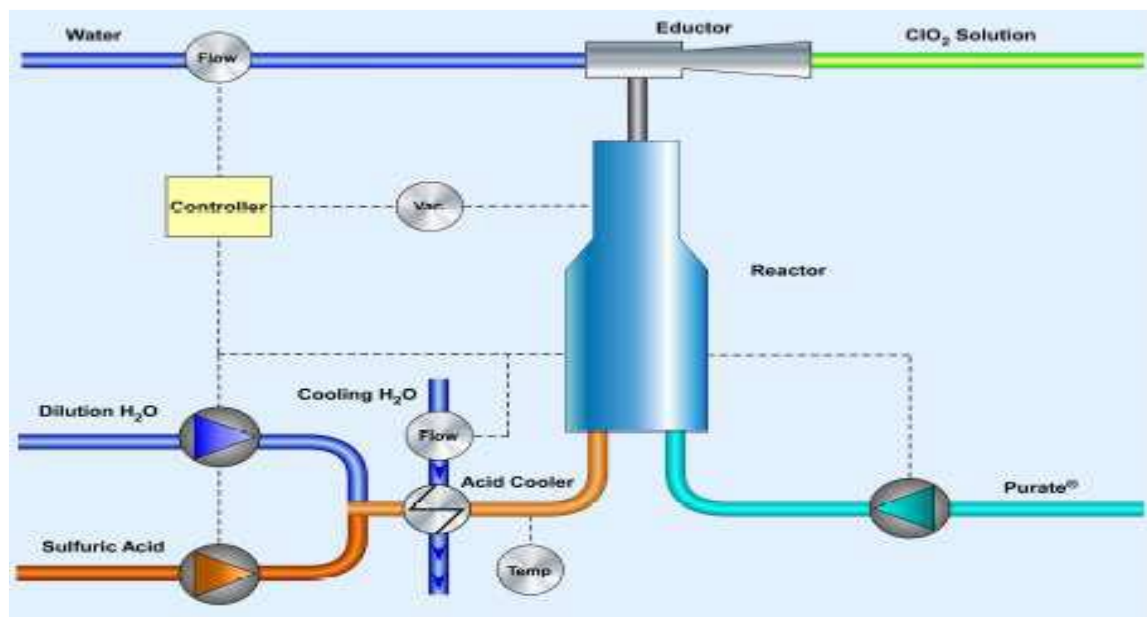
intercambiador), un mezclador estático para diluir el ácido desde el 98% hasta el 78% en peso, un transmisor electrónico de presión negativa (vacío), un PLC con panel tipo touch, un dispositivo para el lavado automático del reactor, tuberías e interconexiones en CPVC Sch-80. (Ver figuras 12 y 13).

Cabe mencionar que en la prueba tecnológica que se llevó a cabo en el STAP 1 de la Estación Acacias 1 se utilizó directamente ácido sulfúrico al 78%, por lo cual no es necesario emplear los equipos involucrados en su dilución y regulación de temperatura (intercambiador de calor).

Figura 12. Generador utilizado en la prueba para producir Dióxido de Cloro.



Figura 13. Fluxograma del generador utilizado en la prueba para producir Dióxido de Cloro



Fuente Ecolab.

Esta tecnología presenta una alta eficiencia frente a sus competidores. Algunos generadores a base de clorito pueden alcanzar una eficiencia del 95% cuando se calibra correctamente. Sin embargo, los generadores de tres químicos (clorito de sodio, hipoclorito, HCl) pierden rápidamente el rendimiento y requieren frecuentes ajustes y calibraciones, como resultado operan con menor eficiencia. Una tecnología de clorito en particular (clorito de sodio, HCl) puede operar con una alta eficiencia, pero con un bajo rendimiento, pues es necesario usar 5 moléculas de clorito de sodio para producir 4 moléculas de ClO<sub>2</sub>, obteniéndose un 80% del rendimiento máximo posible. Debido a los bajos rendimientos, esta tecnología se limita económicamente a las cuentas pequeñas (menos de 1 kg/h).<sup>37</sup>

El dióxido de cloro generado mediante la tecnología descrita anteriormente está aprobado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) para ser usado como pesticida (cualquier producto que actúa como un biocida, herbicida, insecticida, etc.). Antes de que un producto sea aprobado para este uso, la EPA realiza las debidas evaluaciones para determinar los riesgos que el oxidante y sus subproductos de degradación pueden causar sobre la fauna y flora, así mismo evalúa su comportamiento en el suelo, el agua y el aire.

Cabe mencionar que para lograr su misión, la EPA lleva a cabo evaluaciones científicas denominadas evaluaciones de riesgo ecológico, así mismo determina los efectos sobre las especies en peligro, para establecer el impacto de los factores de estrés tales como los plaguicidas sobre la salud del medio ambiente. En el programa de regulación de pesticidas de la EPA, las evaluaciones de riesgos

<sup>37</sup> ECOLAB. Purate. Internet: (<http://www.ecolab.com/product/purate/?program=purate-chlorine-dioxide-systems>).

ecológicos desempeñan un papel importante en la evaluación de la seguridad de los nuevos plaguicidas y plaguicidas ya registrados sobre los animales y las plantas. Las evaluaciones de pesticidas de la EPA están basadas en muchos estudios científicos presentados por los fabricantes de los plaguicidas y de acuerdo con las directrices de la EPA.

### 3.4 UBICACIÓN DE LA PRUEBA

La prueba se ubicó en el área de las piscinas de aspersión pertenecientes al STAP 1, esta piscina cuenta con 3 secciones (ABA 7361, ABA 7362 y ABA 7363), cada una con un juego de 4 bombas de aspersión (AP 7361/62/63 A/B/C/D). (Ver figura 14).

Figura 14. Piscina de aspersión ABA 7361 perteneciente a STAP 1.



Cortesía de Ecopetrol S.A.

El montaje se realizó en la descarga de la bomba de aspersión AP7361A, donde se desvió una fracción de agua tratada hacia el sistema a evaluar. (Ver figuras 15 y 16).

Figura 15. Bomba aspersión AP7361A correspondiente a piscina de aspersión ABA7361 del STAP 1 antes de su intervención.



Figura 16. Bomba aspersión AP7361A correspondiente a piscina de aspersión ABA7361 del STAP 1 después de su intervención para la prueba.



### 3.5 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRUEBA DE REMOCIÓN DE FENOLES CON DIÓXIDO DE CLORO

La infraestructura necesaria para realizar el proyecto piloto a gran escala para remoción de Fenoles en la estación acacias 1, usando como oxidante el Dióxido de Cloro consto de los siguientes equipos:

Tabla 9. Listado de equipos para la prueba.

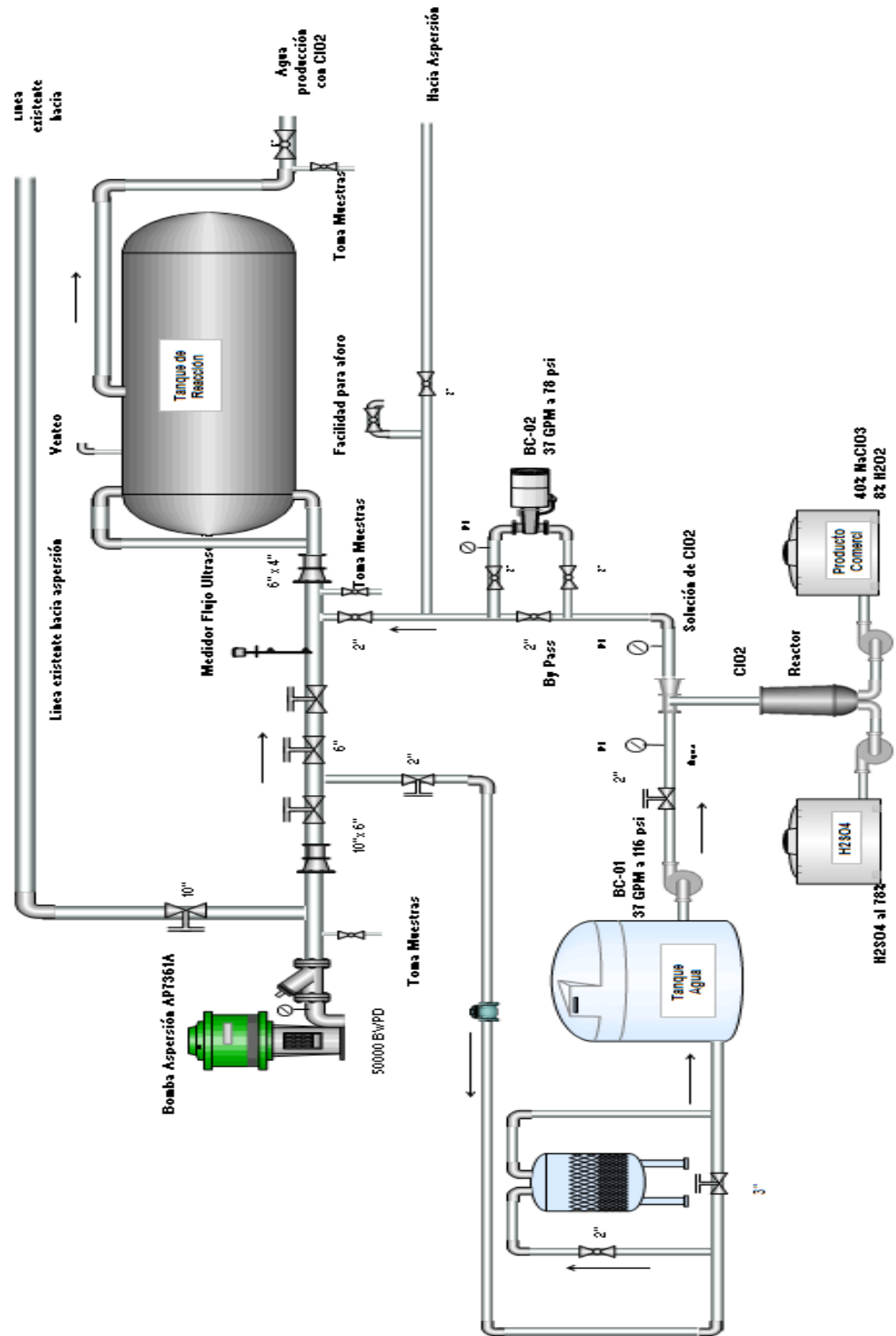
Equipos	Características
Generador dióxido de cloro con bombas de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y Producto comercial (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + NaClO <sub>3</sub> )	Modelo MSA-M18
Bomba de dióxido de cloro	Cap. 4,5 m <sup>3</sup> /h y 5 bar
Bomba de agua motivante	Bomba centrifuga Cap. 80 g.p.m y 7 bar
Filtro de agua motivante	Filtro de Arena, con lecho malla 20/40 , Cap. 20 m <sup>3</sup> /h
Tanque de reacción	Tanque cilíndrico, capacidad 360 Bls.
Tanque de almacenamiento de agua motivante para arrastre	Tanque cilíndrico Cap. 5 m <sup>3</sup>
Medidor de flujo ultrasónico	Marca Lenis NCMBA

Tabla 9. (Continuación)

<b>Equipos</b>	<b>Características</b>
Tanque de almacenamiento para H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Cap. 2000 L
Tanque de almacenamiento de producto comercial (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + NaClO <sub>3</sub> )	Cap. 2000 L
Espectrofotómetro	HACH Modelo DR 2800

A continuación se muestra un diagrama general de la prueba efectuada en campo.

Figura 17. Diagrama general de la prueba.



## **3.6 PROCEDIMIENTO PARA LA PUESTA EN MARCHA DE LA PRUEBA<sup>38 39</sup>**

### **3.6.1 Alinear flujo de prueba.**

Para alinear el flujo de agua a utilizar en la prueba tecnológica se debe apagar la bomba de aspersión AP7361A, luego se abren las tres válvulas consecutivas mostradas en la figura 18 y se procede a cerrar lentamente la válvula que habilita el flujo hacia la piscina de aspersión ABA7361. Terminada esta alineación se enciende nuevamente la bomba y se revisa que su presión de descarga se encuentre entre 40 y 45 psi, de esta forma se asegura que opere dentro de su curva.

El flujo de agua de producción a tratar (aprox. 50000 KBWPD) debe verificarse con el medidor de flujo ultrasónico.

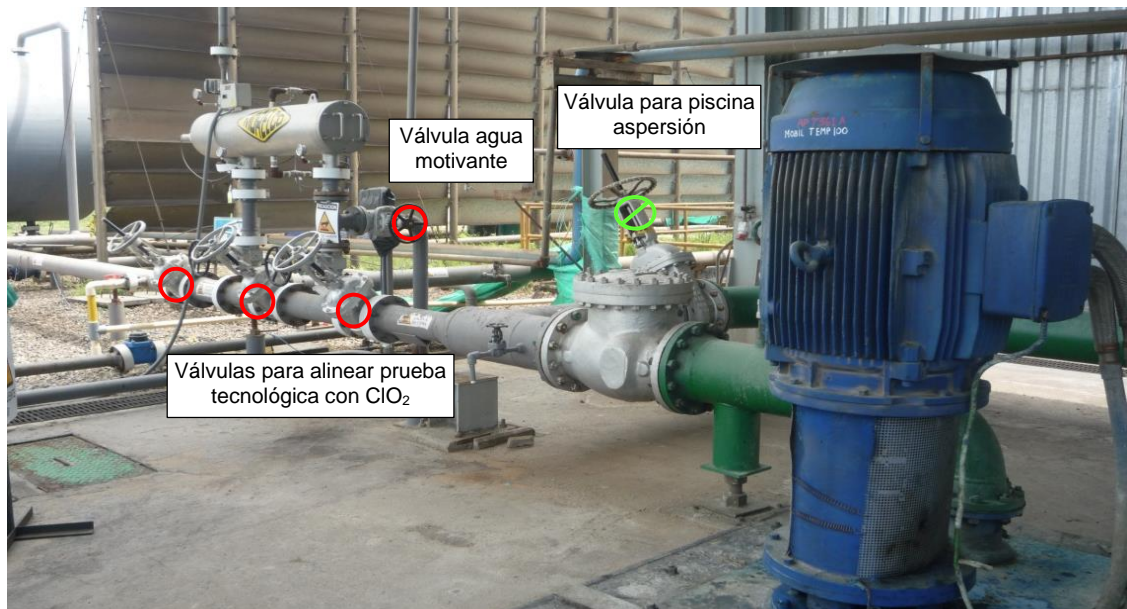
Los parámetros de presión y flujo se ajustan con el movimiento de las válvulas mostradas en la figura 18. Luego de terminar con estos ajustes la bomba de aspersión debe dejarse en automático, para que esta detenga su operación en caso de presentarse bajo nivel en el foso de succión de la piscina ABA 7361.

Figura 18. Alineación de agua a tratar en la prueba y movimiento de válvulas.

---

<sup>38</sup> PRUEBA TECNOLÓGICA PARA CONTROL DE FENOLES EN LA ESTACIÓN ACACIAS 1. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A, NALCO, MORELCO. 2012.

<sup>39</sup> MANUEL DE OPERACIÓN: PRUEBA TECNOLÓGICA OXIDACIÓN DE FENOLES USANDO CLO<sub>2</sub>. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A, NALCO, MORELCO. 2012.



### 3.6.2 Habilitar el flujo de agua motivante.

Este flujo es de  $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$  y es el encargado de pasar a través del sistema de vacío con una presión de 7 bares, lo cual causa una caída de presión de 6,5 bares y por consiguiente se genera un vacío aproximadamente de  $-680 \text{ mm Hg}$ .

El generador cuenta con un transmisor de vacío que controla las condiciones de presión, en caso que no detecte dicha presión, el sistema se apaga por seguridad.

Esta agua motivante se toma de aspersión como se muestra en la figura 18 y es enviada a un filtro de arena, para luego almacenarse en un tanque con capacidad de  $5 \text{ m}^3$ .

Para habilitar la corriente de agua motivante hacia el generador se debe abrir la válvula de descarga de la bomba centrífuga BC-01, como se señala en la figura 19. Además se debe cerrar la válvula de by pass del filtro de arena para asegurar que todo el agua motivante sea filtrada (Ver figura 20).

Figura 19. Alineación agua motivante hacia generador.



Figura 20. Filtro de arena para agua motivante.



### 3.6.3 Alinear corriente de solución de Dióxido de Cloro.

A medida que se genera el Dióxido de Cloro gaseoso se solubiliza inmediatamente en la corriente de agua. Para asegurar el ingreso de la solución de  $\text{ClO}_2$  en el agua de producción la bomba BC-02 eleva la presión a 5 bares, esta debe ser encendida aproximadamente 8 segundos después de arrancar la bomba de agua motivante.

La solución es alineada abriendo las válvulas de succión y descarga de la bomba BC-02 y cerrando el By pass, como se muestran en la figura 21.

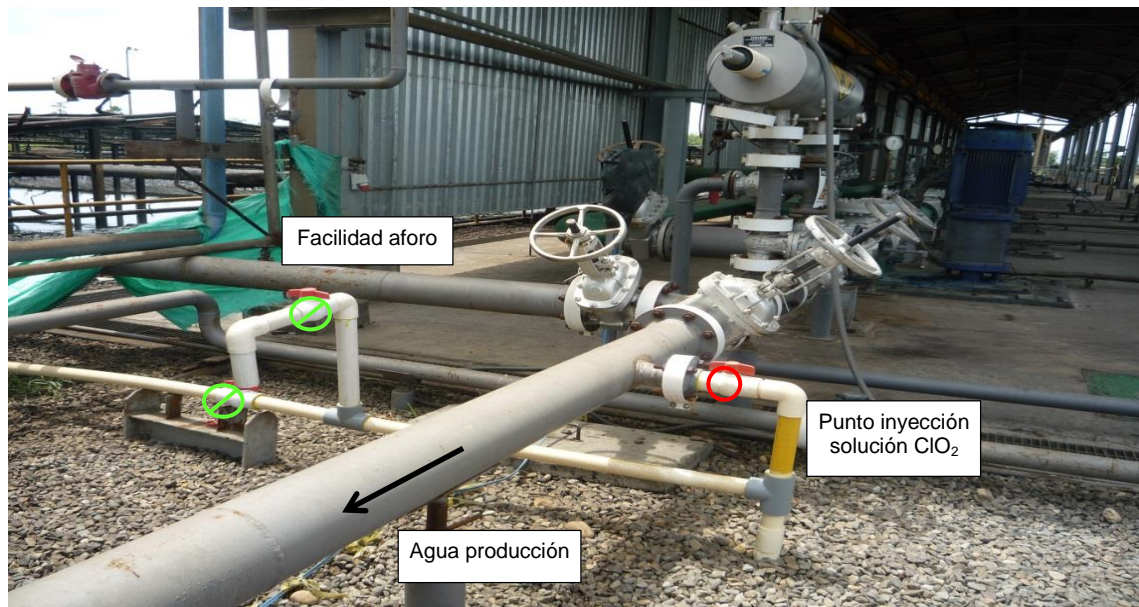
Figura 21. Alineación solución de Dióxido de Cloro hacia agua de producción.



Así mismo se debe abrir la válvula mostrada en la figura 22, ya que esta permite la inyección de la solución de  $\text{ClO}_2$  en el agua de producción alimentada para la prueba.

Tener en cuenta que para alinear la corriente de la solución de Dióxido de Cloro, las válvulas relacionadas con el aforo deben estar en posición cerrada como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Punto de inyección de solución de Dióxido de Cloro en agua de producción.



### 3.6.4 Encender el generador.

Luego de tener alineadas las corrientes anteriormente mencionadas, se procede a encender desde el interruptor principal el generador de ClO<sub>2</sub>.

Figura 23. Panel de control del generador utilizado en la prueba de campo.



Fuente ECOPETROL S.A, NALCO, MORELCO

A continuación se comienza a configurar las siguientes variables en el PLC:

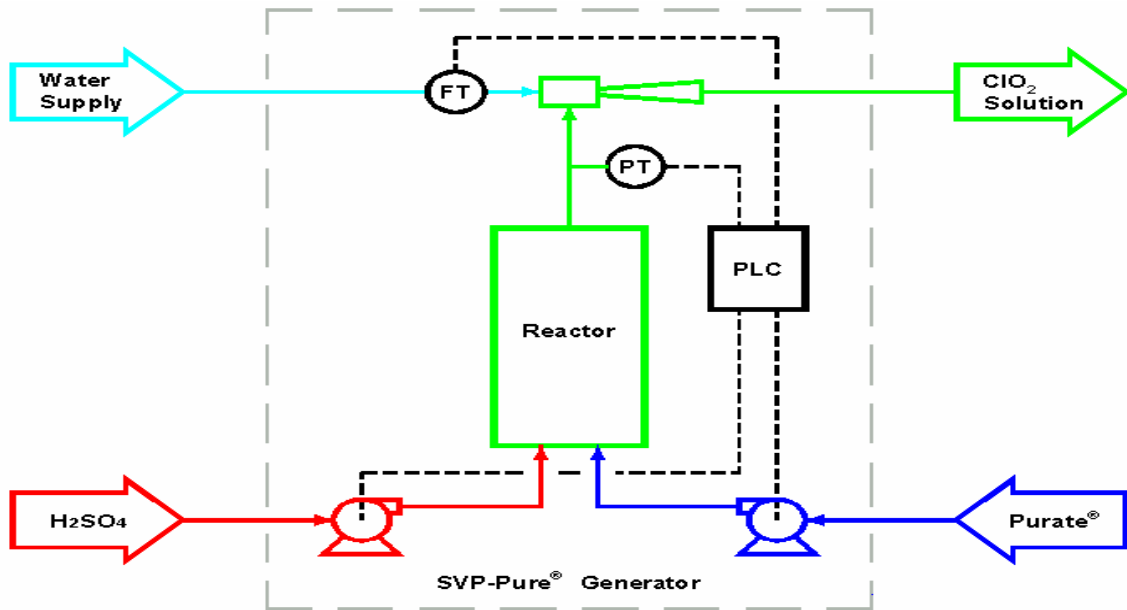
- ✓ Set rate de ClO<sub>2</sub>: cantidad de dióxido de cloro a producir (aprox. 1 Kg/h).
- ✓ Flujo de agua motivante (4,5 m<sup>3</sup>/h).

Luego se calibran las bombas de alimentación de ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y del producto comercial al reactor.

### 3.6.5 Descripción del proceso.

Los productos involucrados en la reacción (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y producto comercial), ingresan al reactor, el cual se encuentra en un vacío, generado por una corriente de agua motivante de 4,5 m<sup>3</sup>/h a 7 bares, la cual ha sido previamente filtrada, esta pasa a través de un eductor (Venturi), logrando el efecto deseado. El producto resultante será Dióxido de Cloro gaseoso, el cual se disuelve en la corriente de agua motivante (arrastre), esta corriente se inyecta posteriormente al agua a tratar para producir la oxidación de los fenoles.

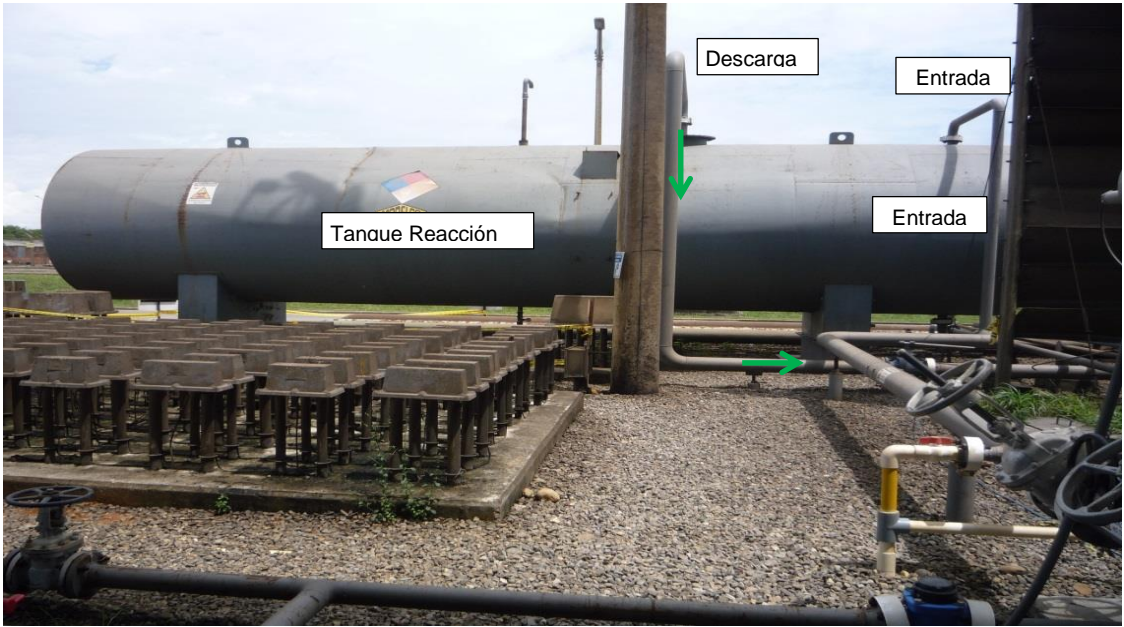
Figura 24. Flujos en generador de Dióxido de Cloro.



Fuente EKA AN ANSOL NOBEL COMPANY.

Por ultimo esta mezcla es conducida a un tanque cilíndrico con capacidad de 360 bls (tiempo de llenado aprox. 8 min) para darle un mayor tiempo de reacción antes de ser descargada a la piscina de aspersión ABA7361.

Figura 25. Tanque de reacción de agua de producción con solución de Dióxido de Cloro.



#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA TECNOLÓGICA DE REMOCIÓN DE FENOLES CON DIÓXIDO DE CLORO

Actualmente los sistemas de tratamiento de aguas de producción (STAP 1 y 2) como se mencionó anteriormente utilizan piscinas de aspersión para la disminución de la concentración de fenoles. Este proceso a pesar de que ha contribuido con el cumplimiento de la normatividad ambiental, también ha demostrado que demanda grandes áreas de terreno, presenta limitaciones en las capacidades operativas, genera corrosión en equipos e inconformidad de las comunidades vecinas debido a su aspersión atmosférica, lo cual se hace evidente en las siguientes imágenes:

Figura 26. Vista panorámica piscina de aspersión estación Castilla 2



Cortesía de la Gerencia de Operaciones Castilla ECOPETROL S.A.

Figura 27. Piscina de aspersion ABA7362 estación Acacias 1.



Figura 28. Corrosión en bombas centrífugas de las piscinas de aspersion.



Cortesía de la Gerencia de Operaciones Castilla. ECOPEPETROL S.A.

Así mismo dado que el campo Castilla tiene proyectado aumentar sus volúmenes de producción a 200.000 BOPD y 3.000.000 BWPD a diciembre del 2015, se hace necesario disminuir las áreas de proceso y así disponer de zonas para las nuevas facilidades de tratamiento de agua, crudo y lodos.

Consecuentemente con todo lo mencionado anteriormente se eliminarán las piscinas de aspersion de la estación acacias 1, no contando así con un sistema que

permita remover los fenoles del agua de producción, por lo cual se hace necesario evaluar una alternativa viable que supla el proceso actual. El presente capítulo tiene como fin analizar los resultados obtenidos de una prueba piloto de un sistema de remoción de fenoles con dióxido de cloro y así determinar si es eficiente y si aporta al cumplimiento de la normatividad ambiental, lo cual beneficiaría tanto a la comunidad como a Ecopetrol S.A.

#### 4.1 RESULTADOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DEL CAMPO CASTILLA

Las aguas residuales industriales del campo Castilla, según el informe del primer trimestre de los monitoreos efectuados en el año 2013 cumple con la concentración de fenol de 0,2 mg/l, establecido para las aguas de vertimiento del decreto 1594 de 1984 artículo 74. Dado lo anterior estas pueden ser utilizadas para consumo doméstico, humano con un previo tratamiento de potabilización o para uso agrícola y ganadero.

Tabla 10. Resultados Análisis Físicoquímicos de las Aguas residuales Industriales del Campo Castilla primer trimestre de 2013.<sup>40</sup>

Aguas Residuales Industriales y Cuerpo de Agua Estación Acacias	Entrada al STAP 1 Est. Acacias (Compuesta)	Entrada al STAP 2 Est. Acacias (Compuesta)	Foso de succión de bombas de vertimiento de la Est. Acacias (Compuesta)	Salida del STAP Est. Acacias al Rio Guayuriba (Compuesta)	Decreto 1594/84 Art. 72
Fecha	27/02/2013	27/02/2013	28/02/2013	28/02/2013	
Fenoles (mg/L)	0,24	0,33	<0,10	<0,10	0,20

La entidad responsable de efectuar los respectivos análisis trimestral es el laboratorio de aguas y suelos del Instituto Colombiano del Petróleo, ICP de ECOPETROL S.A., el cual se encuentra acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, bajo los lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025.

<sup>40</sup> INFORME TECNICO CARACTERIZACION FISICOQUIMICA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES ESTACION ACACIAS 1. ECOPETROL S.A. 2013.

## 4.2 GENERALIDADES DE LA PRUEBA

La prueba tecnológica efectuada en la estación acacias 1, requirió tomar el agua que proviene de la salida de filtros del sistema de tratamiento de aguas de producción STAP 1 y que se envía hacia las piscinas de aspersión para dosificarle el dióxido de cloro que permite la oxidación total de los fenoles. Las condiciones para esta fueron:

- ✓ Caudal de tratamiento: 50000 a 60000 BWPD.
- ✓ Dosis empleada: 2 a 6 ppm de  $\text{ClO}_2$
- ✓ Tiempo de contacto: 8 minutos.
- ✓ Tiempo diario de tratamiento: 7 horas aproximadamente.
- ✓ Duración total de la prueba: 10 días.

La metodología implementada fue diseñada con el fin de eliminar las piscinas de aspersión del proceso de tratamiento de aguas de producción. La implementación de la alternativa química se llevó a cabo en una fase donde se hicieron directamente las pruebas en campo con el fin de calcular la demanda de Dióxido de Cloro.

Por otro lado se debe resaltar que la prueba tecnológica el tratamiento químico no es complementaria al tratamiento mecánico de oxidación foto-catalítico de las piscinas de aspersión.

El agua de producción fue muestreada diariamente en cuatro puntos del proceso:

- ✓ Entrada a aspersión del STAP 1 (antes de aplicar  $\text{ClO}_2$ ).
- ✓ Salida piscina de aspersión.
- ✓ Pre-tanque de reacción (agua producción con aplicación de  $\text{ClO}_2$ ).
- ✓ Salida tanque de reacción (tanque para dar tiempo de residencia al agua de producción con aplicación de  $\text{ClO}_2$ ).

### 4.2.1 Métodos analíticos.

Los análisis de laboratorio efectuados para el parámetro Fenol se realizaron por el método 8047 HACH 4-Aminoantipirina y extracción con cloroformo, donde se utilizó un espectrofotómetro HACH DR 2800. Así mismo el método HACH utilizado para determinar el residual de Dióxido de Cloro fue el DPD 8065.

### 4.3 OXIDACIÓN CON DIÓXIDO DE CLORO

El Dióxido de Cloro es muy reactivo frente al Fenol, sus productos son benzoquinonas y ácidos orgánicos. Las concentraciones requeridas varían con el pH según lo siguiente:

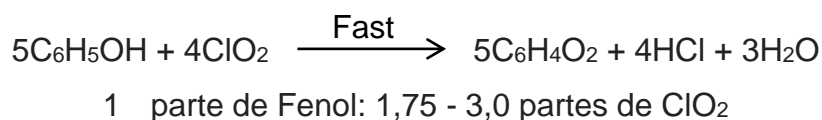
- ✓ pH 7 - 8: 1,5 x concentración de Fenol.
- ✓ pH 8 - 10: 2-3 x concentración de Fenol.
- ✓ pH > 10: 3,3 x concentración de Fenol

Los factores que afectan la relación de reacción son:

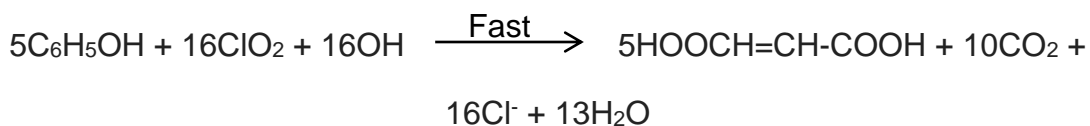
- ✓ Composición del Fenol.
- ✓ Concentración del Fenol.
- ✓ pH del agua:
  - ✓ El tiempo de reacción es más rápida a un pH elevado.
  - ✓ La formación de aniones se favorece por un elevado pH.
  - ✓ El fenol tiene propiedades de ácido orgánico.
  - ✓ El fenol es desglosado en un mayor grado con un pH elevado, el cual puede someterse a una mayor oxidación que requiere más oxidante.

Las reacciones del Fenol con el Dióxido de Cloro son las siguientes:

Ecuación 14. Reacción del Fenol con ClO<sub>2</sub> a pH < 10.



Ecuación 15. Reacción del Fenol con ClO<sub>2</sub> a pH > 10.



1 parte de Fenol: 3,3 - 7,0 partes de ClO<sub>2</sub>

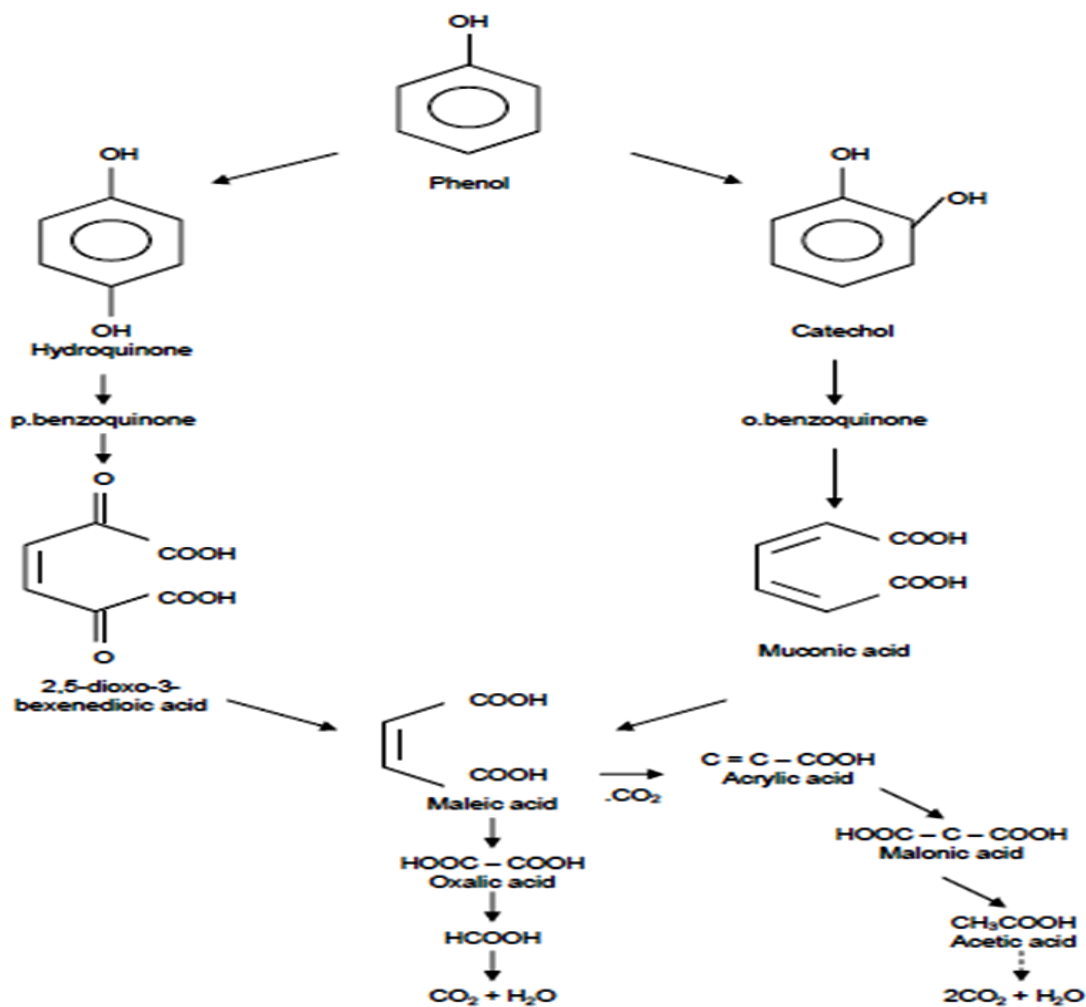
Una de las vías de degradación del Fenol plantea que estos presentan reacciones de sustitución electrófila aromática, donde los electrones del anillo aromático reaccionan con especies deficientes de electrones. Se forma una gran variedad de compuestos intermedios en la oxidación de Fenol, debido a una oxidación parcial, entre ellos, los observados mayoritariamente son: catecol, hidroquinona, benzoquinona, ácido maleico, oxálico, acético, etc. Parece ser que los intermedios de tipo bencenodiol o quinonas, una vez formados se transforman rápidamente a

compuestos de bajo peso molecular, siendo los ácidos los más refractarios a la oxidación total ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Por tanto el mejoramiento de los sistemas de tratamiento de aguas, con el uso de un agente oxidante que destruye químicamente las moléculas hasta llevarlas a degradación, puede permitir la completa mineralización de los fenoles, es decir su destrucción como agente contaminante.

Los productos del Fenol (Fenol, compuestos sustituidos por Fenol, quinonas y polifenoles) se caracterizan por la presencia de un grupo donante de OH sobre el núcleo aromático. En la Figura 29 se presenta un esquema de los principales compuestos formados en el proceso de oxidación.

Figura 29. Compuestos formados en el proceso de oxidación del Fenol.

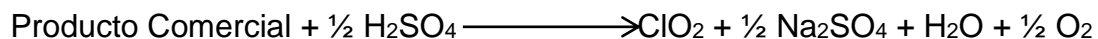


Fuente Gonzalez Guzmán, Julieta.

#### 4.4 ESTEQUIOMETRIA DE LA REACCIÓN PARA LA PRUEBA

La reacción de la tecnología del producto comercial es en una sola etapa, según la estequiometría que se muestra a continuación.<sup>41</sup>

Ecuación 16. Reacción del producto comercial y Ácido Sulfúrico para producir Dióxido de Cloro.



<sup>41</sup>PRUEBA TECNOLOGÍA PARA CONTROL DE FENOLES EN LA ESTACIÓN ACACIAS 1. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A, NALCO, MORELCO. 2012

Producto Comercial (4,15 Kg) + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 78% (5,5 Kg) → ClO<sub>2</sub> (1 Kg)

Para la prueba se espera una relación gravimétrica máxima entre el ClO<sub>2</sub> y Fenol de 1:3.

#### 4.5 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE FENOLES REALIZADOS DURANTE LAS PRUEBAS

Según los resultados obtenidos de las muestras tomadas en la entrada a aspersion del STAP 1 y la literatura consultada, el flujo a tratar presenta una concentración de Fenol correspondiente a un efluente diluido.

Los resultados alcanzados por la prueba tecnológica de remoción de Fenoles mediante la aplicación de Dióxido de Cloro en la estación Acacias 1 del campo Castilla se presentan a continuación:

Tabla 11. Resultados de la concentración de Fenol en los puntos de entrada a aspersion y salidas después de aplicar el Dióxido de Cloro.

Fecha	Hora	Entrada a Aspersion	Salida Pre-tanque con ClO <sub>2</sub>	Salida tanque de reaccion a aspersion	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
		Fenol (ppm)	Fenol (ppm)	Fenol (ppm)	ClO <sub>2</sub> (ppm)
07-mar	11:00	0,46	0,14	0,094	2,9
	15:00	0,25	0,011	0,011	3,0
	18:00	0,23	0,022	0,025	2,9
11-mar	12:15	0,311	0	0,013	3,0
	16:00	0,268	0,088	0,103	2,9
12-mar	10:00	0,268	0,027	0,038	2,9
	13:00	0,246	0,018	0,013	2,8
	15:45	0,23	0,019	0,020	2,8
13-mar	09:20	0,325	0,034	0,037	3,2
	16:30	0,298	0,072	0,074	2,5
14-mar	11:00	0,272	0,07	0,090	3,8
	13:20	0,24	0,027	0,011	3,9
	16:00	0,218	0	0,000	3,8
18-mar	10:15	0,232	0,026	0,035	3,6
	13:45	0,3	0,068	0,071	3,6
	15:20	0,564	0,036	0,042	3,8
19-mar	10:40	0,272	0,020	0,020	3,6

	13:30	0,268	0,028	0,034	5,0
	16:00	0,286	0,025	0,046	5,1
20-mar	11:40	0,303	0,04	0,045	5,1
	14:30	0,264	0	0	5,0

Tabla 11. (Continuación)

Fecha	Hora	Entrada a Aspersión	Salida Pre-tanque con ClO <sub>2</sub>	Salida tanque de reacción a aspersión	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
		Fenol (ppm)	Fenol (ppm)	Fenol (ppm)	ClO <sub>2</sub> (ppm)
21-mar	10:40	0,422	0,101	0,088	5,0
	13:50	0,424	0,183	0,160	5,1
	16:40	0,264	0,01	0,008	6,0
22-mar	12:00	0,40	0,091	0,135	6,0
	14:00	0,346	0,082	0,116	6,0
	16:30	0,301	0,051	0,079	6,0

#### **Análisis de resultados de la Tabla 11.**

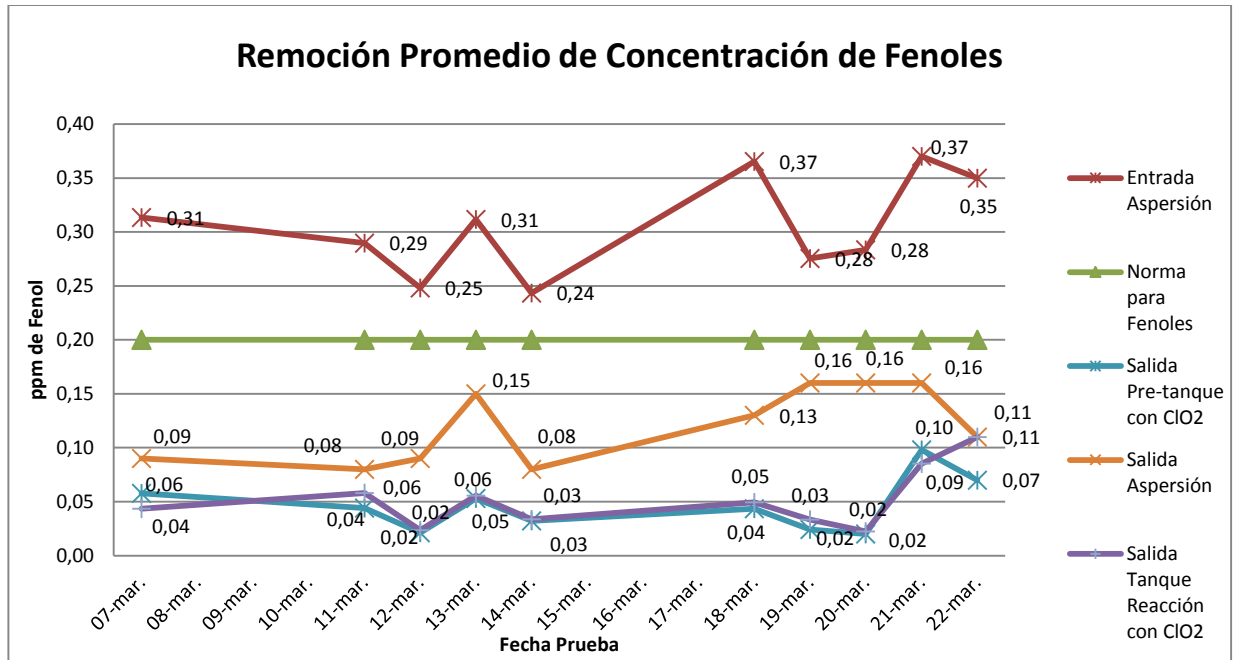
- Los rangos de concentración de Fenol en que se encuentran las muestras tomadas son los siguientes:
- El agua que procede de la salida del sistema de filtración del STAP 1 de la estación Acacias 1 y que es enviada a aspersión presenta concentraciones de Fenol que oscilan entre 0,218 - 0,56 mg/L.
- Las concentraciones de las muestras tomadas a la salida de pre-tanque de reacción se encuentran entre 0 – 0,18 mg/L.
- Las concentraciones de las muestras tomadas a la salida del tanque de reacción están entre 0 – 0,16 mg/L.
- Los días 11, 14 y 20 de marzo se tienen muestras puntuales con concentraciones de fenol a las salidas del sistema de tratamiento propuesto, con niveles mínimos de detección a través del método fotométrico utilizado.
- Las dosis empleadas por la tecnología evaluada de remoción de Fenoles mediante Dióxido de Cloro oscilaron entre 2,8 y 6 ppm.
- Como se puede apreciar durante los días de ejecución de la prueba, el proceso de oxidación fue constante, pues las muestras puntuales diarias a las salidas de pre-tanque y tanque de reacción tienen concentraciones de Fenoles por debajo de la normatividad ambiental colombiana para aguas de vertimiento, la cual estipula un valor máximo de 0,2 ppm de Fenol, además estos resultados demuestran que la prueba piloto cumple con su objetivo principal.

A continuación en la tabla 12 se promediaron los resultados de las concentraciones de Fenol obtenidas diariamente, además se calcularon los porcentajes promedio de remoción en cada punto de muestreo.

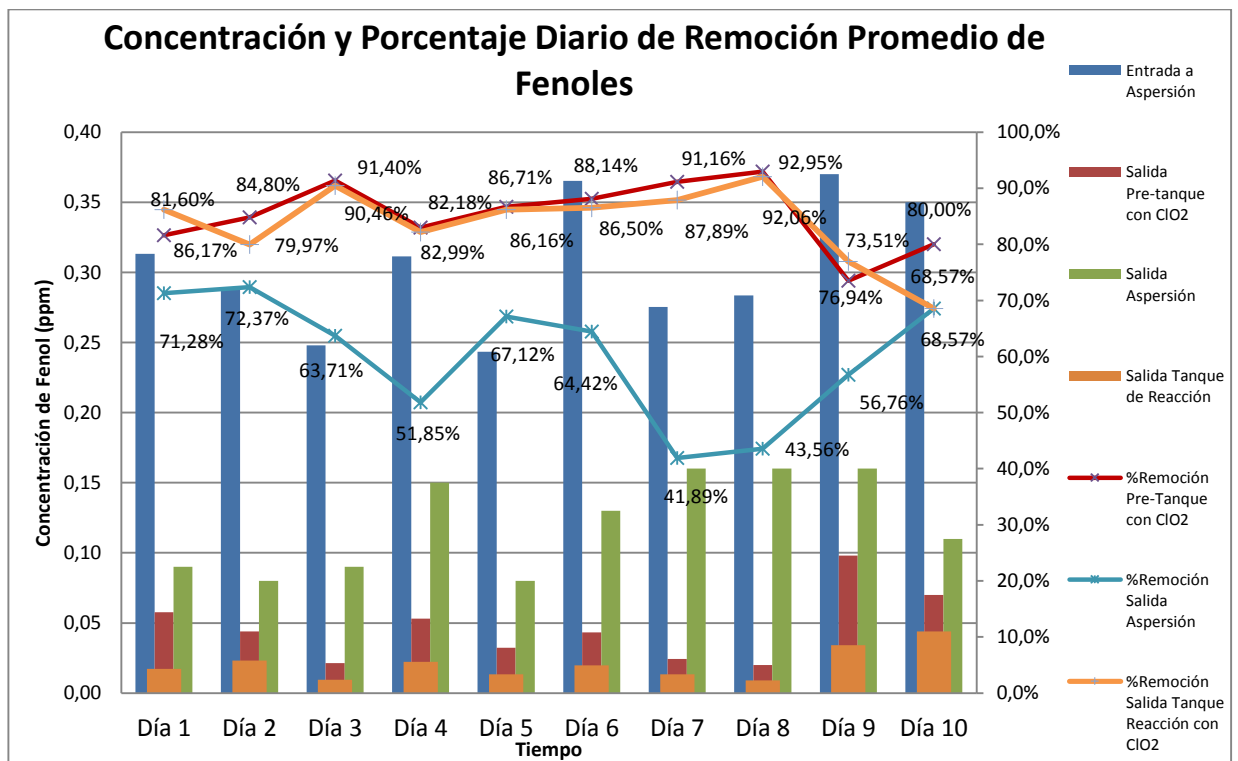
Tabla 12. Resultados promedio de la concentración de Fenol en los puntos de entrada y salida de aspersion y salidas después de aplicar el Dióxido de Cloro.

Fecha	Entrada a Aspersion	Salida Pre- tanque con ClO <sub>2</sub>	Salida Aspersion	Salida Tanque Reaccion	%Remoción Salida Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	%Remoción Salida Aspersion	%Remoción Salida Tanque Reaccion con ClO <sub>2</sub>	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
	Fenol (ppm)	Fenol (ppm)	Fenol (ppm)	Fenol (ppm)				ClO <sub>2</sub> (ppm)
Día 1	0,31	0,06	0,09	0,04	81,60%	71,28%	86,17%	2,9
Día 2	0,29	0,04	0,08	0,06	84,80%	72,37%	79,97%	2,9
Día 3	0,25	0,02	0,09	0,02	91,40%	63,71%	90,46%	2,8
Día 4	0,31	0,05	0,15	0,06	82,99%	51,85%	82,18%	2,8
Día 5	0,24	0,03	0,08	0,03	86,71%	67,12%	86,16%	3,8
Día 6	0,37	0,04	0,13	0,05	88,14%	64,42%	86,50%	3,7
Día 7	0,28	0,02	0,16	0,03	91,16%	41,89%	87,89%	4,6
Día 8	0,28	0,02	0,16	0,02	92,95%	43,56%	92,06%	5,0
Día 9	0,37	0,10	0,16	0,09	73,51%	56,76%	76,94%	5,3
Día 10	0,35	0,07	0,11	0,11	80,00%	68,57%	68,57%	6,0

Gráfica 1. Remoción promedio diaria de concentración de Fenol con y sin aplicación de Dióxido de Cloro y cumplimiento del Decreto 1594 de 1984.



Gráfica 2. Concentración diaria promedio de remoción de Fenol y Porcentaje de remoción con y sin aplicación de Dióxido de Cloro.



## **Análisis de resultados Tabla 12 y Graficas 1 y 2.**

- La Tabla 12 y Gráficas 1 y 2, corroboran que la aplicación de Dióxido de Cloro para remoción de Fenoles muestra resultados satisfactorios, pues las concentraciones a las salidas del sistema de tratamiento evaluado, se encuentran por debajo de lo exigido por el Decreto 1594 de 1984 (0,2mg/L).
- La totalidad de las muestras tomadas a la entrada del sistema de aspersion, que es la corriente de alimentación para la prueba, se encuentran por encima del máximo de la normatividad ambiental, por lo cual se hace necesario contar con un tratamiento complementario de las torres de enfriamiento para reducción del parámetro en estudio.
- Se observa de la tabla 12 que con la menor dosis empleada de 2,8 ppm de ClO<sub>2</sub> se alcanzan los resultados esperados de remoción. Así mismo con dosis por debajo de 3 ppm se obtienen porcentajes de remoción por encima del 79% en los puntos de muestreo correspondiente a salida pre-tanque y salida tanque de reacción, los cuales superan el resultado máximo obtenido para el sistema actual de aspersion que fue del 72,37%.
- Teniendo en cuenta todos los resultados promedio diarios podemos se puede inferir de la tabla 12 y grafica 2 que el Dióxido de cloro puede llegar a alcanzar porcentajes de remoción mayores al 90%.
- La alta temperatura del agua de producción de la estación Acacias 1, aumentan como era de esperar la velocidad de oxidación.
- Con el proceso actual de aspersion las concentraciones de Fenol obtenidas a la salida no superan el máximo estipulado en el decreto anteriormente mencionado, sin embargo en la gráfica 1 se muestra que el 40% de los valores de concentración (ppm≥0,15) se encuentran cercanos al límite de la norma.
- La degradación actual de los Fenoles en las aguas de producción del campo Castilla, es resultado de la fotólisis directa del contaminante en las piscinas de aspersion. También existe la posibilidad de que a este fin contribuya la acción oxidativa de sustancias presentes en el agua que pueden ser activadas por la radiación solar.
- Se observa en la gráfica 2 cambios pocos significativos en el porcentaje de remoción de fenoles para los puntos de muestro ubicados a la salida de tanque de reacción y pre-tanque, por lo tanto la inyección en línea del Dióxido de Cloro es eficiente y no sería necesario un tanque de residencia para dar tiempo adicional a la reacción de oxidación.
- La degradación de los Fenoles presentes en el agua de producción de la estación Acacias 1 por medio de la oxidación con Dióxido de Cloro, evidencia

que estos compuestos son degradables y por tanto no son persistente en el medio ambiente.

- Por medio de la oxidación con Dióxido de Cloro se puede lograr concentraciones de Fenoles menores e iguales que 0,10 ppm, valor que corresponde al 50% del límite de 0,20 ppm estipulado en el decreto 1594 de 1984.

Tabla 13. Porcentajes promedio de eficiencia de remoción de Fenol por rangos.

Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>	%Remoción Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	%Remoción Salida Aspersión	%Remoción Salida Tanque Reacción con ClO <sub>2</sub>
ClO <sub>2</sub> (ppm)			
ppm < 3	85,20%	64,80%	84,69%
ppm > 3	85,41%	57,05%	83,02%
<b>TOTAL</b>	<b>85,30%</b>	<b>60,93%</b>	<b>83,86%</b>

### Análisis de Resultados Tabla 13.

- El porcentaje promedio total de remoción de Fenoles utilizando el Dióxido de Cloro en las aguas de producción de la estación Acacias 1 del campo Castilla es de 85,30%. Superando al 60,93% presentado por el proceso de aspersión.
- Dado los resultados anteriores se concluye que es más eficiente la prueba tecnológica de remoción de Fenoles utilizando Dióxido de Cloro que el proceso actual de aspersión.
- A concentraciones menores de 3 ppm de Dióxido de Cloro se logra una eficiencia de remoción del 85,20%, por lo cual se sugiere aplicar esta dosis para no incurrir en sobredosificación y en costos adicionales asociados a ello.
- La tecnología probada en el campo Castilla para remoción de Fenoles mediante el Dióxido de Cloro, puede constituirse en un alternativa para reemplazar las actuales piscinas de aspersión del proceso de tratamiento de aguas de producción, ya que estas definitivamente se eliminarán de la estación Acacias 1 y se sustituirán por torres de enfriamiento. Así mismo el Dióxido de Cloro puede contribuir al buen funcionamiento de las torres, pues gracias a su poder biocida es usado en su desinfección. Sin embargo se recomienda probar otras tecnologías avanzadas de oxidación para definir la más eficiente en cuanto a proceso y costos.
- En caso tal que se defina que se usara la tecnología de Dióxido de Cloro, se recomienda instalarla a la entrada de las torres de enfriamiento.

#### 4.6 EFECTOS DE LA APLICACIÓN DEL DIÓXIDO DE CLORO EN ACEITES Y GRASAS

Con la aplicación del dióxido de Cloro se tiene un efecto sobre las grasas y aceites que se encuentran en el agua de producción.

Tabla 14. Resultados de la concentración de aceite en los puntos de entrada a aspersión y salidas después de aplicar el Dióxido de Cloro.

Fecha	Entrada Aspersión	Salida Pre-Tanque	Salida Tanque Reacción	%Remoción Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	%Remoción Salida Aspersión	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
	O/W	O/W	O/W			ClO <sub>2</sub> (ppm)
Día 1	4,18	3,03	3,45	27,51%	17,46%	2,9
	1,06	0,54	0,53	49,06%	50,00%	3,0
Día 1	0,68	0,50	0,51	26,47%	25,00%	2,9
Día 2	0,35	0,00	0,15	100,00%	57,14%	3,0
	0,79	0,09	0,15	88,61%	81,01%	2,9
Día 3	0,45	0,23	0,03	48,89%	93,33%	2,9
	0,23	0,10	0,06	56,52%	73,91%	2,8
	3,44	2,13	2,24	38,08%	34,88%	2,8

Tabla 14. (Continuación)

Fecha	Entrada Aspersión	Salida Pre-Tanque	Salida Tanque Reacción	%Remoción Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	%Remoción Salida Aspersión	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
	O/W	O/W	O/W			ClO <sub>2</sub> (ppm)
Día 4	0,84	0,35	0,27	58,33%	67,86%	3,2
Día 5	0,53	0,43	0,29	18,87%	45,28%	3,9
	0,8	0,63	0,65	21,25%	18,75%	3,8
Día 6	2,42	1,29	1,32	46,69%	45,45%	3,6
	3,42	1,64	1,63	52,05%	52,34%	3,6
	1,88	1,31	0,9	30,32%	52,13%	3,8
Día 7	1,62	0,94	0,79	41,98%	51,23%	5,0
	1,48	0,53	1,12	64,19%	24,32%	5,1
Día 8	2,53	1,63	1,21	35,57%	52,17%	5,1
	1,82	0,88	0,78	51,65%	57,14%	5,0
Día 9	3,35	1,08	1,06	67,76%	68,36%	5,0
	5,04	3,56	3,38	29,37%	32,94%	5,1

	0,99	0,62	0,52	37,37%	47,47%	6,0
Día 10	2,61	1,42	0,79	45,59%	69,73%	6,0
	2,86	2,67	2,34	6,64%	18,18%	6,0
	2,92	1,99	1,78	31,85%	39,04%	6,0

#### Análisis de Resultados Tabla 14.

- Basados en la tabla 14 los rangos de concentración de aceite en que se encuentran las muestras tomadas son los siguientes:
  - El agua que procede de la salida del sistema de filtración del STAP 1 de la estación Acacias 1 y que es enviada a aspersión presenta concentraciones de Fenol que oscilan entre 0,53-5,04 mg/L.
  - Las concentraciones de las muestras tomadas a la salida de pre-tanque de reacción se encuentran entre 0,0 – 3,56 mg/L.
  - Las concentraciones de las muestras tomadas a la salida del tanque de reacción están entre 0,03 – 3,45 mg/L.
- El 98,6% de la totalidad de las muestras tomadas en los tres puntos no exceden los 5 ppm de grasas y aceites, el cual es el valor máximo permisible para el agua de vertimiento al Rio Guayuriba. Lo anterior evidencia que el sistema de tratamiento de aguas de producción (STAP 1) de la estación Acacias 1, es eficiente para la remoción del aceite.

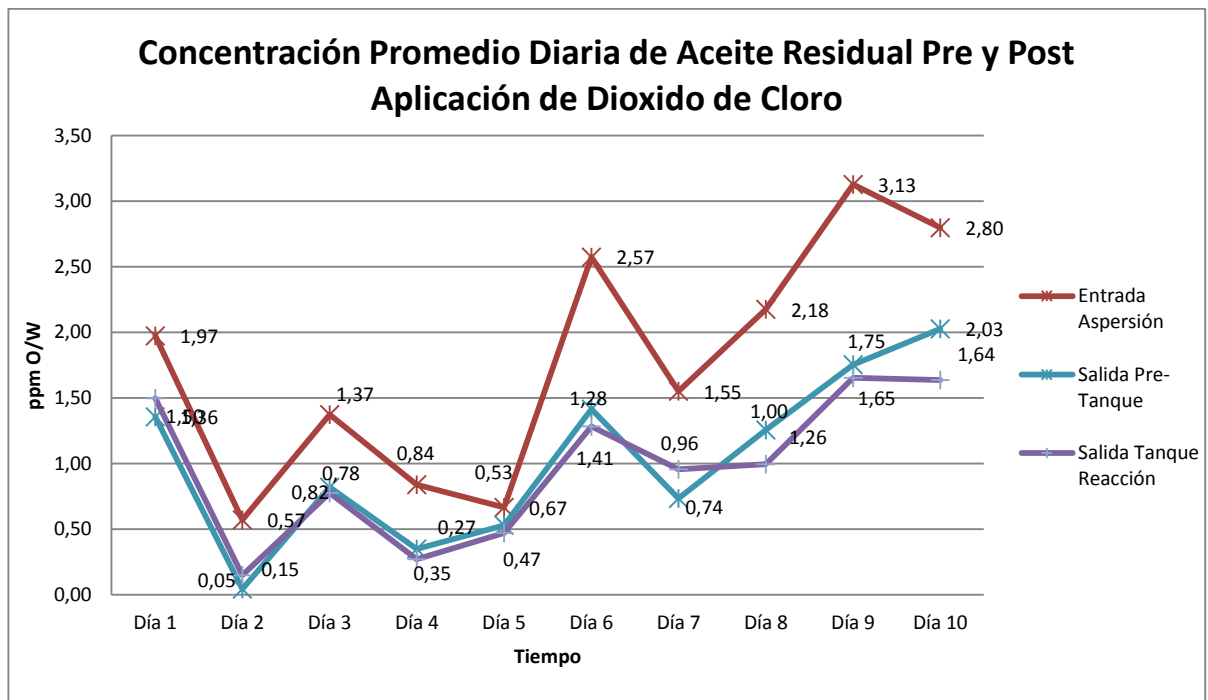
En la tabla siguiente se promediaron los resultados de las concentraciones de aceite obtenidas diariamente, además se calcularon los porcentajes promedio de remoción en cada punto de muestreo.

Tabla 15. Resultados promedio diarios de porcentajes de remoción y concentración de aceite residual pre y post aplicación de Dióxido de Cloro.

Fecha	Entrada Aspersión	Salida Pre-Tanque	Salida Tanque Reacción	%Remoción Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	%Remoción Salida Aspersión	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
	O/W	O/W	O/W			ClO <sub>2</sub> (ppm)
Día 1	1,97	1,36	1,50	34,35%	30,82%	2,9
Día 2	0,57	0,05	0,15	94,30%	69,08%	2,9
Día 3	1,37	0,82	0,78	47,83%	67,38%	2,8
Día 4	0,84	0,35	0,27	58,33%	67,86%	3,2
Día 5	0,67	0,53	0,47	20,06%	32,02%	3,8
Día 6	2,57	1,41	1,28	43,02%	49,97%	3,7

Día 7	1,55	0,74	0,96	53,08%	37,78%	5,0
Día 8	2,18	1,26	1,00	43,61%	54,66%	5,0
Día 9	3,13	1,75	1,65	44,83%	49,59%	5,3
Día 10	2,80	2,03	1,64	28,03%	42,32%	6,0

Gráfica 3. Concentración promedio diaria de aceite residual pre y post aplicación de Dióxido de Cloro.



### Análisis de Resultados Tabla 15 y Gráfica 3.

- El Dióxido de cloro oxida los compuestos orgánicos como los aceites. Lo cual se evidencia en la gráfica 3 y tablas 14 y 15, donde luego de aplicar este compuesto se reduce la concentración de aceite residual presente en el agua de producción de la estación Acacias 1.
- La remoción promedio de aceite alcanzada por el Dióxido de Cloro es del 46,74% a la salida de pre-tanque y de 50,15% a la salida de tanque de reacción. Por tanto aporta al cumplimiento de la normatividad ambiental.
- Los días 6, 8, 9 y 10 presentan las más altas concentraciones de aceites, lo cual requirió de un aumento en la dosificación de  $\text{ClO}_2$  al sistema. Por lo tanto existe la posibilidad de un aumento en el consumo de  $\text{ClO}_2$  por la oxidación de otros

compuestos orgánicos adicionales a los Fenoles presentes en el agua de producción, como las grasas y aceites.

#### 4.7 EFECTOS DEL PH EN LA REMOCIÓN DE FENOLES Y DOSIFICACIÓN DE DIÓXIDO DE CLORO

A continuación se evalúa el efecto que tiene el pH sobre las dosificaciones de Dióxido de Cloro y la remoción de los Fenoles en el agua de producción.

Tabla 16. Resultados del pH pre y post aplicación de Dióxido de Cloro.

Fecha	Hora	Entrada a Aspersión	Salida Pre-tanque con ClO <sub>2</sub>	Salida Tanque Reacción con ClO <sub>2</sub>
		pH	pH	pH
07-mar	11:00	7,37	7,40	7,18
	15:00	7,25	6,90	6,92
	18:00	7,34	7,06	6,98
11-mar	12:15	7,25	7,14	7,05
	16:00	6,30	6,44	6,50
12-mar	13:00	7,98	7,83	7,68
	15:45	7,79	7,58	7,35
13-mar	09:20	7,80	7,70	7,6
	16:30	7,85	7,79	7,69
14-mar	11:00	7,77	7,58	7,35
	16:00	7,80	7,85	7,46
18-mar	10:15	7,48	7,35	7,35
	13:45	7,36	6,54	6,92
	15:20	7,55	7,09	7,11
19-mar	10:40	7,65	7,38	7,18

Tabla 16. (Continuación)

Fecha	Hora	Entrada a Aspersión	Salida Pre-tanque con ClO <sub>2</sub>	Salida Tanque Reacción con ClO <sub>2</sub>
		pH	pH	pH
19-mar	13:30	7,79	7,34	7,23
	16:00	7,77	7,6	7,44
20-mar	11:40	7,48	7,36	6,89
	14:30	7,94	6,81	6,86
21-mar	10:40	7,63	7,45	7,13
	13:50	7,73	7,41	7,32

	16:40	7,45	7,03	6,86
--	-------	------	------	------

### Análisis de resultados Tabla 16.

- Dado que los pH de las muestras de la entrada a aspersion tienen valores inferiores a 10, se espera que las reacciones de Fenol con Dióxido de cloro tengan relaciones de 1 parte de Fenol: 1,75-3,0 partes de ClO<sub>2</sub>.
- Basado en lo observado en los análisis de los ítems anteriores y en los pH de las muestras, se recomienda utilizar una concentración de Dióxido de Cloro alrededor de 3 ppm para la tecnología de remoción de Fenoles.

En la tabla siguiente se promediaron los resultados de los pH obtenidas diariamente, además se calcularon los porcentajes promedio de remoción de los Fenoles en los puntos donde se aplicó el oxidante.

Tabla 17. Porcentajes promedio de remoción de los Fenoles a las salidas con Dióxido de Cloro y promedio de los pH pre y post aplicación de Dióxido de Cloro

Fecha	pH Entrada a Aspersion	%Remoción Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	%pH Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	%Remoción Salida Tanque Reacción con ClO <sub>2</sub>	%pH Salida Tanque Reacción con ClO <sub>2</sub>	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
						ClO <sub>2</sub> (ppm)
Día 1	7,32	81,60%	7,12	86,17%	7,03	2,9
Día 2	6,78	84,80%	6,79	79,97%	6,78	2,9
Día 3	7,89	91,40%	7,71	90,46%	7,52	2,8
Día 4	7,83	82,99%	7,75	82,18%	7,65	2,8
Día 5	7,79	86,71%	7,72	86,16%	7,41	3,8
Día 6	7,46	88,14%	6,99	86,50%	7,13	3,7
Día 7	7,74	91,16%	7,44	87,89%	7,28	4,6
Día 8	7,71	92,95%	7,09	92,06%	6,88	5,0
Día 9	7,60	73,51%	7,30	76,94%	7,10	5,3

En la tabla 18 se computo el porcentaje de reducción del pH en los diferentes puntos de muestreo de la prueba.

Tabla 18. Porcentaje promedio de reducción de pH en salidas pre tanque y tanque de reacción con Dióxido de Cloro.

Fecha	pH Entrada a Aspersion	pH Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	% Reducción pH Pre-Tanque con ClO <sub>2</sub>	pH Salida Tanque Reacción con ClO <sub>2</sub>	% Reducción pH Tanque Reacción con ClO <sub>2</sub>	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>
						ClO <sub>2</sub> (ppm)

Día 1	7,32	7,12	2,73%	7,03	4,01%	2,9
Día 2	6,78	6,79	-0,22%	6,78	0,00%	2,9
Día 3	7,89	7,71	2,28%	7,52	4,69%	2,8
Día 4	7,83	7,75	1,02%	7,65	2,30%	2,8
Día 5	7,79	7,72	0,90%	7,41	4,88%	3,8
Día 6	7,46	6,99	6,30%	7,13	4,51%	3,7
Día 7	7,74	7,44	3,83%	7,28	5,86%	4,6
Día 8	7,71	7,09	8,11%	6,88	10,83%	5,0
Día 9	7,60	7,30	4,03%	7,10	6,58%	5,3

### Análisis de Resultados Tabla 17 y 18.

- En las tablas mencionadas se observa que la adición de Dióxido de Cloro al agua de producción reduce muy poca el pH de las muestras a las salidas de pre y post tanque de reacción.
- Se esperaría que a pH más altos en el agua de entrada a aspersion, la remoción de los Fenoles fuera mayor, pero esto no es claramente evidencia con los datos disponibles, ya que los pH de las muestras no tienen diferencias considerables. Sin embargo la prueba tecnológica usando ClO<sub>2</sub> como oxidante arroja muy altas eficiencias de remoción en cuanto a los Fenoles.
- La reacción del ClO<sub>2</sub> con los fenoles es muy eficiente con poco tiempo de contacto, lo cual puede haberse visto favorecido por la presencia de pH mayores de 7 a la entrada de aspersion.

### 4.8 RESIDUAL DE DIÓXIDO DE CLORO

En la prueba se efectuaron mediciones de residual de Dióxido de Cloro una vez se ha dosificado.

Tabla 19. Residual de Dióxido de Cloro en el agua de producción, inmediatamente después de su dosificación.

Fecha	HORA	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>	Entrada Aspersion (Residual de ClO <sub>2</sub> )	Salida Pre-Tanque (Residual de ClO <sub>2</sub> )	Salida Tanque Reacción (Residual de ClO <sub>2</sub> )
		ClO <sub>2</sub> (ppm)	ClO <sub>2</sub> (ppm)	ClO <sub>2</sub> (ppm)	ClO <sub>2</sub> (ppm)

12-mar	10:00	2,9	0,04	0,14	0,15
	13:00	2,8	0,00	0,11	0,10
	15:45	2,8	0,01	0,08	0,06
13-mar	09:20	3,2	0,00	0,03	0,04
14-mar	11:00	3,8	0,02	0,12	0,16
	13:20	3,9	0,02	0,12	0,11
	16:00	3,8	0,02	0,12	0,12
18-mar	10:15	3,6	0,02	0,15	0,11
20-mar	11:40	5,1	0,02	0,20	0,27
	14:30	5,0	0,03	0,54	0,31
21-mar	10:40	5,0	0,02	0,18	0,20

### **Análisis de Resultados Tabla 19.**

- El agua de producción que alimenta la prueba trae un residual poco apreciable, con valores menores e iguales a 0,04 ppm.
- Al aplicar dosis menores o iguales a 5 ppm de ClO<sub>2</sub>, se aprecia un aumento en el residual de este parámetro en las salidas de pre-tanque y tanque de reacción.
- La residualidad del Dióxido de Cloro luego de aplicar este oxidante se encuentra por debajo de 0,4 ppm en el 95,4% de las muestras analizadas.
- A más alta concentración de Dióxido de Cloro aplicado el residual aumenta.

Se efectuaron además algunas mediciones del residual de Dióxido de Cloro 5 minutos después de su aplicación obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 20. Residual de Dióxido de Cloro 5 min. después de su dosificación.

Muestra	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>	Salida Pre-Tanque (Residual de ClO <sub>2</sub> )
	ClO <sub>2</sub> (ppm)	ClO <sub>2</sub> (ppm)
Muestra 1	2,9	0,93

Tabla 20. (Continuación)

Muestra	Dosis aplicada de ClO <sub>2</sub>	Salida Pre-Tanque (Residual de ClO <sub>2</sub> )
	ClO <sub>2</sub> (ppm)	ClO <sub>2</sub> (ppm)

Muestra 2	3,6	0,33
Muestra 3	5,0	1,10
Muestra 4	5,0	0,41
Muestra 5	6,0	1,68
Muestra 6	6,0	0,38

### **Análisis de Resultados Tabla 20.**

- Pasados 5 minutos el residual de ClO<sub>2</sub> aumenta y sobrepasa los 0,4 ppm.
- En algunos casos los valores más altos de residual de ClO<sub>2</sub> se tuvieron con dosificaciones entre 5 y 6 ppm.

Dado lo anterior se efectuó un ensayo de laboratorio con la dosis máxima aplicada en la prueba, la cual corresponde a 6 ppm de Dióxido de Cloro. Este se llevó a cabo a las temperaturas de 78°C y 42°C.

Tabla 21. Residual de Dióxido de Cloro en agua de producción con dosificación de 6 ppm de ClO<sub>2</sub>.

<b>Tiempo</b>	<b>Residual ClO<sub>2</sub> (78°C)</b>	<b>Residual de ClO<sub>2</sub> (42°C)</b>
<b>min.</b>	<b>ClO<sub>2</sub> (ppm)</b>	<b>ClO<sub>2</sub> (ppm)</b>
0	6,00	6,00
2	0,88	1,78
5	0,65	1,01
10	0,70	0,69
15	0,50	0,59
20	0,60	0,54
25	0,50	0,45
30	0,48	0,49

### **Análisis de resultados Tabla 21.**

- Pasados 2 minutos a la temperatura de 78°C se ha consumido el 85% del Dióxido de Cloro dosificado y con la temperatura de 42°C un 70%.
- En los rangos de tiempo entre 10 y 30 minutos el comportamiento del residual de ClO<sub>2</sub> es similar. Sus porcentajes de consumo del oxidante son parejos.

- A los 30 minutos de la prueba se aprecia que el consumo de ClO<sub>2</sub> para las dos temperaturas es del 92%. Por lo tanto para las dos temperaturas la estabilidad es semejante.
- Los valores de residual de ClO<sub>2</sub> obtenidos pasados los 30 minutos se encuentran muy cercanos al recomendado para aguas de vertimiento.
- La reacción del Dióxido de Cloro con la materia orgánica continuara hasta que no se tenga más disponibilidad de esta. Esto se debe a que el ClO<sub>2</sub> reacciona con la mayoría de agentes reductores como la materia orgánica.

#### 4.9 COSTOS GENERALES DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA<sup>42</sup>

A continuación se detalla los cálculos para un volumen de 50000 BWPD tratados en la prueba tecnológica de remoción de Fenoles mediante Dióxido de Cloro en la estación Acacias 1, basándose en los datos disponibles con que se contaron para el desarrollo de la misma.

Tabla 22. Bases de cálculo.

Bases de cálculo	
Dosis de ClO <sub>2</sub>	3 ppm
Ecuación estequiométrica de la reacción	4,15 kg Producto Comercial + 5,5 Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> produce 1 Kg ClO <sub>2</sub>
Densidad agua	1000 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad ClO <sub>2</sub> liquido	1190 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 78%	1700 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad Producto comercial	1370 Kg/m <sup>3</sup>
Tiempo	1 día
Un metro cubico es igual a	6,29 Bls
Costo H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	\$ 1.200.000 pesos/tonelada
Costo Producto comercial	\$ 5.848.200 pesos/tonelada
Valor de Generador de ClO <sub>2</sub>	\$ 400.000.000.00

En la tabla 23 se encuentra los volúmenes que se necesitaron de químicos precursores generadores de Dióxido de Cloro.

<sup>42</sup> ESTRATEGIA DE DIOXIDO DE CLORO (ClO<sub>2</sub>) EN EL MANEJO DE AGUA DE PRODUCCION DE LA SCC. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPEPETROL S.A. 2013.

Tabla 23. Volúmenes de químicos requeridos para tratar 50000 BWPD.

Descripción	Unidades	Estación Acacias 1
Volumen a Tratar	Barriles	50.000
Volumen de ClO <sub>2</sub>	Barriles	0,15
Volumen de ClO <sub>2</sub>	Metros cúbicos	0,02
Peso del ClO <sub>2</sub>	Kg	28,38
Peso del H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kg	156,08
Peso del H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Tonelada	0,16
Volumen H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Metros cúbicos	0,09
Volumen H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Barriles	0,58
Peso del Producto comercial	Kg	117,77
Volumen Producto comercial	Metros cúbicos	0,09
Volumen Producto comercial	Barriles	0,54

En la tabla 24 se da una aproximación de los costos en cuanto a los productos químicos utilizados en la prueba tecnológica.

Tabla 24. Costos generales.

Descripción – Costos	Unidades	Estación Acacias 1
Volumen a Tratar	Barriles	50.000
Volumen H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Barriles	0,58
Volumen Producto comercial	Barriles	0,54
Costo H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diario	\$/día	187.297,30
Costo producto comercial diario	\$/día	688.744,09
Costo Total Químicos	\$/día	876.041,39
Costo Unitario tratamiento	Pesos colombianos/Bbl agua tratada	17,52
Volumen de crudo al 95% de BSW	Barriles	2.632
Costo Unitario por barril de crudo (Pesos colombianos)	Pesos colombianos/ Bbl crudo	332,90
Costo Unitario por barril de crudo (Dólares)	USD S/ Bbl crudo	0,18

Se tuvo en cuenta en la tabla anterior una tasa de cambio de \$1.900,00 pesos por dólar.

Cabe anotar que actualmente en el campo no se ha probado otra tecnología para remoción de Fenoles que permita hacer un comparativo de costo/beneficio.

## 5. CONCLUSIONES

- ✓ La utilización del Dióxido de Cloro como oxidante aumento significativamente la degradación de los Fenoles con relación a la fotólisis directa usada actualmente como tratamiento en la estación Acacias 1. Lo anterior es demostrado mediante el porcentaje total de remoción alcanzado por el Dióxido de Cloro que fue del 85,30% en comparación al porcentaje de las piscinas de aspersión que fue del 60,93%.
- ✓ Se comprobó que la tecnología evaluada lleva a valores menores de 0,2 mg/L las concentraciones de los Fenoles en las aguas del campo Castilla.
- ✓ Para la degradación efectiva de los Fenoles se encontró que para las aguas del campo Castilla se obtienen buenos resultados con concentraciones menores de 3 ppm de Dióxido de Cloro. Se probó además concentraciones de Dióxido de Cloro mayores de 3 ppm, alcanzando eficiencias similares.
- ✓ Se evidencio que la reacción del  $\text{ClO}_2$  con los fenoles es muy eficiente con poco tiempo de contacto.
- ✓ La concentración de aceite residual presente en el agua de producción de la estación Acacias 1 se redujo luego de aplicar el Dióxido de Cloro, el porcentaje promedio de remoción a la salida de pre-tanque alcanzo valores 45,84% y a la salida de tanque de reacción del 49,63% . Esto se logra gracias a que el Dióxido de cloro oxida los compuestos orgánicos, tales como el aceite.
- ✓ Los fenoles en el agua tratada fueron degradados a las condiciones de la prueba, las cuales fueron temperaturas alrededor de 68°C, concentraciones de aceites menores a 5 ppm y pH's entre 6,30 y 7,85.
- ✓ El Dióxido de Cloro, el cual tiene un gran efecto en el control del olor, contribuyo a mejorar la calidad organoléptica del agua de producción de la estación Acacias 1.
- ✓ El área requerida para la instalación del generador de Dióxido de Cloro y precursores químicos es pequeña, por lo optimizaría los espacios operativos de la estación Acacias 1.

- ✓ En las pruebas efectuadas no se presentaron ningún tipo de incidentes y se pudo manejar de forma adecuada todos los factores que intervienen en esta, entre los cuales se encuentran los productos químicos y los equipos de generación de Dióxido de Cloro.

## 6. RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar los análisis de los parámetros determinantes de la prueba como Fenol y residual de Dióxido de Cloro con el laboratorio de aguas y suelos del Instituto Colombiano del Petróleo ICP o con otro laboratorio que se encuentre certificado en ISO17025 para estos parámetros y según los procedimientos establecidos en el Stándar Methods edición 22 de 2012.
- ✓ Para contar con una mejor trazabilidad de las concentraciones de los Fenoles, se recomienda realizar la prueba en un periodo de tiempo mayor a 10 días, para así poder observar si a condiciones diferentes ocurren cambios sustanciales en las concentraciones de los Fenoles y en el porcentaje de remoción de los mismos.
- ✓ Se recomienda hacer la evaluación de toxicidad en las diferentes etapas del proceso para evaluar el efecto de la reacción en la calidad del agua del campo Castilla.
- ✓ Se recomienda realizar evaluaciones con otras tecnologías avanzadas de oxidación, como lo son la ozonificación, procesos fenton, o aquellas que utilizan el peróxido de hidrogeno, para evaluar cuál de ellas es más eficiente en cuanto a remoción de Fenoles y costos.
- ✓ Realizar un análisis técnico económico a la tecnología de remoción de Fenoles mediante Dióxido de Cloro, para verificar si es conveniente para aplicar al tratamiento de aguas de producción del campo Castilla. Comparar este análisis con los arrojados por las otras tecnologías propuestas para determinar la relación beneficio/costo y consecuentemente la viabilidad económica para la aplicación a escala práctica.
- ✓ Verificar en laboratorio la demanda de Dióxido de Cloro para las aguas de producción de la estación Acacias 1, ya que la implementación de la alternativa química se llevó a cabo en una sola fase donde se hicieron directamente las pruebas en campo con el fin de calcular la demanda de este oxidante.
- ✓ Llevar a cabo mediciones constantes del residual de Dióxido de Cloro a la salida del sistema de tratamiento evaluado, para verificar si este disminuye con el tiempo.

- ✓ Evaluar otras condiciones diferentes a las utilizadas en la prueba de remoción de Fenoles mediante Dióxido de Cloro.
- ✓ Tener en cuenta las recomendaciones de seguridad de todos los productos químicos involucrados en la prueba, sobre todo en cuanto a su manejo y almacenamiento

## BIBLIOGRAFIA

DEININGER, R.; ANCHETA, A.; ZIEGLER, A. Dióxido de Cloro. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva. 1998. Publicado también en CD-ROM Disponible en la OPS/CEPIS.

DOMÉNECH, Xavier, JARDIM, Wilson F y LITTER, Martha. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes, in: M.A. Blesa y, B. Sánchez Cabrero (Ed.), Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. Texto Colectivo Elaborado por la Red CYTED. VIII-G, Ediciones CIEMAT, Madrid, España, 2004; p. 7–34.

ECOLAB. Purate. Internet: (<http://www.ecolab.com/product/purate/?program=purate-chlorine-dioxide-systems>).

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARA GENERADOR DE DIÓXIDO DE CLORO SVP-PURE MSA-M18-M18. AKSOL NOBEL, EKA CHIMICAL. 2008.

ESTRATEGIA DE DIOXIDO DE CLORO (ClO<sub>2</sub>) EN EL MANEJO DE AGUA DE PRODUCCION DE LA SCC. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPEPETROL S.A. 2013.

FLORES SUAREZ, Lenin Javier. Diseño de un Proceso de Tratamiento de Fenoles en las Aguas Residuales de la Refinería de Shushufindi, "CIS". Ecuador, 2008, 28 p. Trabajo de grado (Ing. En Recursos Naturales Renovables). Universidad Técnica del Norte. Internet: (<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/201?mode=full>).

FORERO, Jorge, ORTIZ, Olga y RIOS, Fabian. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de Fenol en aguas residuales industriales de refinería. En *Sciencia, Technology and Future Journal, CT & F*. Vol. 3, No. 1 (Dic. 2005); p. 97-109.

FORERO, Jorge, et al. Ozone for phenol treatment in industrial wastewater. En *Sciencia, Technology and Future Journal, CT & F*. Vol. 2, No. 2 (Dic. 2001); p 17-26. Internet: (<http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v2n2/v2n2a02.pdf>).

GARCIA MONTOYA, Julia. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for commercial reactive azo dyes remove. Bellaterra, 2007, Trabajo de Grado (Doctorado en Química). Universidad Autonoma de Barcelona.

Facultad de Ciencias. Departamento de Química. Internet:  
<http://hdl.handle.net/10803/3252>

GONZALEZ GUZMAN, Julieta del Rocío. Aplicación de Tecnologías Combinadas para la Remoción de Fenoles en las Aguas de Producción del Campo Arauca de ECOPETROL S.A. Bucaramanga, 2008, 16-19p. Trabajo de Grado (Especialización en Química Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química Ambiental.

GUÍAS PARA MANEJO SEGURO Y GESTIÓN AMBIENTAL DE 25 SUSTANCIAS QUÍMICAS. FENOL. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2002. 219p.

HERNANDEZ MORENO, Claudica Patricia. Evaluación preliminar de la oxidación avanzada de compuestos fenólicos. Bogotá D.C, 2005. Memos de investigación. Universidad de los Andes. Internet:  
(<http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/handle/1992/713?show=full-heterogenea.shtml>).

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL FENOL, DATAQUIM. Bogotá D.C, 2013. Consejo Colombiano de Seguridad.

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL FENOL 90% SOLUCIÓN ACUOSA. México, Junio 2008. Analytyca. Internet:  
(<http://www.analytyka.com.mx/spanish/FDS/F/141323.htm>).

INFORMES DIARIOS DE PRODUCCIÓN. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A. Abril-Junio 2013.

INFORME TECNICO CARACTERIZACION FISICOQUIMICA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES ESTACION ACACIAS 1. ECOPETROL S.A. 2013.

MANUAL DE BASES DE DISEÑO. ECOPETROL S.A. 2011.

MANUAL DE OPERACIONES ESTACION DE RECOLECCION Y TRATAMIENTO CASTILLA 2. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A. 2007.

MANUEL DE OPERACIÓN: PRUEBA TECNOLÓGICA OXIDACIÓN DE FENOLES USANDO  $\text{ClO}_2$ . Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A, NALCO, MORELCO. 2012.

MONTES, Erik. Manuel de operaciones estación de recolección y tratamiento Castilla 2. Castilla la Nueva, ECOPETROL S.A, 2007; p 42-70.

ORTIZ LOZOYA, Carlos. Eliminación de Fenol Mediante Procesos de Oxidación Avanzada. México D.F, 2002. 14-50p. Trabajo de grado (Maestría en Ciencias e Ing. Ambiental). Universidad Autónoma Metropolitana. Internet: (<http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/184/Eliminacion%20de%20fenol.pdf?sequence=1>).

PLAN DE DESARROLLO CAMPO CASTILLA. Superintendencia de Yacimientos ECOPETROL S.A. 2012.

POTENCIAL DE PRODUCCION CAMPO CASTILLA. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A. 2013.

PRUEBA TECNOLOGÍA PARA CONTROL DE FENOLES EN LA ESTACIÓN ACACIAS 1. Superintendencia de Operaciones Castilla Chichimene ECOPETROL S.A, NALCO, MORELCO. 2012.

PUGA BULLÓN, Jose. Resinas de Intercambio Iónico. Lima, 2007. Internet: (<http://www.monografias.com/trabajos51/intercambio-ionico/intercambio-ionico.shtml>).

PURATE, LEADING CLO<sub>2</sub> TECHNOLOGY. AKSOL NOBEL, EKA CHIMICAL. 2006.

PURATE, LEADING CLO<sub>2</sub> TECHNOLOGY. AKSOL NOBEL, EKA CHIMICAL. 2008.

RUBIANO HERNANDEZ, Claudia y LAGUNA CABEZAS, William. Estudio sobre las Posibilidades de Aplicación de la Fotocatálisis Heterogénea a los Procesos de Remoción de Fenoles en Medio Acuoso. Medellín, 2004. 9-14p. Trabajo de grado (Ing. de Petróleos e Ing. Química). Universidad Nacional Sede Medellín. Facultad de Minas. Internet: (<http://www.monografias.com/trabajos21/fotocatalisis-heterogenea/fotocatalisis-heterogenea.shtml>).

SERNA, Iveth y TORRES, Jesús. Recuperación de Fenol de Aguas Residuales Industriales por tratamiento con NaCl. DYNA Revista Facultad de Minas, Vol 70, Nro. 139, Julio 2003. 26p. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

SINGER, Philip C. y RECKHOW, David A. Chemical Oxidation. Quinta edición. McGraw-Hill, New York, 1999. p. 1-46.

TECHNICAL DATA SHEET, Treatment of Drinking Water with Chlorine Dioxide (ClO<sub>2</sub>). Vulcan Chemicals. Alabama. Internet: (<http://www.elaguapotable.com/ClO2.pdf>).

# ANEXOS

## ANEXO A. FICHA DATOS DE SEGURIDAD PRODUCTO COMERCIAL

**eka**

an Akzo Nobel company

### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

#### 1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad/empresa

<i>Productor/proveedor</i> <b>Eka Chemicals AB</b> Paseo Colón N° 17 08002 Barcelona España Tel: +46 31 587000 Fax: +46 31 587730 E-mail: sds-ppe@akzonobel.com Internet: www.akzonobel.com/eka Emergencias: España: +33 93 425 0060 International: +46 8 337043	<i>Nombre del producto</i> <b>Eka Purate</b>  <i>Composición</i> Clorato de sodio/peróxido de hidrógeno como solución acuosa estabilizada.  <i>Usos</i> Alimentación reactiva para generación de dióxido de cloro.  <i>Código del producto:</i> NACE: 21 UC62: 39	<i>ID: 800</i>
---	---	----------------

#### 2. Identificación de los peligros

<i>Clasificación</i>	O: R8 Xn: R22 R32 Xi: R36 N: R51/53
<i>Efectos para la salud</i>	Nocivo por ingestión. Irritante para los ojos. Puede causar daños en los ojos. Puede causar irritaciones en la piel. En contacto con ácidos libera gases muy tóxicos.
<i>Efectos medioambientales</i>	Dañino para vegetales, pero tóxico para las algas pardas. Puede causar efectos adversos en el medioambiente a largo plazo. Ver la Sección 12.
<i>Otros efectos</i>	Oxidante. La contaminación de diversos metales o materiales orgánicos puede causar la descomposición rápida, con el consiguiente escape de gas de oxígeno. Ayuda a la combustión. Eka Purate reacciona violentamente con los ácidos fuertes, produciendo gases muy tóxicos y potencialmente explosivos, p. ej., Dióxido de clorina y/o clorina. Las ropas contaminadas se convertirán en altamente combustibles si se dejan secar y pueden encenderse por fricción o calor.

#### 3. Composición/Información sobre los componentes

Vea la sección 16 para el texto de la R-frase

Este producto es un preparado según la Directiva 99/45/EC.

<i>Componente peligroso</i>	<i>N° CAS</i>	<i>N° EC</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Frase(s) R</i>	<i>Contenido</i>
Peróxido de hidrógeno	7722-84-1	231-765-0	C, Xn, O	R5, R8, R20/22, R35	< 8 %
Clorato de sodio	7775-09-9	231-887-4	Xn, O, N	R9, R22, R51/53	40 % ca.

#### 4. Primeros auxilios

<i>Inhalación</i>	Salir al aire libre. Si no hay respiración, aplicar respiración artificial. Si la respiración es difícil, dar oxígeno. Garantizar el acceso a aire fresco por si hay inhalación de dióxido de cloro. Obtenga atención médica inmediata.
<i>Contacto con la piel</i>	Lávese inmediatamente con jabón y agua abundante. Quitarse todas las prendas y calzado contaminados y empaparlos con agua para impedir el riesgo de incendio.
<i>Contacto con los ojos</i>	Enjuagar inmediatamente con abundante agua, también debajo de los párpados, por lo menos durante 15 minutos. No se deben usar lentillas de contacto cuando se trabaja con Eka Purate. Obtenga atención médica inmediata.

*Nombre del producto:* **Eka Purate**  
*Versión:* 6 - España (REACH) (05-Febrero-2009)

Página 1 ( 7)

  
**AKZO NOBEL**

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

<i>Ingestión</i>	Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Lavar la boca con agua y después beber agua abundante. No provocar vómitos! Solicitar atención médica inmediatamente.
<i>Notas para el Médico</i>	<p>El envenenamiento por clorato sódico es raro, pero se asocia con una alta tasa de mortalidad causando la muerte generalmente por hemólisis intravascular masiva e insuficiencia renal aguda.</p> <p>El tiosulfato sódico (2 a 5 g en 200 ml de bicarbonato sódico al 5%) es un antídoto específico que puede administrarse por vía oral o I.V. NO tratar con azul de metileno debido al riesgo de metahemoglobinemia. El clorato sódico dializa libremente y se recomienda el tratamiento temprano mediante diálisis peritoneal o hemodiálisis.</p> <p>Es probable que el contacto directo del peróxido de hidrógeno con los ojos cause una lesión de córnea, especialmente si no se lava inmediatamente. Se recomienda una evaluación oftalmológica cuidadosa.</p> <p>Deben evitarse los intentos de vaciado de estómago mediante la inducción del vómito o el lavado gástrico. En el caso de distensión grave del estómago o del esófago debido a la formación de gas, puede ser necesaria la inserción de una sonda nasogástrica.</p>

### 5. Medidas de lucha contra incendios

<i>Riesgos Generales de Incendio</i>	No inflamable. Si se ve afectado por el fuego, favorecerá la combustión.
<i>Medios de extinción</i>	UTILIZAR SÓLO AGUA.
<i>Medios inadecuados</i>	En el caso de Eka Purate NO utilizar espuma seca, extintores de polvo o de dióxido de carbono.
<i>Equipos de protección individual</i>	<p>Si se permite la evaporación, podría formarse clorato sódico sólido. El clorato sódico sólido no arde, pero cuando se expone al fuego se descompone emitiendo oxígeno que alimenta al fuego. Por consiguiente, SÓLO EL AGUA es eficaz para enfriar y diluir el clorato sódico sólido. NO UTILIZAR extintores de CO2, Halon, polvo químico seco ni mantas apagafuegos en el caso de que se produzca clorato sódico sólido ya que son completamente ineficaces y pueden confinar el calor empeorando la situación.</p> <p>Usar equipo de respiración autónomo y traje completo de protección en caso de incendio. Evitar todo contacto corporal. Evitar que la ropa, los zapatos o los guantes se impregnen de clorato sódico en solución, ya que estas prendas se convertirán en altamente combustibles si se dejan secar y pueden arder por fricción o calor. En caso de fuego externo, enfriar los recipientes de clorato sódico y la solución de peróxido de hidrógeno con abundante agua.</p>
<i>Riesgos especiales derivados de la exposición</i>	<p>El producto sostendrá la combustión debido a la emisión de oxígeno (cuando hay descomposición térmica). NO permitir que la solución entre en contacto con cualquier material combustible. El papel, la madera, la tela y el cuero impregnados con solución de clorato sódico son muy combustibles si se dejan secar y pueden arder por fricción o calor.</p>

### 6. Medidas in caso de vertido accidental

<i>Medidas de limpieza del medio ambiente</i>	<p>Contener o absorber con arena, tierra u otro material inerte (no combustible) adecuado (NO serrín, corcho o similar debido al riesgo de incendio). Si los vertidos son grandes, llamar a expertos. Evitar que la solución entre en contacto con materiales inadecuados como algunos metales y materiales orgánicos. NO permitir que se descargue en desagües ácidos u otros entornos ácidos ya que podría liberarse gas de dióxido de cloro. Impedir que el producto llegue en grandes cantidades al alcantarillado o corrientes de agua. Informar al servicio de salvamento.</p>
<i>Precauciones personales</i>	Ver la Sección 8.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

### 7. Manipulación y almacenamiento

<i>Manipulación</i>	Evitar contacto con piel y ojos. Las zonas y métodos de trabajo se deben organizar de forma que se evite el contacto directo. Utilícese solo en zonas bien ventiladas. Evitar la contaminación y el contacto con productos químicos y materiales incompatibles. No manipular el producto cerca de fuentes de calor. Mantener los recipientes cerrados cuando no se usan. Cuando use este material, no coma, beba ni fume.
<i>Almacenamiento</i>	Guardar en una zona fresca, oscura, seca, ventilada y a prueba de incendio; preferentemente en un envase original bien sellado. No colocar el producto en recipientes sin ventilar ni entre válvulas. Manténgase lejos de materias combustibles. Mantener alejado de No almacenar sobre suelos o tarimas de madera.
<i>Materiales a evitar</i>	Materiales y productos químicos incompatibles como materiales orgánicos, sustancias alcalinas, ácidos fuertes, fósforo, azufre, sulfuros, sulfitos y sales metálicas y sales de amonio. Los materiales orgánicos contaminados se inflaman fácilmente si se dejan secar. Si Eka Purate entra en contacto con ácidos fuertes y determinados metales se genera gas de oxígeno. Evitar el contacto con acero dulce.

### 8. Controles de la exposición/protección personal

<i>Protección general</i>	Llevar equipo de protección individual.
<i>Protección respiratoria</i>	No aplicable en condiciones normales. Sin embargo, la ventilación debe ser buena en las zonas de trabajo.
<i>Protección de las manos</i>	Evitar el contacto con la piel. Usar guantes de neopreno/nitrilo/caucho natural o PVC. No permitir que los guantes se impregnen con Eka Purate, puesto que se pueden volver altamente combustibles si se dejan secar y pueden encenderse por fricción o calor.
<i>Protección cutánea</i>	Usar ropas de trabajo completas o botas. Se recomienda el uso de botas impermeables. Es necesaria una ducha de emergencia o un tanque de salto. No permitir que las ropas o calzado se impregnen con Eka Purate, puesto que se pueden volver altamente combustibles si se dejan secar y pueden encenderse por fricción o calor. ¡Las ropas contaminadas se deben lavar bien con agua de inmediato! Cuando exista posibilidad de contacto, utilizar guantes resistentes a la corrosión, traje de protección química y botas de caucho.
<i>Protección de los ojos</i>	Gafas protectoras para condiciones de manipulación normal. Careta de protección para la manipulación abierta. No usar lentillas de contacto. Es necesaria una estación para lavado de ojos.
<i>Límites de contaminación atmosférica</i>	Peróxido de hidrógeno: SE - HGV/NGV: 1,4 mg/m <sup>3</sup> , HGV/TGV: 3 mg/m <sup>3</sup> . DE - MAK: 1,4 mg/m <sup>3</sup> . FR - VLR/VME: 1,5 mg/m <sup>3</sup> . Clorato de sodio: Ninguno conocido.

### 9. Propiedades físicas y químicas

*(Estos valores son características típicas del producto y no deben ser considerados como especificaciones)*

<i>Estado físico</i>	Líquido.
<i>Color</i>	Incoloro- ligero azul.
<i>Olor</i>	Ligero acre.
<i>pH</i>	2 ca.
<i>Densidad/Peso específico</i>	1370 kg/m <sup>3</sup> ca.
<i>Punto de fusión/ebullición</i>	-29°C / 111°C.
<i>Viscosidad</i>	1.8 mPa.s (20°C).
<i>Solubilidad</i>	Miscible (agua).
<i>Presión de vapor</i>	6.7 kPa (40°C, 40% Clorato de sodio, solución)
<i>Coefficiente de reparto</i>	No aplicable.

Nombre del producto: **Eka Purate**  
 Versión: 6 - España (REACH) (05-Febrero-2009)

Página 3 ( 7 )

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

<i>Punto de inflamación</i>	No aplicable, ver Punto 10.
<i>Límites de explosividad inferior/superior</i>	No aplicable.

### 10. Estabilidad y reactividad

<i>Reacciones de descomposición</i>	Eka Purate es un oxidante fuerte y puede emitir fácilmente gas de oxígeno. Eka Purate reaccionará con ácidos minerales fuertes liberando gas de dióxido de cloro. La contaminación con diversos metales o materiales orgánicos puede producir una rápida descomposición del peróxido de hidrógeno, dando lugar a la liberación de gas de oxígeno y al aumento de la presión si el aire no se libera de forma adecuada.
<i>Condiciones que deben evitarse</i>	Evitar el calor, las llamas, la luz UV intensa y otras fuentes de ignición. Exposición a la luz del sol. Si se eleva el pH (>4) puede potenciarse la descomposición rápida del peróxido de hidrógeno. NO deben usarse ácidos fuertes para controlar el pH.
<i>Materiales a evitar</i>	El contacto con materiales orgánicos como textiles, madera o cuero puede causar incendios, si se deja secar. La contaminación de diversos metales o materiales orgánicos puede causar la descomposición rápida, con el consiguiente escape de gas de oxígeno y la acumulación de presión si no se ventila adecuadamente.
<i>Reacciones peligrosas</i>	Eka Purate reacciona intensamente con ácidos fuertes, como ácido clorhídrico, y produce gases tóxicos y explosivos como dióxido de cloro y/o cloro. Se descompone en contacto con determinados metales y alcalinos que generan gas de oxígeno.
<i>Incompatibilidad</i>	Las soluciones Eka Purate pueden reaccionar con ácidos, materia orgánica, plásticos expandidos, como poliestireno o poliuretano, sales de amonio, azufre y sulfuros, fósforo, arsénico, metales como cobre, cinc, aluminio u otros, dióxido de magnesio, cianuro potásico y tiocianatos. Eka Purate es incompatible con metales solubles y sus sales (es decir, hierro, cobre, cromo, vanadio, tungsteno, molibdeno y platino), agentes reductores, materiales orgánicos, así como materiales inflamables y combustibles.

### 11. Información toxicológica

\*Estimada a partir de productos similares.

<i>Toxicidad aguda</i>	Clorato de sodio: LD50/oral/rata: 1.200 mg/kg. LDLo/oral/humano: 214 mg/kg. La ingestión de grandes cantidades de clorato sódico dará lugar a metahemoglobinemia y daño renal.  Peróxido de hidrógeno: LD50/oral/rata: >5.000 mg/kg (10%).
------------------------	---

#### Efectos para la salud

<i>Inhalación</i>	La inhalación de vapores y neblina irrita las membranas mucosas. Tiene un efecto oxidante y oxida la hemoglobina en la sangre formando metahemoglobinemia que tiene poca capacidad de transportar oxígeno. Esto da lugar a falta de oxígeno en el tejido corporal.
<i>Ingestión</i>	Se descompone en oxígeno en el estómago. La liberación rápida de gas de oxígeno puede causar distensión gástrica y hemorragia, y puede producir lesiones graves en el estómago. Los primeros síntomas pueden producirse después de varias horas.
<i>Contacto con la piel</i>	Puede causar una irritación.
<i>Contacto con los ojos</i>	Sumamente irritante. El contacto con los ojos puede producir lesiones de córnea y daños irreversibles.
<i>Sensibilización</i>	Clorato de sodio: No hay sensibilización de la piel en los ensayos animales. Peróxido de hidrógeno: No hay sensibilización de la piel en los ensayos animales.

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

<i>Cancerígeno-mutagénico</i>	<p>Clorato de sodio: No se considera carcinógeno ni mutagénico.          Peróxido de hidrógeno:          Mutagenicidad:          In vitro: Mutagénico sin activación metabólica y generalmente no mutagénico con activación metabólica.          In vivo: No se han observado efectos después de la administración oral.          Carcinogenicidad: Los experimentos animales no demuestran evidencia clara de carcinogenicidad en diferentes especies. La aplicación tópica no indujo tumores de piel.          IARC, OSHA y ACGIH no incluyen el peróxido de hidrógeno como carcinógeno.</p>
-------------------------------	--

### 12. Información ecológica

\*Estimada a partir de productos similares.

<i>Toxicidad acuática</i>	<p>Clorato de sodio:          Peces: LC50/48 h/Oncorhynchus mykiss = 2.750 mg/l.          Crustáceos: EC50/24 h/Daphnia magna = 880 mg/l.          Algas: IC50/estudio a largo plazo/Fucus Vesiculosus = 0,080 mg/l. Efecto inhibitorio claro para Scenedesmus a 7 mg/l.</p> <p>Peróxido de hidrógeno:          Peces: LC50/96 h/Varias especies= 16-37 mg/l.          Crustáceos: EC50/24 h/Varias razas= 2,4-7,7 mg/l.          Algas: Reducción de clorofila a 1,7 mg/l.</p>
<i>Biodegradabilidad</i>	<p>Clorato de sodio: Degradación lenta en el suelo en condiciones aeróbicas. Degradación más rápida en clorito de sodio y oxígeno en condiciones anaeróbicas (degradación microbiológica)          Peróxido de hidrógeno: Fácilmente biodegradable. Se transforma en sustancias no tóxicas (agua y oxígeno).</p>
<i>Potencial de bioacumulación</i>	<p>Clorato de sodio: El clorato se convierte en clorito en las plantas. El clorito se acumula en las células hasta que se alcanzan concentraciones tóxicas y muere la planta. No hay evidencia de acumulación en animales.          Peróxido de hidrógeno: Es improbable que ocurra debido a las propiedades químicas/físicas.</p>
<i>Mobilidad</i>	<p>Baja volatilidad. Se puede extraer del suelo por lixiviación. El producto permanece disuelto en agua y, por consiguiente, tiene movilidad alta.</p>
<i>Otros efectos</i>	<p>El clorato de sodio es dañino para las plantas, aunque es tóxico para algas marrones. Las bacterias implicadas en amonificación, nitrificación y desnitrificación son especialmente sensibles al clorato de sodio.</p>
<i>Clase de riesgo con agua</i>	WGK2

### 13. Consideraciones relativas a la eliminación

<i>Eliminación del producto</i>	<p>Los residuos pequeños se pueden diluir en grandes cantidades de agua y desechar en el sistema de alcantarillado. Para grandes cantidades, consultar con la autoridad.          Eka Purate no debe arrojarse a vertederos o en corrientes de agua.</p>
<i>Eliminación del envase</i>	Limpiar los residuos de Eka Purate de los envases vacíos. Consultar con la autoridad local.

### 14. Información relativa al transporte

<i>Resumen</i>	Clasificado como peligroso para el transporte.		
<i>Nombre Apropiado de Embarque:</i>	Clorato de sodio, solución acuosa		
<i>UN/ID N°</i>	2428	<i>Grupo embalaje</i>	II
<i>ADR/RID</i>	Clase: 5.1; Código: O1.		
<i>IMDG</i>	Clase: 5.1; EmS: F-H, S-Q; Estibado: Cat.B; Contaminantes marinos: No.		
<i>IATA/ICAO</i>	Clase: 5.1; ERG: 5L.		

### 15. Información reglamentaria

Nombre del producto: **Eka Purate**  
 Versión: 6 - España (REACH) (05-Febrero-2009)

Página 5 ( 7 )

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

<i>Reglamentaciones UE</i>	Clasificación de acuerdo con la Directiva Europea sobre la clasificación de preparados peligrosos 1999/45/CEE.
<i>Componente peligroso</i>	Clorato de sodio (EC: 231-887-4) Peróxido de hidrógeno (EC: 231-765-0)

*Símbolos de etiquetado*



<i>Producto CAS-nr</i>	Preparado
<i>Frase(s) R</i>	R8 Peligro de fuego en contacto con materias combustibles. R22 Nocivo por ingestión. R32 En contacto con ácidos libera gases muy tóxicos. R36 Irrita los ojos. R51/53 Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.
<i>Frase(s) S</i>	S3/14 Consérvese en lugar fresco y lejos de material combustible. S36/37/39 Úsense indumentaria y guantes adecuados y protección para los ojos/la cara. S46 En caso de ingestión, acúdase inmediatamente al médico y muéstrele la etiqueta o el envase. S50 No mezclar con Ácidos. S61 Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.

### 16. Otra información

*Texto de la R-frase usado en la sección 2 y 3 de este documento.*

*R5(Peligro de explosión en caso de calentamiento.), R8(Peligro de fuego en contacto con materias combustibles.), R9(Peligro de explosión al mezclar con materias combustibles.), R20/22(Nocivo por inhalación y por ingestión.), R22(Nocivo por ingestión.), R32(En contacto con ácidos libera gases muy tóxicos.), R35(Provoca quemaduras graves.), R36(Irrita los ojos.), R51/53(Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.)*

*Restricciones de uso* Restringido al uso en instalaciones industriales.

*Requisitos de formación* Al igual que con todos los productos químicos peligrosos, las personas que manipulen este producto deben recibir formación sobre los métodos y precauciones que se deben aplicar.

*Otra información* Esta ficha de datos de seguridad ha sido preparada de acuerdo con las Directivas de la UE: 67/548/EEC, 1999/45/EC, 2001/58/EC; 2006/8/EC.

*Secciones de la MSDS actualizadas*

- 03: Clasificación
- 03: Efectos para la salud
- 03: Otros efectos
- 04: Contacto con los ojos
- 04: Ingestión
- 04: Inhalación
- 05: Medios de extinción
- 05: Riesgos especiales derivados de la exposición
- 06: Medidas de limpieza del medio ambiente
- 07: Almacenamiento
- 07: Manipulación
- 07: Materiales a evitar
- 08: Medidas de higiene

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

---

Secciones de la MSDS actualizadas

08: Protección cutánea  
08: Protección de los ojos  
08: Protección respiratoria  
10: Condiciones a Evitar  
10: Descomposición Peligrosa  
10: Reacciones peligrosas  
11: Toxicidad aguda  
13: Eliminación del producto  
13: Envases  
15: Frase(s) R

**La información facilitada en este documento solo se aplica a este producto en particular y puede no ser válida si el producto se emplea con otros materiales o en otras aplicaciones. En el momento de su publicación, la información se ofrece de buena fe, según nuestros conocimientos más recientes. Si embargo la empresa no se responsabiliza en cuanto a la exactitud de la información facilitada, y es responsabilidad del usuario comprobar su adecuación a los usos del producto.**

Fecha de Emisión: 05-Feb-2009

Reemplaza: 05-Feb-2009

Fecha de impresión: 05-Feb-2009

Aprobado por: John Murray

Editado por: John Murray

# ANEXO B. HOJA DE DATOS DE DIOXIDO DE CLORO



## HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD

<http://www.ekamsds.com>



an Akzo Nobel company

### 1. Identificación del Producto Químico y de la Compañía

<p><b>Eka Chemicals Canada Inc.</b>                  1900, St-Patrice Street East                  Magog, Quebec J1X 4X6                  Canada                  Teléfono (819) 843 8942                  No. Fax (819) 843 3269                  Número de emergencia 24 horas                  CHEMTREC EE.UU. 1-800-424-9300                  CANUTEC CANADÁ 1-613-996-6666</p>	<p><i>Nombre del producto</i>  <b>CHLORINE DIOXIDE SOLUTION - SVP-PURE®</b></p> <p><i>Tipo de producto químico</i>                  Gas de dióxido de cloro absorbido en la solución de agua</p> <p><i>Uso previsto</i>                  Cuando desinfectante, oxidante, o descolorante agente de blanqueo.</p>
---	---

### 2. Identificación de los Peligros

<i>Resumen de Emergencias</i>	Una solución verde pálido si se disuelve en agua, y que es irritante para ojos, piel y vías respiratorias.
<i>Rutas de Exposición</i>	Ojos, piel e inhalación
<b>Efectos Potenciales a la Salud</b>	
<i>Ingestión</i>	Puede provocar irritación en las membranas mucosas.
<i>Piel</i>	May cause redness and moderate irritation.
<i>Ojos</i>	Strong irritant to the eyes. May cause redness, pain, blurred vision, tearing, corneal injury and burns.
<i>Inhalación</i>	Irritación de membranas mucosas. Puede causar tos, dolor de cabeza, dificultad en la respiración, náuseas, cortes de respiración, edema pulmonar.
<i>Órganos establecidos</i>	Ojos, piel y tracto respiratorio
<i>Efectos crónicos</i>	Puede tener efectos en los pulmones, terminando en bronchitis crónica y daños en los dientes.
<i>Enfermedades que empeoran por la exposición</i>	No conocidos

### 3. Composición / Información sobre los Ingredientes

<u>Componente</u>	<u>NO. DE CAS</u>	<u>% Peso/peso</u>
Dióxido de cloro	10049-04-4	< 0.4 %

**Esta HDSM no está hecha para usarse fuera de Norteamérica**

Terminado por Eka Chemicals, Inc.

Eka Chemicals, Inc. Terminado en fe 19-Ene-2010

MSDS CANADA

Nombre del producto CHLORINE DIOXIDE SOLUTION - SVP-PURE® Versión #: 18

1 / 5 AKZO NOBEL

#### 4. Medidas de Primeros Auxilios

##### Primeros Auxilios

<i>Ingestión</i>	Lavar la boca y beber inmediatamente un par de vasos de agua. Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. No induzca vómito.
<i>Piel</i>	Wash off contamination with soap and water thoroughly. Seek medical attention if irritation persists. Remove all contaminated clothing which should be laundered before reuse.
<i>Ojos</i>	Lave inmediatamente con agua abundante durante al menos 15 minutos, mientras mantiene los párpados separados. Acuda al hospital directamente. Siga lavando los ojos durante el traslado al hospital.
<i>Inhalación</i>	Saque al afectado al aire fresco. Si la respiración se dificulta, dele oxígeno. Consulte con un médico
<i>Notas para el médico</i>	La inhalación puede dañar potencialmente los pulmones. La ingestión afecta al sistema sanguíneo, hígado y riñones.

#### 5. Medidas para Combatir Incendios

<i>Propiedades inflamables</i>	Ninguno
<b>Medios de Extinción</b>	
<i>Medio extintor apropiado</i>	No presenta riesgo de incendio.
<i>Medios de extinción inadecuados</i>	No aplicable
<b>Protección de bomberos</b>	
<i>Equipo de Protección para Bomberos</i>	Ninguno.
<i>Riesgos Específicos debidos a la Substancia Química</i>	Ninguno.

#### 6. Medidas de Liberación Accidental

<i>Precauciones medioambientales</i>	Evacua el area, de personal innecesario. Remueva el gas con un spray de agua fina. Utilice un aparato de auto-contenido respiratorio.
<i>Métodos de contención</i>	Contenga los derrames usando materiales no combustibles como, por ejemplo, vermiculita, arena o tierra.
<i>Methods for Clean-up</i>	Dilúyase con mucha agua. For significant spills, consult experts for treatment and disposal.

#### 7. Manejo y Almacenamiento

<i>Procedimientos de Manejo</i>	Evite inhalación y contacto con la piel. Asegúrese de una buena ventilación en áreas de trabajo en las cuales el dióxido de cloro esta siendo utilizada. Use gas local de ventilación de emisiones de vapor. Asegúrese de que haya disponibilidad de mascararas/filtros. Asegúrese de que hay facilidades de duchas de emergencia.
<i>Procedimientos de Almacenamiento</i>	La solución del dióxido de cloro debe ser almacenada en temperatura ambiente o por debajo de esta. Los tanques deben ser proporcionados con ventilación positiva, como un ventilador o eductor. La temperatura alta causará el incremento de evolución del gas de dióxido de cloro y puede provocar la descomposición. El dióxido de cloro debe ser almacenado separadamente de los materiales orgánicos y agentes reductores.

#### 8. Controles de Exposición y Protección Personal

<i>Directrices de Exposición</i>	Dióxido de cloro: TWA 0,1 ppm, STEL 0,3 ppm.
<i>Controles de Ingeniería</i>	Lavado de ojos y ducha de seguridad.

Esta HDSM no está hecha para usarse fuera de Norteamérica

Terminado por Eka Chemicals, Inc.

Eka Chemicals, Inc. Terminado en fe 19-Ene-2010

MSDS CANADA



Nombre del producto CHLORINE DIOXIDE SOLUTION - SVP-PURE® Versión #: 18

2 / 5 AKZO NOBEL

#### Equipo de Protección Personal

Ojos/Cara	Gafas protectoras de seguridad o protección ocular, combinadas con protección respiratoria.
Piel	Utilice guantes resistentes a los productos químicos, gafas de protección y vestimenta de trabajo completa. Las prendas contaminadas deben lavarse antes de usarlas de nuevo. Evite contacto con la piel.
Respiratoria	Utilice un respirador para gas-aire inorgánico aprobado por NIOSH/MSHA, en áreas con excesiva exposición a partículas suspendidas en el aire..

### 9. Propiedades Físicas y Químicas

#### Apariencia

Estado físico	Líquido Gas que puede envolver a la atmosfera para su disolucion
Color	solucion clara a verdosa.
Olor	Acre. Como el cloro.
Límite de olor	No disponible.
Estado Físico	líquid
PH	1 - 3
Punto de fusión	Lo mismo que el agua
Punto de Congelación	Lo mismo que el agua
Punto de ebullición	Lo mismo que el agua
Punto de inflamación	No aplicable
Índice de evaporación	El gas del cloro puede evolucionar de la solución.
Inflamabilidad	No disponible
Inflamabilidad superior/inferior	No aplicable
Presión de vapor	Aproximadamente 50 mm Hg a 30C(ClO2)
Densidad de vapor	El gas de dióxido de cloro es 2.3 veces mayor que el aire.
Peso Especifico	1.0 A 0 C, solución
Solubilidad (H2O)	Soluble
Coefficiente de Distribución Agua/Aceite	No hay datos
Coef. octanol/H2O	No disponible.
Temperatura de Autoignición	No aplicable
Temperatura de descomposición	No disponible.
Viscosidad	Lo mismo que el agua

### 10. Información sobre Estabilidad Química y Reactividad

Condiciones a evitar	Evite las temperaturas elevadas, para reducir/evitar la evolución del gas ClO2
Materiales Incompatibles	Corrosivo al acero,acero inoxidable, aleaciones de cobre, y muchos otros materiales.
Productos de descomposición peligrosos	Cloro
Posibilidad de reacciones peligrosas	Ninguno en condiciones normales.

### 11. Información Toxicológica

#### Esta HDSM no está hecha para usarse fuera de Norteamérica

Terminado por Eka Chemicals, Inc.

Eka Chemicals, Inc. Terminado en fe 19-Ene-2010

MSDS CANADA

Nombre del producto CHLORINE DIOXIDE SOLUTION - SVP-PURE® Versión #: 18

3 / 5 AKZO NOBEL

<i>Efectos agudos</i>	LD50 (oral, la rata) = 39-113 mg/kg (dióxido de cloro). El dióxido de cloro es gas reactivo y oxidante, que oxida la hemoglobina en la sangre a la metahemoglobina. Esto lleva a una falta de oxígeno en los tejidos del cuerpo, ya que la metahemoglobina no tiene la misma capacidad de transportar oxígeno.  Los síntomas (dióxido de cloro) : Inicialmente, el dióxido de cloro afecta los ojos, la piel y los canales de aire. Los síntomas normales de exposición excesiva son tos, piel pálida, dolor de cabeza, fatiga, náusea, dificultades para respirar, irritación de los ojos, piel y membranas mucosas. Los primeros síntomas aparecen inmediatamente. La exposición excesiva aguda puede causar bronquitis, neumonía y edema pulmonar.
<i>Carcinogenicidad/mutagenicidad y efectos a largo plazo</i>	Sin información
<i>Neurotoxicidad</i>	Sin información
<i>Toxicidad para la función reproductora/teratogenicidad</i>	Sin información
<i>Epidemiología</i>	Sin información

## 12. Información Ecológica

<i>Efectos ecotoxicológicos</i>	
<i>Toxicidad acuática</i>	El cloro es tóxico para los organismos acuáticos. Pecado: LC50 (Primephales Promelas) - 0,02 mg/dm <sup>3</sup> (dióxido de cloro).
<i>Persistencia/Degradabilidad</i>	El dióxido de cloro se descompone rápidamente, formando clorato, clorito y cloruro.
<i>Bioacumulación/Acumulación</i>	El dióxido de cloro es convertido rápidamente en los productos de su descomposición. No hay evidencia para mostrar bioacumulación en animales.
<i>Movilidad en los recursos medioambientales</i>	El dióxido de cloro absorbido por el agua contiene baja volatilidad.

## 13. Consideraciones de Eliminación

<i>Instrucciones para la Eliminación</i>	De acuerdo con las regulaciones municipal, provincial, estatal y federal, D002 Reciclaje de los contenedores puede permitirse, la proporción del contenedor está "vacía", como descrito en 40 CFR 261.7(b)(1)", cuando el contenedor es utilizado dentro de los Estados Unidos. Cuando el contenedor es utilizado dentro de Canadá, aplican las regulaciones siguientes: "Un contenedor que ha sido vaciado completamente a través de las prácticas comunes, y que aquello contiene menos de 2,5 cm de residuo, es considerado típicamente como un "contenedor vacío" y que no está sujeto a la regulación como un desecho peligroso, ni material peligroso" (ver también Ontario - O. Reg. 347, Quebec - O.C. 1091-2004, aC. - AC. Reg. 63/88, Alberta - Reg. 192/96, y/o Saskatchewan - Reg E.10.2., 3, como apropiado).
--	--

## 14. Información Relativa al Transporte

<i>Resumen de transporte</i>	No recomendado por Eka Chemicals.
------------------------------	-----------------------------------

## 15. Información Reguladora

<i>Reglamentos Federales de EE.UU.</i>	Conforme
<i>Regulado por OSHA</i>	Corrosivo, tal como se define en 29 CFR 1910.1200.
<i>SARA 302</i>	No sujeto a SARA Artículo 302.

### Esta HDSM no está hecha para usarse fuera de Norteamérica

Terminado por Eka Chemicals, Inc.

Eka Chemicals, Inc. Terminado en fe 19-Ene-2010

MSDS CANADA



Nombre del producto CHLORINE DIOXIDE SOLUTION - SVP-PURE® Versión #: 18

4 / 5 AKZO NOBEL

SARA 311/312	No sujeto a SARA Artículo 311/312.
SARA 313	Sujeto a SARA Artículo 313. De minimus concentration is 1%.
DSL de Canadá	Conforme.
Clasificación WHMIS	No se ha determinado
General	No sujeto a Proposición de California 65. No sujeto a CERCLA.

## 16. Otra Información

### CLASIFICACION HMIS

Salud

Clasificación de Inflamabilidad

Reactividad

Prot. Pers.

Otra Información

### CLASIFICACIONES NFPA

Salud

2

Clasificación de Inflamabilidad

0

Reactividad

0

Peligros Especiales:

Otra Información: EKA es una marca registrada Eka Chemicals Inc. en los Estados Unidos. JETSIZE es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos, Canadá y varios países. COMPOZIL es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos, Canadá, México y varios países. AZCOTE es una marca registrada Eka Inc. en Los Estados Unidos. BLEACHMARK es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos. KZCOTE es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos. MONITROL es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos. PEROX-AID es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos Y Canadá. PEROXY-BLEND es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos. PEROXYCLEAR es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos. PURATE es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos. S-QUAD es una marca registrada de Eka Inc. en los Estados Unidos.

Descargo de responsabilidad

El producto se fabrica para ser vendido tan sólo a usuarios industriales. La información en esta MSDS (Hoja de datos de seguridad de materiales) está incluida para ayudar a estos usuarios a determinar si el producto es adecuado para la actividad de sus ne

Fecha de Emisión: 19-Jan-2010

Actualización de las Secciones de la MSDS

Índice: Calificaciones reglamentarias

**Esta HDSM no está hecha para usarse fuera de Norteamérica**

Terminado por Eka Chemicals, Inc.

Eka Chemicals, Inc. Terminado en fe 19-Ene-2010

MSDS CANADA



Nombre del producto CHLORINE DIOXIDE SOLUTION - SVP-PURE® Versión #: 18

5 / 5 AKZO NOBEL

# ANEXO C. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACIDO SULFURICO

Ultima Revisión:  
18/09/2013

## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

### ACIDO SULFURICO



#### SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

**Nombre del Producto:** ACIDO SULFURICO  
**Sinónimos:** Aceite de vitriolo, Acido para baterías, Ácido sulfúrico, Sulfato de hidrógeno, Acido de decapado, Espíritus de Azufre, Acido electrolito, Sulfato de dihidrógeno, ácido sulfúrico.  
**Fórmula:** H2SO4  
**Número Interno:**  
**Número UN:** 1830 al 1832  
**Clase UN:** 8  
**Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad:** Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2886355. Fax: (571) 2884367. Bogotá, D.C. - Colombia.  
**Teléfonos de emergencia:** CISPROQUIM Bogotá 2886012, Fuera de Bogotá 01 800 09 16012 (24 horas)

#### SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

**Usos:** En la manufactura de fosfato y sulfato de amonio. Otros usos importantes incluye la producción de rayón y fibras textiles, pigmentos inorgánicos, explosivos, alcoholes, plásticos, tintas, drogas, detergentes sintéticos, caucho sintético y natural, pulpa, papel, celulosa y catalizadores. Es usado en la refinación del petróleo, acero y otros metales. En electroplateado y como reactivo de laboratorio.

Nombre	COMPONENTES CAS	TWA	STEL	%
Acido Sulfurico	7664-93-9	0,2 mg/m3 como peso de la partícula toraxica. (ACGIH 2004)	N.R. (ACGIH 2004)	50-100

#### SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

##### VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

Peligro. Corrosivo. Higróscopico. Reacciona con el agua. Puede ocasionar daños en riñones y pulmones, en ocasiones ocasionando la muerte. Causa efectos fetales de acuerdo a estudios con animales de laboratorio. Peligro de cancer. Puede ser fatal si se inhala. Ocasiona severas irritaciones en ojos, piel, tracto respiratorio y tracto digestivo con posibles quemaduras.

##### EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

**Inhalación:** Irritación, quemaduras, dificultad respiratoria, tos y sofocación. Altas concentraciones del vapor pueden producir ulceración de nariz y garganta, edema pulmonar, espasmos y hasta la muerte.  
**Ingestión:** Corrosivo. Quemaduras severas de boca y garganta, perforación del estómago y esófago, dificultad para comer, náuseas, sed, vómito con sangre y diarrea. En casos severos colapso y muerte. Durante la ingestión o el vómito se pueden broncoaspirar pequeñas cantidades de ácido que afecta los pulmones y ocasiona la muerte.  
**Piel:** Quemaduras severas, profundas y dolorosas. Si son extensas pueden llevar a la muerte ( shock circulatorio). Los daños dependen de la concentración de la solución de ácido sulfúrico y la duración de la exposición.  
**Ojos:** Es corrosivo y puede causar severa irritación (enrojecimiento, inflamación y dolor) Soluciones muy concentradas producen lesiones irreversibles, opacidad total de la córnea y perforación del globo ocular. Puede causar ceguera. La repetida exposición a bajas concentraciones puede causar dermatitis. La exposición a altas concentraciones puede causar erosión dental y posibles trastornos respiratorios. El efecto crónico es la generación de cáncer.  
**Efectos crónicos:**

#### SECCIÓN 4: PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS

**Inhalación:** Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Evitar el método boca a boca. Mantener la víctima abrigada y en reposo. Buscar atención médica inmediatamente.  
**Ingestión:** Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua para diluir el ácido. No inducir el vómito.

Si éste se presenta en forma natural, suministre más agua. Buscar atención médica inmediatamente.

**Piel:** Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica inmediatamente.

**Ojos:** Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.

**Nota para los médicos:** Después de proporcionar los primeros auxilios, es indispensable la comunicación directa con un médico especialista en toxicología, que brinde información para el manejo médico de la persona afectada, con base en su estado, los síntomas existentes y las características de la sustancia química con la cual se tuvo contacto.

#### SECCIÓN 5: MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO

**Punto de inflamación (°C):** N.A.

**Temperatura de autoignición (°C):** N.A.

**Límites de inflamabilidad (%V/V):** N.A.

**Peligros de incendio y/o explosión:** No es inflamable, ni combustible, pero diluido y al contacto con metales produce hidrógeno el cual es altamente inflamable y explosivo. Puede encender materias combustibles finamente divididas. Durante un incendio se pueden producir humos tóxicos e irritantes. Los contenedores pueden explotar durante un incendio si están expuestos al fuego o por contacto con el agua por la alta liberación de calor.

**Medios de extinción:** Usar el agente de extinción según el tipo de incendio del alrededor. No use grandes corrientes de agua a presión. Use polvo químico seco, espuma tipo alcohol, dióxido de carbono.

**Productos de la combustión:** Dióxido de azufre y trióxido de azufre los cuales son irritantes y tóxicos.

**Precauciones para evitar incendio y/o explosión:** Mantener alejado de materiales combustibles finamente divididos y de metales. Evitar el contacto con agua porque genera calor. Mantener retirado de materiales incompatibles.

**Instrucciones para combatir el fuego:** Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Si usa agua (agua en forma de rocío) para apagar el fuego del alrededor evitar que haga contacto con el ácido. Mantenerse a favor del viento. Si es posible, retirarlo del fuego.

#### SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. Eliminar toda fuente de ignición. No tocar el material. Contener el derrame con diques hechos de arena, tierras diatomáceas, arcilla u otro material inerte para evitar que entre en alcantarillas, sótanos y corrientes de agua. No adicionar agua al ácido. Neutralizar lentamente, con ceniza de soda, cal u otra base. Después recoger los productos y depositar en contenedores con cierre hermético para su posterior disposición.

#### SECCIÓN 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

**Manejo:** Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en donde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente. Evitar la formación de vapores o neblinas de ácido. Cuando diluya adicione el ácido al agua lentamente. Nunca realice la operación contraria porque puede reaccionar violentamente.

**Almacenamiento:** Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor, ignición y de la acción directa de los rayos solares. Separar de materiales incompatibles. Rotular los recipientes adecuadamente. No almacenar en contenedores metálicos. No fumar porque puede haberse acumulado hidrógeno en tanques metálicos que contengan ácido. Evitar el deterioro de los contenedores. Mantenerlos cerrados cuando no están en uso. Almacenar las menores cantidades posibles. Los contenedores vacíos deben ser separados. Inspeccionar regularmente la bodega para detectar posibles fugas o corrosión. El almacenamiento debe estar retirado de áreas de trabajo. El piso debe ser sellado para evitar la absorción. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser resistentes a la corrosión. Disponer en el lugar de elementos para la atención de emergencias.

#### SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL

**Controles de ingeniería:** Ventilación local y general, para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional. Control exhaustivo de las condiciones de proceso. Debe disponerse de duchas y estaciones lavaojos.

##### EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL:

**Protección de los ojos y rostro:** Gafas de seguridad para químicos con protección lateral y protector facial completo si el contacto directo con el producto es posible.

**Protección de piel:** Guantes, botas de caucho, ropa protectora de cloruro de polivinilo, nitrilo, butadieno, viton, neopreno/butilo, polietileno, teflón o caucho de butilo

**Protección respiratoria:** Respirador con filtro para vapores ácidos.

**Protección en caso de emergencia:** Respirador de acuerdo al nivel de exposición. Traje de caucho, nitrilo, butadieno, cloruro de polivinilo, polietileno, teflón, caucho de butilo, o vitón. En contracción no conocida use traje encapsulado.

Nombre	CAS	TWA	ACGIH	STEL	%
Acido Sulfurico	7664-93-9	0,2 mg/m3 como peso de la particula	N.R. (ACGIH 2004)		50-100

### SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

**Apariencia, olor y estado físico:** Líquido aceitoso incoloro o café. Inodoro, pero concentrado es sofocante e higroscópico.  
**Gravedad Específica (Agua=1):** 1.84(98%), 1.4(50%).  
**Punto de Ebullición (°C):** 335 °C  
**Punto de Fusión (°C):** -20 °C  
**Densidad relativa del vapor (Aire=1):** 3.4  
**Presión de vapor (mm Hg):** 0.0001 hPa (20 °C)  
**Viscosidad (cp):** 21 / 25°C.  
**pH:** 0.3 (49 g/l, H<sub>2</sub>O, 25 °C)  
**Solubilidad:** Soluble en agua y alcohol etílico (descompone en este último).

### SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

**Estabilidad química:** Descompone a 340°C en trióxido de azufre y agua. El producto reacciona violentamente con el agua, salpicando y liberando calor.  
**Condiciones a evitar:** Calor, humedad, incompatibles.  
**Incompatibilidad con otros materiales:** Reacciona vigorosamente en contacto con el agua. Es incompatible además con Carburos, cloratos, fulminatos, metales en polvo, sodio, fósforo, acetona, ácido nítrico, nitratos, picratos, acetatos, materias orgánicas, acrilonitrilo, soluciones alcalinas, percloratos, permanganatos, acetiluros, epiclorhidrina, anilina, etilendiamina, alcoholes con peróxido de hidrógeno, ácido clorosulfónico, ácido fluorhídrico, nitrometano, 4-nitrotolueno, óxido de fósforo, potasio, etilenglicol, isopreno, estireno.  
**Productos de descomposición peligrosos:** Vapores Tóxicos de óxido de azufre cuando se calienta hasta la descomposición. Reacciona con el agua o vapor produciendo vapores tóxicos y corrosivos. Reacciona con carbonatos para generar gas dióxido de carbono y con cianuros y sulfuros para formar el venenoso gas cianuro de hidrógeno y sulfuro de hidrógeno respectivamente.  
**Polimerización peligrosa:** No ocurre polimerización.

### SECCIÓN 11: INFORMACION TOXICOLÓGICA

Las propiedades toxicológicas son dadas para la sustancia pura. DL50 (oral, ratas)= 2140 mg/Kg. LC50 (inhalación, conejillo de indias) = 18 mg/m<sup>3</sup>. LC50/2H (inhalación, rata) = 510 mg/m<sup>3</sup>. LC50/2H (inhalación, ratón) = 320 mg/m<sup>3</sup>. El producto (forma de neblina) se ha clasificado como : cancerígeno humano categoría 1 (IARC); sospechoso como cancerígeno humano, grupo A2 (ACGIH), carcinógeno OSHA. Se reportan efectos teratogénicos y mutagénicos en animales de laboratorio. Se considera un irritante primario. No existe información disponible sobre efectos neurotóxicos y reproductivos.

### SECCIÓN 12: INFORMACION ECOLÓGICA

Perjudicial para todo tipo de animales Toxicidad acuática: LC50/48H(agua aireada, camarón)=80-90ppm/48h. Condiciones de bioensayo no especificadas. CL50/48H Camarón adulto, agua salada=42.5-48 ppm. Condiciones de bioensayo no especificadas. En el agua el producto se disuelve rápidamente, produciendo una disminución de la viscosidad, facilitando su difusión en cuerpos de agua. A pH 6 y pH menor a 5, aumenta la concentración de iones calcio (provenientes de rocas y suelos). El ácido sulfúrico reacciona con el calcio y magnesio presentes para producir sulfatos. Es considerado tóxico para la vida acuática. En el suelo el producto puede disolver algunos minerales como calcio y magnesio, deteriorando las características de estos. En la atmósfera el producto puede removerse lentamente por deposición húmeda. En el aire puede ser removido por deposición en seco.

### SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES DE DISPOSICION

Neutralizar la sustancia con carbonato de sodio o cal apagada. Descargar los residuos de neutralización a la alcantarilla. Una alternativa de eliminación es considerar la técnica para cancerígenos, la cual consiste en hacer reaccionar dicromato de sodio con ácido sulfúrico concentrado (la reacción dura aproximadamente 1-2 días). Debe ser realizado por personal especializado. La incineración química en incinerador de doble cámara de combustión, con dispositivo para tratamiento de gases de chimenea es factible como alternativa para la eliminación del producto.

### SECCIÓN 14: INFORMACION SOBRE TRANSPORTE

Etiqueta negra y blanca de sustancia corrosiva. No transporte con sustancias explosivas, sustancias que en contacto con agua pueden desprender gases inflamables, sustancias comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos, ni alimentos. Grupo de empaque: II.

### SECCIÓN 15: INFORMACION REGLAMENTARIA

1. Ley 769/2002. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Artículo 32: La carga de un vehículo debe estar debidamente empacada, rotulada, embalada y cubierta conforme a la normatividad técnica nacional. 2. Decreto 1609 del 31 de Julio de 2002, Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera. 3. Ministerio de Transporte. Resolución número 3800 del 11 de diciembre de 1998. Por el cual se adopta el diseño y se establecen los mecanismos de distribución del formato único del manifiesto de carga. 4. Los residuos de esta sustancia están considerados en: Ministerio de Salud. Resolución 2309 de 1986, por la cual se hace necesario dictar normas especiales complementarias para la cumplida ejecución de las leyes que regulan los residuos sólidos y concretamente lo referente a residuos especiales. 5. Ministerio de Justicia. Ley 30 de 1986. Por la cual se adopta el Estatuto Nacional de Estupefacientes y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Justicia. Resolución 0009 del 18 de febrero de 1987. Consejo Nacional de Estupefacientes. Resolución No 0031 de junio 13 de 1991. Consejo

Nacional de Estupefacientes. Resolución No 007 de 1992. Consejo Nacional de Estupefacientes. Resolución 0001 del 30 de enero de 1995 por el cual se adiciona la resolución 09 de 1987. Mediante las cuales se establecen regulaciones para aquellas sustancias que puedan utilizarse para el procesamiento de drogas que producen dependencia.

#### **SECCIÓN 16: OTRAS INFORMACIONES**

La información relacionada con este producto puede no ser válida si éste es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular

#### **Bibliografía**

<http://bgaevaappscit:8083/dataquim/elemento/InformeEmergencia.php?cod=44>

07/05/2014