

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DE REMOCIÓN DE  
FÓSFORO Y CLORUROS DE LOS EFLUENTES RESIDUALES  
DE UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS  
UBICADA EN EL ESTADO ARAGUA**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Bello C., Angie K.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2006

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DE REMOCIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS DE LOS EFLUENTES RESIDUALES DE UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS UBICADA EN EL ESTADO ARAGUA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Andrés Rosales  
TUTOR INDUSTRIAL: Lic. Gabriel Betancourt

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Bello C., Anggie K.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2006

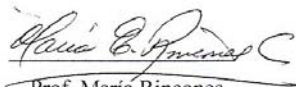
Caracas, Junio de 2006

Caracas, Junio de 2006

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Anggie K. Bello C., titulado:

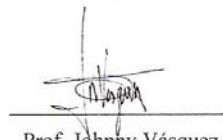
**“Evaluación de la problemática de remoción de fósforo y cloruros de los efluentes residuales de una empresa manufacturera de alimentos ubicada en el Estado Aragua”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. María Rincones

Jurado



Prof. Johnny Vásquez

Jurado



Prof. Andrés Rosales

Tutor Académico



Lic. Gabriel Betancourt

Tutor Industrial

## DEDICATORIA

*A Dios*, por haberme permitido alcanzar uno de mis sueños más anhelados y por ser guía espiritual que me lleva al camino del éxito. Te dedico el esfuerzo que hice para alcanzar esta estrella.

*A mi Padre*, quien ha sabido guiarme en el camino justo y correcto, por el apoyo que me has brindado en todo momento y por ser luz de inspiración en mi vida. A través de este Trabajo Especial de Grado te dedico lo que hoy representa mi primer logro, el título de Ingeniero Químico.

*A mi Madre*, por darme la vida y las herramientas para enfrentarla. Los retos que me has impuesto me han llevado a motivarme para lograr uno de mis sueños.

*A mis Hermanos y Sobrino*, Shirley, Jaime Miguel, Jan Claude, Jan Marie, Jan Paola y Rashir, les dedico la luz de la estrella que ahora tengo entre mis manos para lo que necesiten, por acompañarme en este largo camino, y espero ser un ejemplo para ustedes.

*A mi Esposo*, compañero inseparable quien en todo momento me brinda su apoyo incondicional, su amor, su protección y paciencia, compartiendo conmigo mis alegrías y tristezas. Ahora comienza un futuro muy hermoso para la familia que siempre hemos anhelado formar.

*A mi Abuela Ligia*, por ser un bastón incondicional en el que puedo apoyarme, en los momentos buenos y malos de mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

A *mis padres*, Morelia y Jaime, por darme la vida y enseñarse a luchar para alcanzar grandes metas en la vida, como esta estrella. Gracias.

A *mis hermanos*, por hacerme el camino más fácil y lleno de momentos felices.

A *mi esposo*, Adelson Pérez, por estar siempre allí cuando más te necesito, por ser partícipe de esta meta desde el comienzo y por hacerme tan feliz.

A *la Universidad Central de Venezuela*, mi alma mater, por darme la oportunidad de realizar mi meta.

A *mi tutor industrial*, Lic. Gabriel Betancourt, por su dedicación, apoyo incondicional, por los conocimientos transmitidos y por su amistad.

A *mi tutor académico*, Prof. Andrés Rosales, por su disposición y colaboración.

A *los Profesores*, María Rincones y Johnny Vásquez, por su guía y por brindarme su colaboración en todo momento.

Al personal de la corporación donde se realizó este trabajo, Nilio Moreno, Francisco Martínez, German Molina, Margrevi Boada, Josefina Betancourt, Alexander Cuevas y todos los que de alguna u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo.

A todos los profesores de la Universidad y a todas aquellas personas que de alguna forma colaboraron para alcanzar esta estrella tan brillante, aunque en este momento no los haya podido nombrar.

***GRACIAS A TODOS!!!!***

Bello C., Anggie K.

## **EVALUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DE REMOCIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS DE LOS EFLUENTES RESIDUALES DE UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS UBICADA EN EL ESTADO ARAGUA**

**Tutor Académico: Prof. Andrés Rosales. Tutor Industrial: Lic. Gabriel Betancourt. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2006, 139 p.**

**Palabras Claves:** Tratamiento de Aguas, Efluentes Líquidos, Residuos Industriales, Fósforo, Cloruros, Protección del Medio Ambiente.

**Resumen:** La mayoría de las industrias manufactureras de alimentos manejan dentro de sus procesos cantidades importantes de productos fosfatados y de cloruro de sodio (sal industrial), para la elaboración de sus productos y en otros fines para los cuales su funcionalidad es considerable. Es inevitable por ello, la presencia de contenidos importantes de fósforo y cloruros en los efluentes generados en las distintas zonas de una empresa con estas características. Dependiendo del destino final que tenga el agua de desecho, las concentraciones de fósforo y cloruros no pueden exceder un determinado valor en el fluente final, ya que estos pueden afectar la calidad del cuerpo de agua receptor.

En el caso de la empresa manufacturera de alimentos en estudio (EMA), el efluente final de su Planta de Tratamiento de Efluentes Residuales (PTER) presenta concentraciones de fósforo y cloruros que se aproximan a las máximas exigidas por la ley. Es por ello que el objetivo del presente estudio es realizar una evaluación integral del proceso de generación y tratamiento de estos efluentes líquidos residuales, con el fin de identificar y proponer acciones que contribuyan a asegurar la remoción efectiva de fósforo y cloruros. Es decir, para minimizar los niveles de estos compuestos hasta valores por debajo de los valores críticos exigidos por las autoridades en materia ambiental.

Para cumplir con estos objetivos, se siguió una metodología que contempló el reconocimiento de las distintas fuentes de generación de fósforo y cloruros dentro de la empresa, elaborando con ellas un diagrama de bloque de la situación, además se realizó una revisión técnica sobre diversos aspectos relacionados a la problemática. Posteriormente, se realizó el balance de materiales, para lo cual fue necesario medir tanto las concentraciones como los caudales de los efluentes en las distintas áreas de la planta, y en función a ellos se determinaron los aportes máxicos de fósforo y cloruros hacia la planta de tratamiento. Una vez procesada la información se identificó que existía, para cada compuesto, una corriente con un porcentaje de aporte máxico muy alto comparado con las otras. A partir de esta información se inició la

etapa de síntesis de alternativas, donde se llevó a cabo la evaluación de la remoción de fósforo por parte del sistema biológico de la PTER y mediante precipitación química (coagulación-floculación), para esta última se realizaron pruebas de laboratorio mediante un equipo de jarras, a fin de determinar la dosis óptima de coagulante, se realizaron comparaciones entre tres tipos de coagulantes y se verificó su incidencia en la remoción de fósforo. Por otro lado, para los cloruros, se realizó un diagnóstico del proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico del sistema de ablandamiento de agua, donde se había identificado la mayor generación de cloruros y se estudió la posibilidad de cambiar el regenerante actual por ácido clorhídrico.

Para disminuir los niveles de fósforo en el efluente final de la PTER, se propuso alimentar constantemente el Reactor Anaeróbico para aprovechar la remoción por parte del sistema biológico (anaeróbico-aeróbico) y dosificar 0,0625 ml/s de Cloruro Férrico en la primera Piscina Aeróbica, por un litro de agua residual a tratar, ya que este es el coagulante que arrojó mayor porcentaje de remoción con menos dosis que el resto de los coagulantes, a saber Policloruro de Aluminio y Aluminato de Sodio, mediante el ensayo de jarras. Por otra parte, se propuso disminuir a la mitad la masa de sal utilizada en el proceso de regeneración de la resina, esta cantidad se determinó en el diagnóstico realizado a dicho proceso, al igual que se fijaron nuevos valores en las variables de operación para obtener el mismo rendimiento de los suavizadores, así también se propuso recuperar el agua de las etapas de retrolavado y lavado rápido enviándola al tanque subterráneo de Planta de Agua. Además, se propuso almacenar la salmuera desechada de la regeneración en un tanque disponible en la Planta de Ablandamiento de Agua, e ir drenándola a un caudal de 0,1 l/s, a fin de diluirla con el resto de las corrientes afluentes a la PTER. A largo plazo, se propuso instalar un sistema de ósmosis inversa para garantizar un efluente de excelente calidad, aunque con las propuestas anteriores se logra alcanzar las especificaciones exigidas por la normativa legal.

Asimismo, se realizó un somero estudio económico de las propuestas planteadas, en el cual se obtuvo que para el fósforo se requiere un costo mensual de Bs. 591.692,4 por la compra del coagulante seleccionado. La inversión requerida para las propuestas realizadas en Planta de Agua es de U.S.\$ 1.441,86, la cual se recupera en dos meses por el ahorro en la compra de sal y energía eléctrica en el proceso de regeneración. El capital de inversión para el sistema de ósmosis inversa es de aproximadamente U.S.\$ 326.475.



## ÍNDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	3
I.1.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
I.2.-ANTECEDENTES.....	6
I.2.1.-Del problema.....	6
I.2.2.-De la investigación.....	6
I.3.-OBJETIVOS.....	8
<b>CAPÍTULO II: LA EMPRESA</b> .....	10
III.1.-PROCESO DE MANUFACTURA.....	10
III.2.-DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES RESIDUALES (PTER).....	21
<b>CAPÍTULO III: FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	27
III.1.-ASPECTOS GENERALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	27
III.2.-COMPOSICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	28
III.3.-SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.....	32
III.3.1.-Procesos Físicos.....	33
III.3.2.-Procesos Químicos.....	33
III.3.3.-Procesos Biológicos.....	34
III.4.-ETAPAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	36
III.4.1.-Tratamiento Preliminar.....	37
III.4.2.-Tratamiento Primario.....	38
III.4.3.-Tratamiento Secundario.....	39
III.4.4.-Tratamiento Terciario.....	40

## ÍNDICE GENERAL (Cont.)

	<u>Pág.</u>
III.4.5.-Tratamiento Avanzado.....	41
III.5.-ORIGEN DEL FÓSFORO Y LOS CLORUROS EN LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.....	43
III.6.-ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DEL FÓSFORO.....	44
III.7.-MÉTODOS AVANZADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA DISMINUIR FÓSFORO Y CLORUROS.....	49
III.7.1.-Precipitación Química.....	50
III.7.2.-Intercambio Iónico.....	58
III.7.3.-Ósmosis Inversa.....	59
III.7.4.-Desmineralización por Electrodiálisis.....	61
III.7.5.-Evaporación Multietapa.....	63
III.7.6.-Evaporación Multiefecto.....	64
III.7.7.-Evaporación por Compresión de Vapor.....	66
III.7.8.-Cristalización.....	66
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.....	69
<b>CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>82</b>
V.1.- IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS.....	82
V.1.1.-Procesos Involucrados en la Generación de Fósforo.....	82
V.1.2.- Procesos Involucrados en la Generación de Cloruros.....	83
V.2. ESTRATEGIA DE MUESTREO.....	85
V.3.-APORTES MÁSICOS DE FÓSFORO Y CLORUROS A LA PTER.....	86
V.3.1.-Determinación de la Concentración de Fósforo y Cloruros de las Corrientes Afluentes a PTER.....	86
V.3.2.-Determinación de la Concentración de Fósforo y Cloruros en las Corrientes de PTER.....	96
V.4.-EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS.....	103

## ÍNDICE GENERAL (Cont.)

	<u>Pág.</u>
V.4.1.- Alternativas para Remover Fósforo.....	103
V.4.1.1.- Evaluación de la Remoción de Fósforo por Parte del Sistema Biológico de la PTER.....	103
V.4.1.2.- Selección y Evaluación de Aditivos Químicos para Disminuir Fósforo por Precipitación Química.....	105
V.4.2.- Alternativas para Remover Cloruros.....	108
V.4.2.1.- Diagnóstico Previo del Proceso de Regeneración.....	108
V.4.2.2.- Evaluación del Ácido Clorhídrico (HCl) como Regenerante.....	110
V.5.-EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS AVANZADOS DE REMOCIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS.....	111
V.6.- PLANTEAMIENTO DE PROPUESTAS.....	113
V.6.1.- Propuestas para Disminuir Fósforo.....	113
V.6.2.- Propuestas para Disminuir Cloruros.....	114
V.7.- EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS SOLUCIONES PLANTEADAS.....	123
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	125
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES.....	128
BIBLIOGRAFÍA.....	130
APÉNDICES.....	133
APÉNDICE A- Técnicas Analíticas para la Determinación de Fósforo y Cloruros en los Efluentes Residuales Líquidos.....	133
APÉNDICE B- Cálculos Tipos para la Curva de Elución de Salmuera.....	135
APÉNDICE C- Cálculos Pertinentes a las Placas Orificios.....	137

## LISTA DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
Tabla 1. Concentraciones máximas de algunos contaminantes en efluentes acuosos residuales establecidas en el Decreto N° 3219.....	30
Tabla 2. Propiedades Físico-Químicas de las sustancias más empleadas para precipitar fosfatos.....	52
Tabla 3. Dosificaciones de aluminio necesarias para varios niveles de eliminación de fósforo.....	54
Tabla 4. Selección y ubicación de los puntos de muestreo.....	72
Tabla 5. Matriz de selección de tecnologías.....	78
Tabla 6. Baremo utilizado para la evaluación económica.....	80
Tabla 7. Data histórica de concentración de algunos parámetros en la PTER...	85
Tabla 8. Concentraciones de Fósforo y Cloruros en la descarga de Planta 1.....	87
Tabla 9. Caracterización del efluente de Planta 2.....	90
Tabla 10. Resumen de los aportes en las descargas directas del proceso productivo (corrientes más contribuyentes).....	92
Tabla 11. Caracterización del agua residual de la purga de las Calderas.....	93
Tabla 12. Resumen de los aportes que ofrecen las corrientes afluentes a PTER.....	95
Tabla 13. Resumen del balance de Fósforo y Cloruros para la PTER.....	101
Tabla 14. Resultados de las pruebas de jarras realizadas en la primera Piscina Aeróbica.....	106
Tabla 15. Requerimientos Micro-Nutritivos de los Microorganismos.....	107
Tabla 16. Resultados de las pruebas de jarras realizadas en el Sedimentador Primario.....	108
Tabla 17. Parámetros medidos para evaluar el ácido clorhídrico como posible regenerante de la resina de intercambio iónico.....	111
Tabla 18. Resultados de la matriz de selección de tecnologías.....	113
Tabla 19. Simulación del nuevo efluente de PTER.....	118

### LISTA DE TABLAS (Cont.)

	<u><i>Pág.</i></u>
Tabla 20. Propuesta para la recuperación del agua del proceso de regeneración.....	119
Tabla 21. Evaluación económica de aditivos químicos probados para remover fósforo.....	123
Tabla 22. Valores obtenidos en el proceso de regeneración.....	136

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Esquema de Conformación de la EMA.....	11
Figura 2. Diagrama de Bloques del Proceso de Molienda Húmeda del Maíz.....	13
Figura 3. Diagrama de Bloques del Proceso de Obtención de Almidones Modificados.....	15
Figura 4. Diagrama de Bloques del Proceso de Elaboración del Jarabe de Glucosa.....	17
Figura 5. Diagrama de Bloques del Proceso de Elaboración del Color Caramelo.....	17
Figura 6. Diagrama de Bloques de Planta de Ablandamiento de Agua.....	19
Figura 7. Diagrama de Bloques de la Planta de Tratamiento de Efluentes Residuales (PTER).....	26
Figura 8. Esquema descriptivo de la digestión anaeróbica.....	36
Figura 9. Esquema secuencial de una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas.....	42
Figura 10. Sistemas alternativos de eliminación biológica de fósforo: (a) Proceso A/O, (b) Proceso PhoStrip, y (c) RSD.....	47
Figura 11. Diagramas de flujo para la eliminación del fósforo: (a) pre-precipitación, (b) co-precipitación, (c) post-precipitación.....	53
Figura 12. Eliminación de fósforo soluble por adición de cloruro férrico.....	55
Figura 13. Concentración de fosfato férrico y de aluminio en equilibrio con fósforo soluble. (a) Fosfato de hierro (III), y (b) Fosfato de aluminio (III).....	57
Figura 14. Diagrama de flujo típico del Proceso de Ósmosis Inversa.....	61
Figura 15. Esquema de una unidad de Electrodialisis.....	62
Figura 16. Esquema del Proceso de Evaporación Multietapas.....	64
Figura 17. Proceso de Evaporación Multiefectos.....	65
Figura 18. Proceso de Evaporación por Compresión de Vapor.....	67
Figura 19. Esquema del Proceso de Cristalización.....	68

## LISTA DE FIGURAS (Cont.)

	<u>Pág.</u>
Figura 20. Flujograma de la Metodología.....	81
Figura 21. Masa de Fósforo aportada por la elaboración de almidones modificados.....	88
Figura 22. Masa de Cloruros aportada por la elaboración de almidones modificados.....	89
Figura 23. Masa de Fósforo aportada por los efluentes de Planta 2.....	91
Figura 24. Masa de Cloruros aportada por los efluentes de Planta 2.....	92
Figura 25. Estudio de elución de Cloruros durante el proceso de regeneración.	94
Figura 26. Concentración de Fósforo y caudal del afluente y efluente de la PTER.....	97
Figura 27. Masa de Fósforo en el afluente y efluente de la PTER.....	98
Figura 28. Concentración de Cloruros y caudal del afluente y efluente de la PTER.....	99
Figura 29. Masa de Cloruros en el afluente y efluente de la PTER.....	100
Figura 30. Contribución Másica de Fósforo y Cloruros.....	102
Figura 31. Concentración de Fósforo en el sistema biológico.....	104
Figura 32. Curva de Elución obtenida para la propuesta planteada.....	116
Figura 33. Situación de Planta de Agua y PTER con la propuesta planteada....	117
Figura 34. Tuberías necesarias para la propuesta en Planta de Agua.....	121
Figura 35. Esquema del Suavizador N° 3 de Planta de Agua.....	137

## INTRODUCCIÓN

El requerimiento de adecuarse a la legislación vigente en materia de protección y mejora del medio ambiente representa un importante reto. Las políticas nacionales e internacionales al respecto coinciden en la necesidad de incrementar de forma importante los conocimientos científicos y tecnológicos que permitan mejorar, desde el punto de vista ecológico y de impacto ambiental, tanto las tecnologías de producción como las tecnologías de depuración de las aguas residuales.

Cabe destacar que tanto las industrias como algunas viviendas y edificaciones, requieren el desarrollo de sistemas de depuración que sean capaces de purificar sus aguas residuales de manera eficaz y con costos de inversión cada vez más competitivos. En este sentido, se hace necesario la implementación de plantas de tratamiento que cumplan con estas premisas. Esta realidad conllevó a los ingenieros a ocuparse en esta materia, diseñando plantas que permitieran dar un tratamiento adecuado a los efluentes tanto domésticos como industriales, a fin de reducir la contaminación ambiental a niveles que fueran tolerables.

Es por ello que este tema ha tomado importancia al punto que existen hoy en día regulaciones sobre los niveles de contaminantes de los efluentes industriales, además de profesiones relacionadas específicamente con el tratamiento de aguas residuales, con el fin de acondicionarlas antes de ser llevadas a su destino final. Se han establecido una serie de agentes contaminantes de las aguas, siendo algunos de ellos el fósforo y el ión cloruro. El fósforo, es un nutriente para los microorganismos que descomponen la materia orgánica presente en el agua residual, este al ingresar a los cuerpos de agua receptores produce el proceso de eutrofización. Por su parte, el ión cloruro, altamente soluble en agua, y que al ser absorbido por la flora, causa su envenenamiento y destrucción.



El propósito de este Trabajo Especial de Grado consistió en realizar un estudio analítico que permita proponer alternativas para minimizar la concentración de fósforo y cloruros en el efluente de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de una empresa manufacturera de alimentos, ya que las concentraciones de estos compuestos se encuentran por encima de la máxima permitida por la legislación que aplica según la ubicación geográfica de la planta. <sup>[1]</sup>

Este proyecto se compone de dos etapas, la primera donde se realiza el análisis diagnóstico de la situación de la planta en términos de concentración de fósforo y cloruros, realizando tanto la revisión bibliográfica adecuada como el análisis experimental más conveniente para obtener las conclusiones necesarias; y en la segunda etapa se busca plantear soluciones integrales al problema en función a los resultados obtenidos en la primera.

Este Trabajo Especial de Grado contribuye a llenar un vacío cognitivo en el área de tratamiento de cloruros en aguas residuales, ya que en la actualidad hay pocas tecnologías en este sentido, lo cual motiva a identificar claramente las que existen hoy en día, a fin de mejorarlas o adaptarlas de forma que puedan ser útiles para resolver este tipo de problemas a nivel industrial. Igualmente se busca plantear una solución a nuestro problema que permita minimizar las concentraciones de fósforo, para reducir la emisión de potenciales contaminantes hacia los cuerpos de agua.

A partir de este estudio podrán surgir estudios posteriores que lo complementen, es decir, mejorando las tecnologías que aquí se propongan, o estableciendo nuevas que permitan reducir las concentraciones de los compuestos en estudio, para que en un futuro se pueda reutilizar el agua de la Planta de Tratamiento de Efluentes Residuales de la empresa en estudio, buscando así sembrar conciencia en el país en la importancia de saber ahorrar lo que hoy abunda pero mañana puede escasear.

---

---

## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo inicial se presenta una síntesis de los elementos que justifican la realización de este Trabajo Especial de Grado, partiendo del planteamiento del problema a estudiar, los antecedentes y los objetivos planteados tanto general como específicos.

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Toda actividad humana tiene un impacto dentro y fuera de su entorno, la contaminación ambiental no sólo altera el equilibrio ecológico produciendo mortandad de algunas especies animales y vegetales o la proliferación descontrolada de otras, sino que puede destruir en forma definitiva las diferentes formas de vida en los lugares afectados. En casi todos los países industrializados se ha tomado conciencia de esta situación y se han planteado como reto detener la destrucción de nuestro hábitat. Venezuela, por su parte, como país con un componente importante de industrias manufactureras, se ve obligado a afrontar dicho reto. Es así como entre las actividades de los diferentes sectores industriales, ha ido creciendo la necesidad de prevenir, eliminar o minimizar los impactos negativos al ambiente, ya sea a través de la implementación de prácticas de prevención de la contaminación o del tratamiento de los efluentes antes de ser vertidos al medio circundante.

En el Estado Aragua, donde se concentra una significativa porción del parque industrial venezolano, está ubicada una empresa manufacturera de alimentos (que a los efectos del presente trabajo será denominada EMA) que se ha establecido entre sus objetivos estratégicos minimizar los impactos negativos que puedan ocasionar sobre el ambiente los desechos que se generan de su actividad comercial.

---

---

Esta empresa, es una corporación que comprende tres filiales: la primera de estas se dedica principalmente al procesamiento, por molienda húmeda, del grano de maíz y a la transformación química del almidón para ajustar su viscosidad y es materia prima para otras industrias, la segunda procesa trigo para producir harinas y sémolas de alta calidad y la última, se dedica a la fabricación de productos de consumo masivo y directo, utilizando como materia prima principal el almidón de maíz.

Las actividades manufactureras que realiza cada una de estas filiales, generan desechos entre los que están los residuos líquidos los cuales deben ser tratados adecuadamente antes de verterlos a un cuerpo de agua, debido a su alto contenido de materia orgánica, además de las sustancias disueltas en estos, básicamente compuestos de: nitrógeno, fósforo y cloruros, entre otros, que suelen representar la principal problemática en el tratamiento de los efluentes residuales de las empresas manufactureras de alimentos.

Actualmente, las aguas industriales residuales de la EMA presentan concentraciones de cloruros y fósforo que se aproximan al límite superior de las especificaciones, exigidas por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR), en el decreto 3219 publicado en Gaceta Oficial N° 5305 <sup>[1]</sup>, siendo dichos límites máximos 1000 y 1 mg/l, para cloruros y fósforo, respectivamente.

Los cloruros, provienen de las reacciones de una base y ácido clorhídrico o directamente de salmueras (Cloruro de Sodio) que se utilizan como materia prima. Dado que la empresa en estudio vierte sus efluentes tratados indirectamente al Lago de Valencia, siendo este un cuerpo endorreico que por evaporación concentra los minerales y contaminantes presentes en él, como es el caso de los cloruros, se ve afectado su principal uso, que es el riego. Pues, esta agua puede causar problemas de toxicidad en los cultivos por degradación química del suelo afectando la

---

---

permeabilidad del mismo; y por otra parte en los usos industriales causan incrustaciones y corrosión en las tuberías.

El fósforo por su parte, presente principalmente como fosfato, ocasiona la eutrofización de las aguas, es decir se produce un excesivo crecimiento de plantas acuáticas, éstas tienden a cubrir la superficie del cuerpo de agua impidiendo el libre intercambio de oxígeno y dióxido de carbono; al morir estas plantas, se descomponen en el cuerpo de agua consumiendo el oxígeno presente en éste, al cabo de un tiempo ya no hay oxígeno disponible y la degradación tiene que hacerse de forma anaerobia, esto es, en ausencia de oxígeno, dando por consecuencia productos secundarios como metano, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos que le confieren al cuerpo de agua un olor desagradable.

El tratamiento de estos problemas no es sencillo, por lo menos en el caso de los cloruros, ya que los tratamientos convencionales de aguas residuales industriales no permiten disminuir la concentración de este agente, por su gran solubilidad en agua. Esto se convierte en agravante del problema y justifica aún más la búsqueda de soluciones para el mismo, tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

Con la realización de este Trabajo Especial de Grado, se persigue identificar alternativas bien sea a través de tratamientos avanzados de las aguas residuales de la EMA o tratando de minimizar las posibles fuentes de contaminación de la misma, de manera de adecuar u optimizar la operación de la planta de tratamiento de efluentes de la empresa antes mencionada, con miras a mantener las concentraciones de fósforo y cloruros dentro de los parámetros exigidos y considerando además que dicha empresa tiene contemplado en sus planes a corto plazo incrementar su producción.

---

---

## ANTECEDENTES

Este Trabajo Especial de Grado considera hechos e investigaciones realizadas con anterioridad, para tener un punto de partida sobre el cual iniciar el estudio correspondiente al problema planteado.

### **Del problema**

En la EMA no se ha realizado un estudio a nivel de consultoras para cuantificar las concentraciones de cloruros y fósforo desde sus posibles fuentes de generación (afluentes), tampoco se ha realizado una evaluación referente a la reingeniería de su planta de tratamiento de aguas residuales, en función de disminuir la concentración de dichos contaminantes. Sólo ha sido sometida a auditorías trimestrales por parte de un laboratorio certificado por el MARNR que evalúa estos parámetros, y aún cuando los niveles de fósforo y cloruros encontrados están por debajo de los límites ambientales exigidos, existe un riesgo potencial de que estos aumenten al incrementarse la capacidad de producción.

### **De la investigación**

El problema de las altas concentraciones de Cloruros y Fósforo en aguas residuales industriales y su necesaria eliminación o reducción se ha presentado en diferentes industrias, a continuación se mencionan algunas de ellas y el mecanismo utilizado para solucionar dicha situación.

- ✚ La electrodiálisis ha sido empleada para el tratamiento de cloruros, particularmente con las aguas saladas municipales en las compañías hidrológicas. En una operación de aguas residuales en las Islas Canarias (España), los cloruros fueron reducidos de 115 a 80,5 mg/l por electrodiálisis, y el agua fue reutilizada en sistemas de riego. <sup>[2]</sup>

- 
- 
- ⊕ En Israel, la descarga de salmuera al mar en la actualidad está prohibida por la ley, es por ello que las plantas de tratamiento de las distintas industrias han estado trabajando en reutilización de sus aguas efluentes, siendo ésta la tendencia actual. Se ha logrado que la concentración de cloruros disminuya desde 120 hasta 70 mg/l mediante sistema de ósmosis inversa, permitiendo su uso para distintos fines dentro de las mismas industrias. <sup>[3]</sup>
  
  - ⊕ En una industria manufacturera de productos cárnicos venezolana. Se ha logrado disminuir la concentración de cloruros en los efluentes residuales desde 1400 hasta 1000 mg/l ajustando la cantidad de sal común (NaCl) utilizada para regenerar la resina que suaviza el agua para el proceso productivo. Además, se estableció que es factible disminuir la concentración de cloruros desde 1000 mg/l hasta 100 mg/l, mediante un sistema de ósmosis inversa, que permite recuperar y reutilizar la sal, y a la vez generar un efluente que se puede reutilizar en las calderas de dicha empresa. <sup>[4]</sup>
  
  - ⊕ En Venezuela, específicamente en el Estado Aragua, se realizaron estudios en una empresa de embutidos donde se logró reducir la concentración de fósforo en un 50%, empleando la tecnología de coagulación-floculación en un sistema de flotación por aire disuelto; los aditivos utilizados fueron alumbre y un polímero floculante. Sin embargo, el porcentaje de remoción no justifica el costo de los químicos empleados y además no se alcanzó el nivel de concentración establecido por el MARNR. <sup>[5]</sup>
  
  - ⊕ Se realizó una investigación en una empresa cervecera venezolana, para disminuir los niveles de fósforo presentes en los efluentes residuales, obteniéndose como resultado, que la sustitución de un detergente a base de ácido fosfórico, por otro que no presenta compuestos fosforados, disminuye en un 47% el aporte de fósforo en los afluentes de la planta de tratamiento de

---

aguas residuales y por ende menos concentración en el efluente de esta planta.  
[6]

- ⊕ Se realizó un estudio para la remoción de fósforo en aguas servidas municipales mediante precipitación química, utilizando como coagulante el lodo de alumbre consumido de una planta de tratamiento de agua ubicada en Atenas (Grecia), es decir el lodo purgado del tratamiento físico-químico. Se comparó dicho coagulante con alumbre, cloruro de hierro, sulfato de hierro e hidróxido de calcio a un pH constante de 6. Los resultados arrojados indicaron que estos últimos coagulantes, a excepción del hidróxido de calcio, son más eficientes en la remoción de fósforo que el lodo de alumbre consumido, con el pH antes indicado. [7]

## **OBJETIVOS**

### **General:**

Este Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo general realizar una evaluación integral del proceso de generación y tratamiento de los efluentes líquidos residuales de la EMA, con el fin de identificar y proponer acciones que contribuyan a asegurar la remoción efectiva de fósforo y cloruros.

### **Específicos:**

- ⊕ Identificar y establecer las posibles fuentes de aporte de fósforo y cloruros en el proceso de manufactura.
- ⊕ Cuantificar las concentraciones de fósforo y cloruros en los afluentes y efluentes de la planta de tratamiento de aguas industriales.

- 
- ⊕ Establecer las posibles causas que ocasionan aumentos en las concentraciones de fósforo y cloruros de los afluentes y efluentes de la planta de tratamiento de aguas industriales.
  
  - ⊕ Identificar y proponer soluciones para controlar los contenidos de fósforo y cloruros presentes en las aguas residuales tratadas.
  
  - ⊕ Establecer la factibilidad técnica y económica de implantación de las soluciones propuestas.



---

---

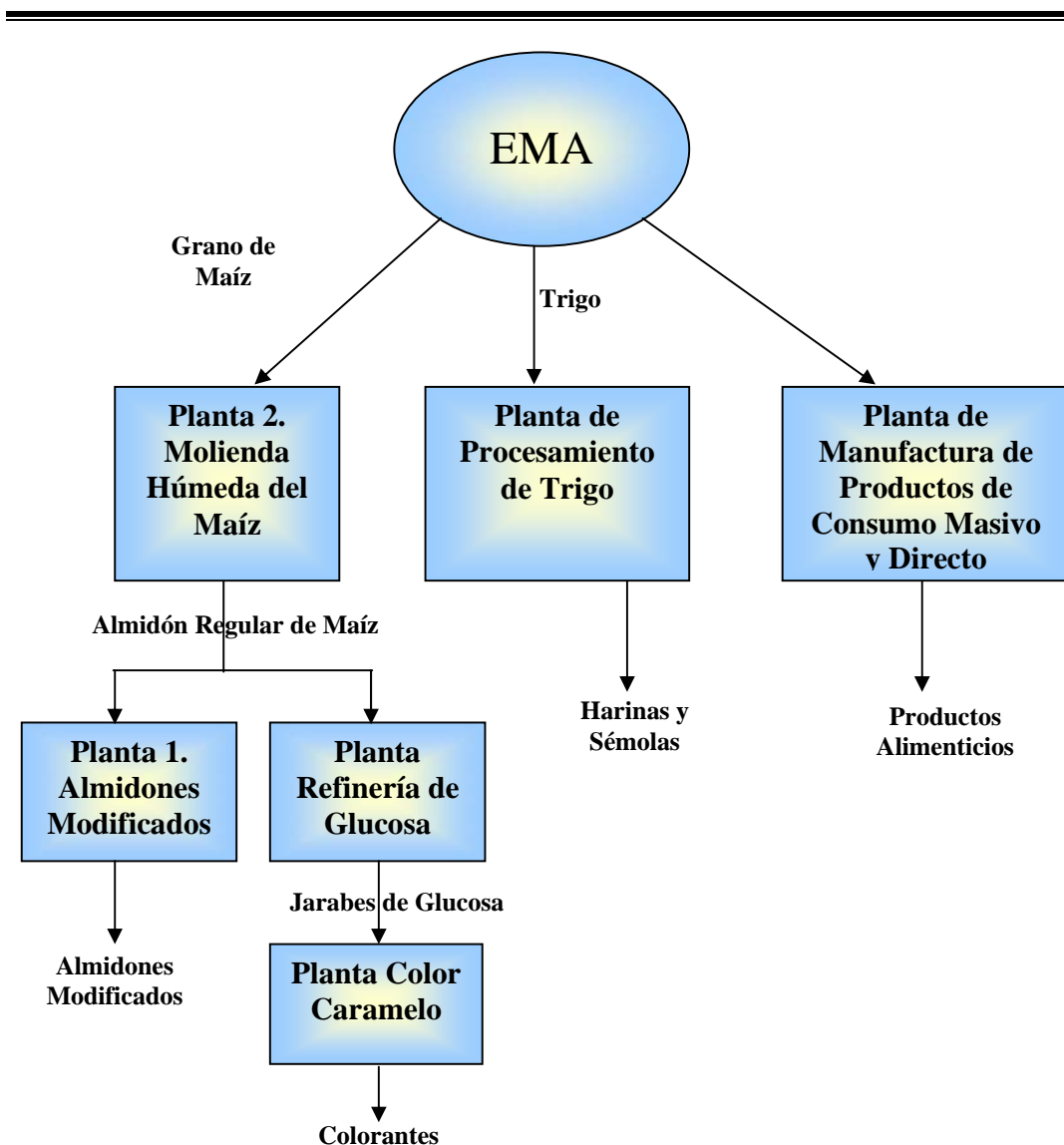
## CAPÍTULO II

### LA EMPRESA

En este capítulo se presenta una descripción simplificada de la Empresa Manufacturera de Alimentos (EMA) y de su Planta de Tratamiento de Efluentes Residuales (PTER), donde se realizó este Trabajo Especial de Grado.

#### II.1.- PROCESO DE MANUFACTURA:

Como fue mencionado en el capítulo introductorio, la EMA es una corporación que comprende tres filiales: la primera de éstas dispone de una planta que se dedica principalmente al procesamiento por molienda húmeda del grano de maíz y a la transformación química del almidón para modificar su viscosidad, antes de pasar como materia prima a otros procesos. El grano de maíz es sometido a una maceración o “cocción” para extraer sus componentes esenciales, tales como: almidón, gluten, fibra, germen y sólidos solubles de la maceración. Esta planta (Planta 2) genera un caudal de efluentes líquidos de aproximadamente 1,5 l/s. Posteriormente, el almidón regular es transportado a otras plantas, donde es sometido a una transformación química para dar como producto almidones modificados o especiales (Planta 1) que se utilizan en la industria alimenticia y papelera, entre otras. Estos almidones modificados se someten a un proceso de lavado y secado, que además origina 3,5 l/s de agua residual. También, el almidón regular de maíz es utilizado por una tercera planta (Refinería de Glucosa) para fabricar jarabes de glucosa y a su vez una cuarta planta (Color Caramelo) elabora colorantes líquidos a partir de estos jarabes de glucosa. Estas últimas solo desechan agua de limpieza aproximadamente dos veces a la semana, es poco significativo este caudal. En la Figura 1 se muestra un diagrama de la EMA y sus filiales. Posteriormente, se presenta la descripción del proceso de cada planta con su respectivo diagrama de bloques.



**Figura 1. Esquema de Conformación de la EMA.**

*Planta de Molienda Húmeda del Maíz (Planta 2):* En la Figura 2 se observa que a esta planta llega el maíz proveniente de los silos conducido por un transportador de cadena, que alimenta a un tornillo sin fin que va distribuyendo el maíz a las diferentes tinas de maceración, a las cuales se le introduce agua azufrada para realizar la cocción y posterior separación de sus componentes. Una vez realizada la maceración, el maíz es conducido a un tamiz que permite retirar el agua que lo

---

---

arrastra, luego este es enviado a la primera molienda que constituye un molino desgerminador que rompe el maíz. De este molino sigue a un tanque de almacenamiento de la primera molienda y luego al primer paso de hidrociclones, en estos se aprovecha la baja densidad del germen para sacarlo por el tope mediante fuerza centrífuga, mientras que la fibra, el gluten y el almidón salen por el fondo, trasladándose a un tamiz curvo que produce la separación del material sólido y líquido. La parte sólida va al segundo molino y el licor al tanque de almacenamiento de la segunda molienda. El germen es enviado a un tanque de almacenamiento para su posterior secado.

Una vez que el sólido que contiene la fibra, el gluten y el almidón pasa por el segundo molino, se traslada al tanque de almacenamiento de la segunda molienda y posteriormente al segundo paso de hidrociclones para recuperar el germen. Este se envía a un segundo tamiz curvo donde el sólido cae al tanque de almacenamiento de la primera molienda y el filtrado al tanque de la segunda molienda. La corriente de fondo de los hidrociclones va a un tanque de almacenamiento luego a un tamiz donde se produce la separación del material y el filtrado. Este último es enviado a un tanque de almacenamiento y las partículas sólidas o fibras se someten a un lavado.

Seguidamente, el almidón y el gluten pasan a una centrifuga, los cuales son alimentados por la parte superior, produciéndose la separación de los mismos. El gluten obtenido es llevado a una segunda centrifuga para obtener por un lado gluten pesado que posteriormente es secado y por el otro agua. El almidón obtenido se dirige a un tanque de almacenamiento el cual alimenta a una batería de 11 ciclones, es decir 11 ciclones, por los que se hace circular agua en contracorriente. Este es básicamente un proceso de refinación, donde se lava el almidón y se separa la mayor cantidad de gluten. El almidón terminado es enviado a un tanque que alimenta una centrifuga, en esta se realiza el presecado del mismo, luego se pasa a una caja de acero inoxidable para homogenizarlo y finalmente es conducido por transportadores sin fin hasta un molino de dispersión y luego se lleva a un secador flash.

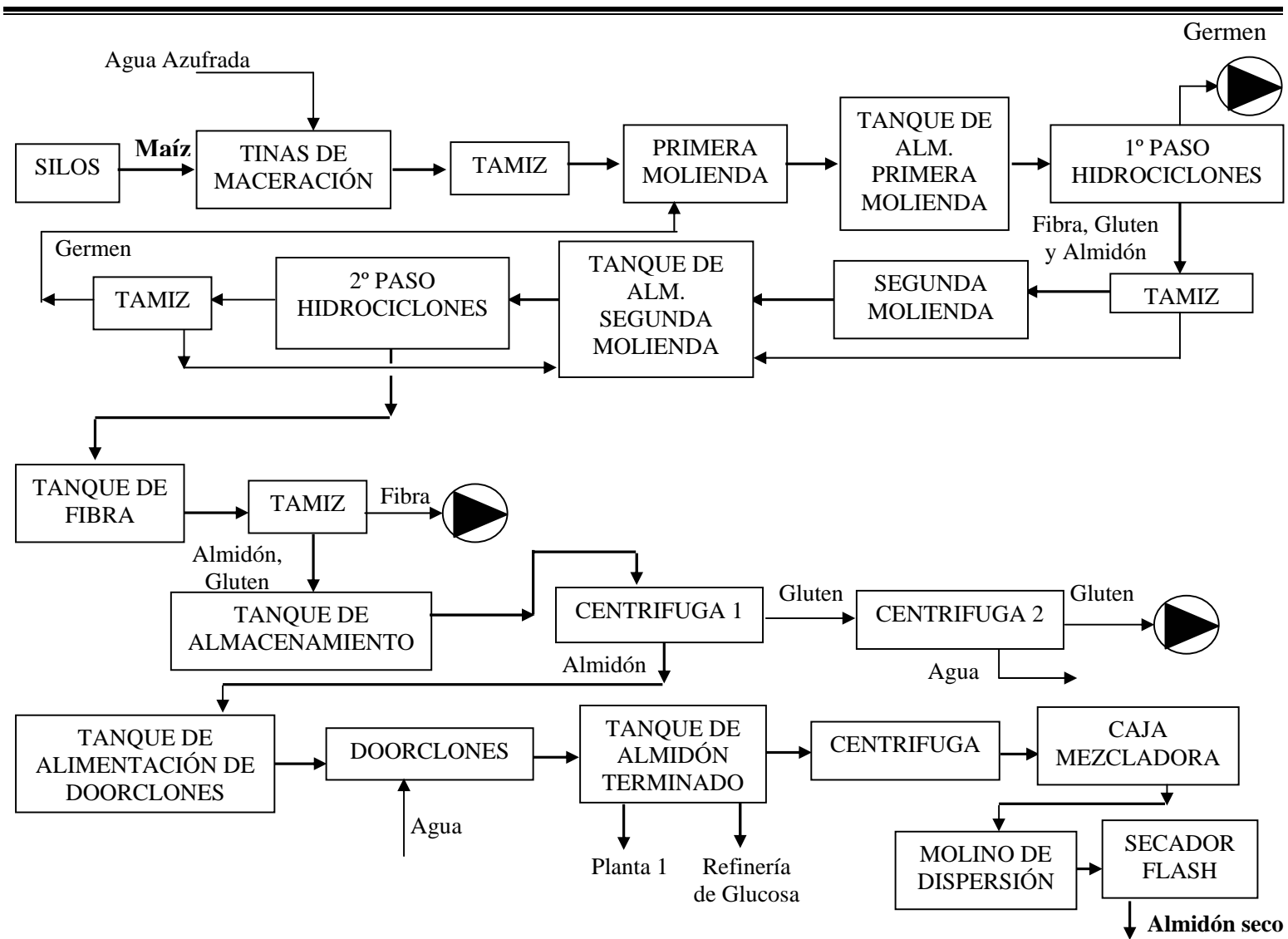


Figura 2. Diagrama de Bloques del Proceso de Molienda Húmeda del Maíz.



---

***Planta de Almidones Modificados (Planta 1):*** En esta planta se realiza la modificación química del almidón para así lograr una mayor viscosidad, mejor viscoelasticidad y se pueden obtener almidones que resisten altas condiciones de temperatura y acidez. Todas estas propiedades hacen a los almidones modificados más deseables y aplicables en la industria de los alimentos, ya que pueden adaptarse a las condiciones de procesamiento y almacenamiento, dándole mejores características a los productos alimenticios.

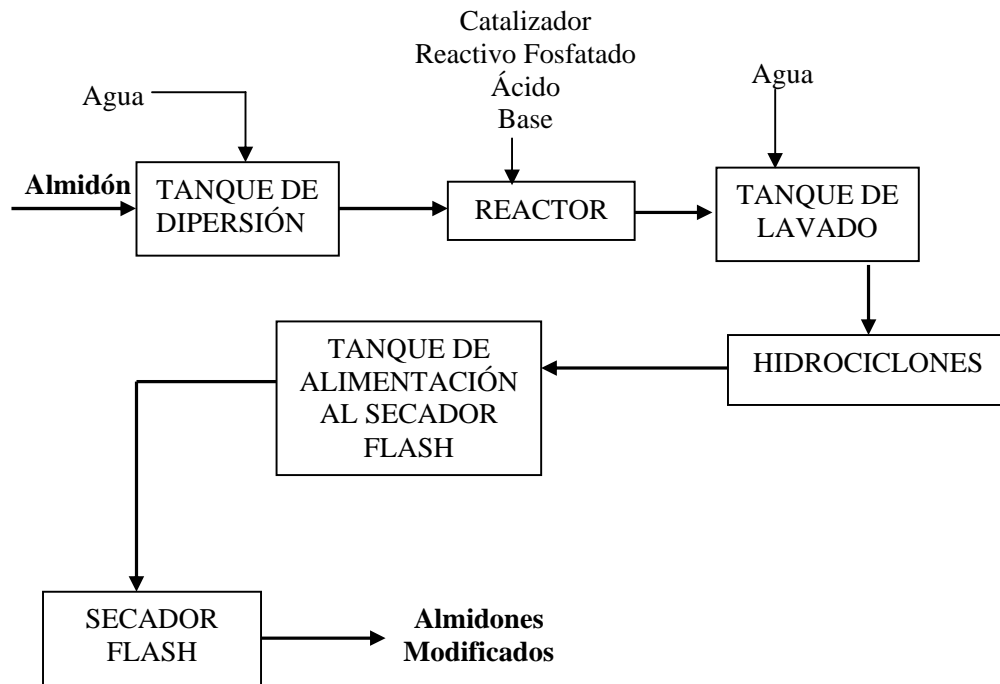
El proceso de fabricación de un almidón modificado químicamente consiste en realizar la dispersión del almidón, es decir, la disolución del almidón seco en agua; una vez disuelto se transfiere esta suspensión a un reactor donde se realiza la reacción de modificación como tal; en éste, a la suspensión que esta siendo transferida, se le determina pH y densidad, de tal manera que si estos parámetros no se encuentran dentro de los límites de especificación de proceso, se ajusta con la adición de agua o almidón, para el caso de la densidad o con la adición de una base o un ácido para el caso del pH; mientras se termina de bombear dicha suspensión. En la Figura 3 se presenta el diagrama de bloques para este proceso.

Seguidamente, se adiciona un catalizador al reactor y luego de un tiempo determinado, se le añade un reactivo fosfatado. Luego, se realiza cada hora un análisis de la viscosidad hasta que esté en el valor requerido. Una vez encontrado este valor, se procede a detener la reacción agregando un ácido hasta obtener un pH, en el cual el fosfato no continúe reaccionando. Consecutivamente, se eleva el pH hasta un rango alcalino determinado, adicionando un álcali; luego, se acetila el almidón y al cabo de un tiempo se realiza nuevamente un ajuste de pH.

Posteriormente, se alimenta un tanque de lavado con el almidón modificado y agua fresca, haciendo pasar el almidón por hidrociclones, ajustando la densidad con los niveles de agua y almidón, si es necesario. Luego, se transfiere la lechada de

---

almidón a un secador flash, para eliminarle humedad al mismo. Después, se traslada el producto al área de envasado y finalmente, se almacena.



**Figura 3. Diagrama de Bloques del Proceso de Obtención de Almidones Modificados.**

*Planta de Refinería de Glucosa:* Esta planta produce jarabes de glucosa a partir de almidón regular de maíz, que son utilizados como materia prima para empresas farmacéuticas, alimenticias, de confites, textileras, entre otras. El proceso de producción de esta planta se basa en hacer pasar una lechada de almidón regular de maíz por un tanque acidificador, donde es calentada con inyección directa de vapor a una agitación constante, al mismo tiempo se va incorporando cuantitativamente un ácido para conseguir una ruptura parcial de las moléculas de almidón. Luego, la solución es bombeada desde el tanque acidificador hacia un convertidor continuo (intercambiador de calor de tubo y carcasa), en el que se somete la solución a una transferencia de calor en paralelo por convección (almidón y vapor); es decir, mientras que el vapor circula por la parte externa, el almidón lo hace por las tuberías

---

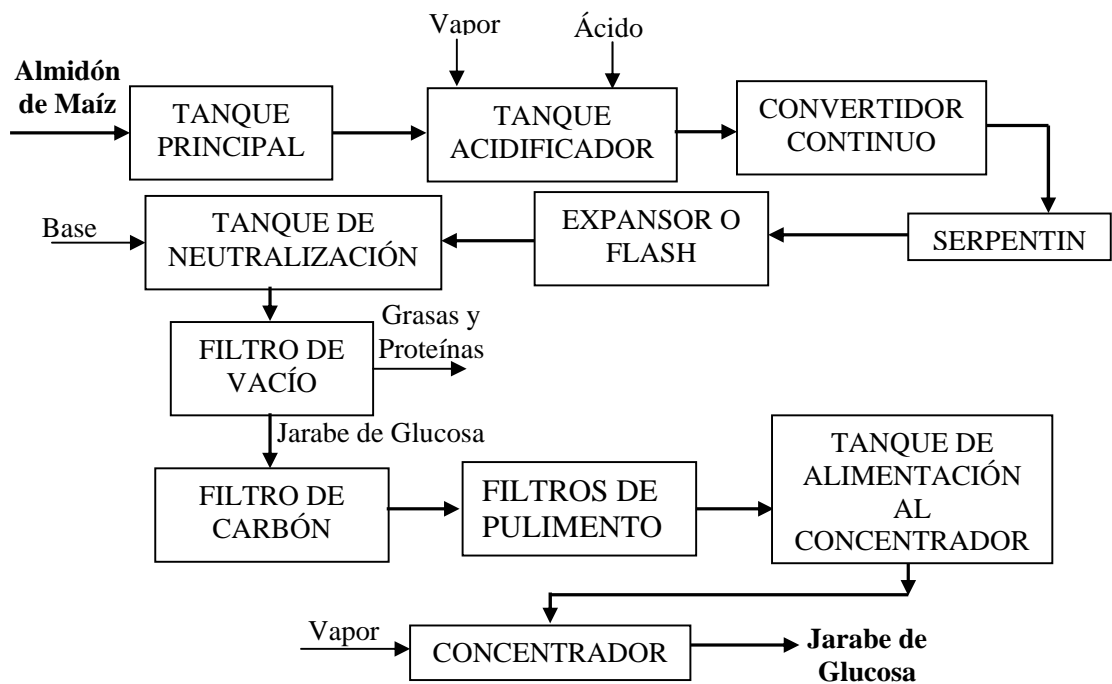
---

de menor diámetro, ambos en el mismo sentido. En este proceso continuo se produce el estallido de las moléculas de almidón por efecto del aumento progresivo de la temperatura y consecuentemente la aparición de las moléculas de glucosa en suspensión con partículas tanto de grasa como de proteína.

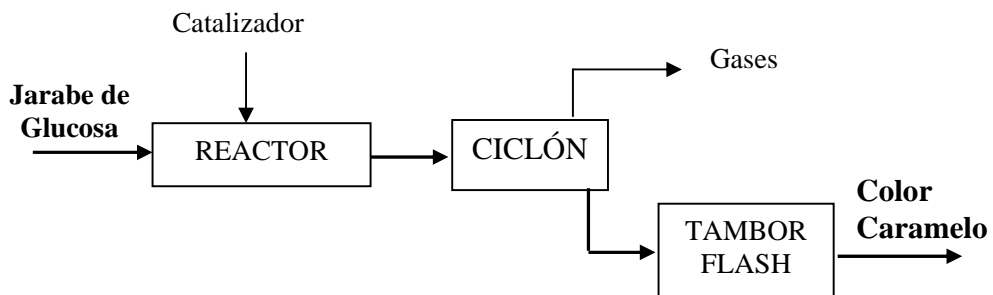
La suspensión que sale del convertidor se dirige a un serpentín para producir un choque térmico, luego va a un expansor o flash donde se libera el calor de la solución al medio ambiente. Seguidamente, esta suspensión es enviada a un tanque para neutralizarla con carbonato de sodio (Soda Ash), con esta operación se pretende alcanzar una separación de las grasas y proteínas de la solución por diferencia de densidades, luego se procede a la filtración de esta por vacío para eliminar las grasas y las proteínas. Posteriormente, se decolora el jarabe de glucosa con un filtro de carbón activado, el cual reacciona con los pigmentos para eliminarlos. Finalmente, se concentra el jarabe de glucosa, para ello se hace uso de un equipo concentrador al cual se le incorpora vapor indirectamente a través de un serpentín, para evaporar por convección y al vacío el agua contenida en el producto. En la Figura 4 puede observarse el proceso que se lleva a cabo en la Planta de Refinería de Glucosa.

***Planta Color Caramelo:*** En esta planta se fabrica color caramelo a partir de jarabes de glucosa que son demandados por industrias farmacéuticas y de alimentos. La materia prima para esta planta la proporciona la Planta de Refinería de Glucosa, esta es enviada a un reactor con agitación recubierto por una chaqueta, donde se le adiciona un catalizador y se le suministra una temperatura para llevar a cabo la reacción, hasta obtener el color deseado del producto. Una vez terminada la reacción, se envía el colorante a un ciclón, donde se volatilizan gases y el material más pesado descende, para ser dirigido a un flash en el que se produce una expansión y luego el producto es enfriado. En la Figura 5 se puede observar esquemáticamente este proceso.





**Figura 4. Diagrama de Bloques del Proceso de Elaboración del Jarabe de Glucosa.**



**Figura 5. Diagrama de Bloques del Proceso de Elaboración del Color Caramelo.**

La segunda empresa filial procesa trigo por molienda seca, para producir harinas y sémolas de alta calidad utilizadas en la preparación de pan, postres y galletas; mientras que la tercera y última de estas filiales, se dedica a la fabricación de productos de consumo masivo y directo, utilizando como materia prima principal el

---

---

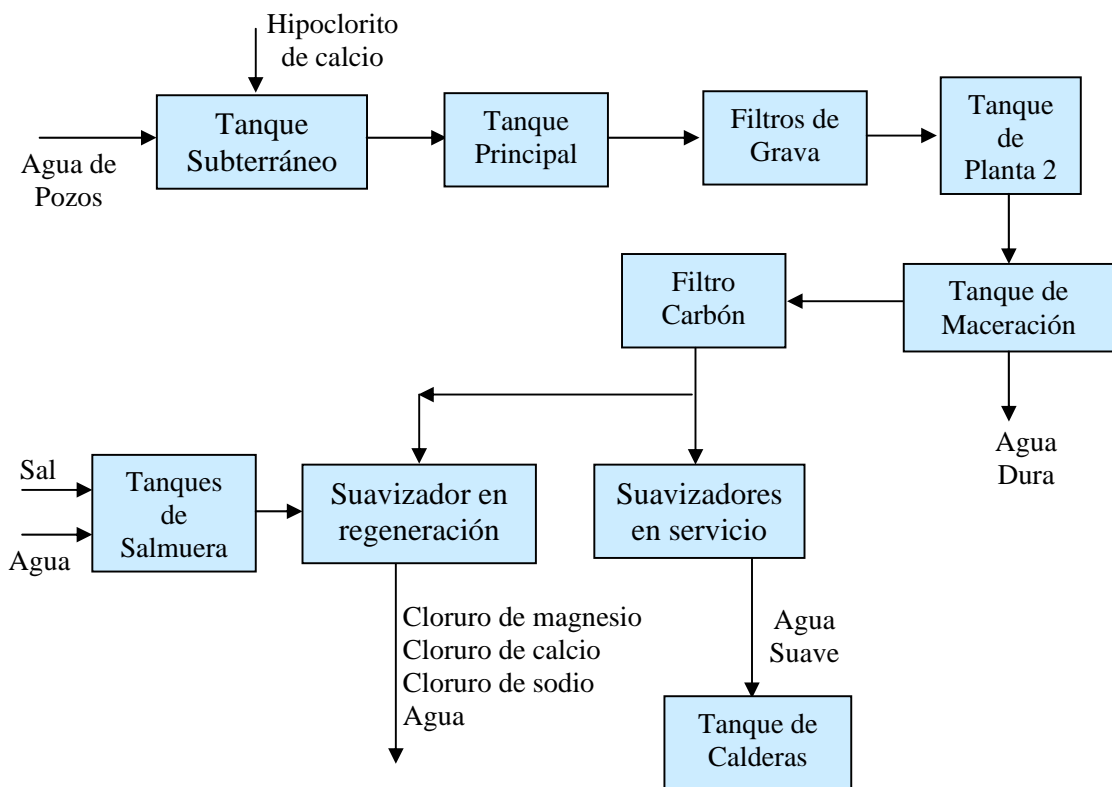
almidón regular de maíz, para el mezclado y envasado de los mismos; también por extrusión directa de harinas y otros aditivos se obtienen otros productos alimenticios de consumo directo. Esta última filial, generan como desecho líquido solo agua de limpieza y lo hacen una vez a la semana, lo que hace este caudal despreciable por la frecuencia de limpieza. Es importante destacar que la segunda empresa filial realiza la limpieza de su planta en seco, es decir que prácticamente no desecha agua, ni de limpieza ni del proceso de producción.

En el área de los servicios industriales se cuenta con una sala de cinco (5) calderas y una planta para el tratamiento del agua de las calderas y de algunas secciones del proceso productivo (Planta de Agua), así como también la generación del agua potable para la corporación. En dicha planta, se elimina la dureza del agua mediante intercambio iónico, el cual se lleva a cabo en unos suavizadores, se trata de columnas rellenas con resina catiónica, que sustituyen cationes  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  que tiene el agua dura por cationes  $2\text{Na}^{+}$ , evitando deposiciones de sales de calcio y magnesio en los tubos de las calderas. Esta resina, se somete a una regeneración con salmuera para activarla nuevamente y así reutilizarla en el intercambio iónico. La planta de ablandamiento de agua desecha un caudal de aproximadamente 5 l/s y el desecho de las calderas es insignificante, con respecto al resto de los caudales.

El agua cruda que alimenta a la Planta de Agua proviene de un sistema de captación subterránea del agua. Desde cuatro pozos identificados en planta como N° 3, N° 4, N° 5 y N° 6. El agua captada se envía a la Planta de Ablandamiento de Agua, donde se recolecta en un tanque subterráneo de agua de 40.000 litros de capacidad, en este tanque se inyecta cloro en forma de hipoclorito de calcio para desinfectar el agua. En la Figura 6 se presenta el funcionamiento de la Planta de Ablandamiento de Agua, tanto en el proceso de suavizamiento como durante la regeneración.

El agua proveniente del Tanque Subterráneo pasa al Tanque Principal, a través de una de las dos bombas disponibles para tal fin. El Tanque Principal posee una

forma cónica invertida, que funciona como un sedimentador, pues el agua es alimentada por la parte superior y en la parte inferior del mismo se van depositando todos los sólidos sedimentables que están presente en el agua de los pozos, este tanque tiene una capacidad de 180.000 litros. Seguidamente, el agua pasa a través de un filtro de grava para eliminar sólidos suspendidos que persistan en el agua. Luego esta agua es enviada por medio de bombas al Tanque de Planta 2, de 30.000 litros de capacidad, para ello se encuentran tres bombas disponibles, a su vez este tanque llena por rebose a otro tanque llamado de maceración (posee 180.000 litros de capacidad), el cual suministra el agua dura a aquellos procesos que no requieren agua suavizada. Cuando se requiere suavizar agua se manda una señal a través de un control automático para que se enciendan las bombas que envían el agua dura del tanque de maceración a un filtro carbón para eliminar impurezas y luego se dirige directamente a los suavizadores. Cuando se requiere suavizar agua se manda una señal a través de un control automático para que se enciendan las bombas que envían el agua dura del tanque de maceración a un filtro carbón para eliminar impurezas y luego se dirige directamente a los suavizadores.



**Figura 6. Diagrama de Bloques de Planta de Ablandamiento de Agua.**

---

La planta dispone de tres suavizadores, identificados como Suavizadores N° 1, N° 2 y N° 3, de los cuales siempre se encuentran dos en servicio, suministrando agua sin dureza. El agua que proviene del filtro carbón entra por el tope del suavizador, con una dureza aproximada de 310 mg/l y sale por el fondo sin dureza alguna. El funcionamiento de los suavizadores consiste en hacer pasar el agua dura por un primer suavizador (bien sea el N° 1 ó N° 2, dependiendo del que este en servicio), luego esta agua ya suavizada pasa al suavizador N° 3, el cual actúa como pulimento, es decir, para garantizar cero dureza. Posteriormente, el agua suavizada se envía a un Tanque de Calderas para almacenarla y de allí se dirige a los lugares donde esta se requiera.

Los tres suavizadores son absolutamente iguales, poseen un volumen total de 3,8 m<sup>3</sup>, en su interior tienen un volumen de gravas de 0,8 m<sup>3</sup>, que ayudan a sostener la resina y evitan que salga por el fondo del suavizador, igualmente se encuentra ocupando un volumen de 1,76 m<sup>3</sup> la resina de intercambio cationico.

Una vez que el agua que sale del tanque suavizador presenta una dureza mayor a 30 mg/l, éste se saca de servicio y debe ser regenerado, a fin de intercambiar los iones calcio que se encuentran en la resina por iones sodio que provienen de una solución de salmuera.

Dicha solución de salmuera se prepara en dos tanques previo a la regeneración. Los mismos tienen un volumen total de 1220 l cada uno, y en estos se disuelven un total de 400 Kg. de sal industrial (16 sacos de 25 Kg. cada uno, es decir, 8 sacos en cada tanque). Posteriormente, se le añade agua hasta completar un volumen de 750 l en cada tanque. Dicha mezcla es agitada por espacio de 3 horas, primero en un tanque y luego en el otro.

---

---

El proceso de regeneración consta de tres subprocesos:

- a) Retrolavado: Tiene una duración aproximada de 30-45 min., y en esta etapa el objetivo es remover impurezas y además expandir el lecho de resina, eliminando la compactación que se forma durante la operación del suavizador. Para lograr esto, se introduce agua dura de fondo a tope y se envía el efluente al drenaje.
- b) Regeneración: En este período se hace pasar una solución de salmuera por la parte superior del suavizador y una vez introducida se deja en contacto con la resina 30 min. para intercambiar los iones sodio por los de calcio y magnesio, adheridos a la resina.
- c) Lavado Rápido: En esta fase lo que se persigue es desalojar la salmuera y luego lavar con agua para eliminar los restos de sal que contenga la resina, para ello se cierra la alimentación del tanque de salmuera y se inyecta agua por el tope del suavizador. Esta operación se realiza por espacio de 30-45 min.

## **II.2.- DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES RESIDUALES (PTER):**

La EMA dispone de una planta de tratamiento de aguas residuales, que tiene por finalidad tratar los efluentes líquidos provenientes de las actividades de cada una de las plantas que conforman la corporación, antes de verterlos a un cuerpo de agua. El tratamiento de afluentes en la PTER permite cumplir con los lineamientos exigidos por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR), según el decreto 3219 publicado en Gaceta Oficial el 1° de Febrero de 1999, donde se dictan las normativas para descargas de efluentes al Lago de Valencia.

Para tratar los efluentes del procesos productivo, la PTER dispone de procesos físicos, químicos y biológicos; para lo cual cuenta con los siguientes equipos:

---

---

Rejillas, Tamiz, Tanque de Descargas Generales, Reactor Anaeróbico, 3 Piscinas Aeróbicas, Tanque Acondicionador de pH, Unidad Anóxica, Sedimentadores Primario y Secundario, Piscina de Cloración, entre otros.

Tal como puede observarse en la Figura 7, el proceso que toma lugar en la PTER consiste básicamente en hacer pasar los efluentes del proceso de producción y de las áreas de servicio, aproximadamente 4-5 l/s, como se describe a continuación:<sup>[8]</sup>

**Canal de Desbaste:** Las aguas residuales provenientes del proceso productivo, al llegar a la PTER pasan inicialmente por unas rejillas construidas de barras planas separadas a 1 cm. y colocadas en posición inclinada, que impiden el paso de sólidos. El objetivo principal de estas rejillas es retener sólidos de gran tamaño para evitar daños a equipos, bombas, tuberías, etc. La limpieza de estas rejillas se realiza manualmente con un rastrillo.

**Tanque de Descargas Generales:** Este tanque posee forma rectangular y una capacidad de aproximadamente 105 m<sup>3</sup>. En él se lleva a cabo un efecto amortiguador de las características del afluente tales como: caudal, carga química, pH, entre otras. El agua residual pasa del canal de desbaste al tanque de descarga generales por gravedad. Este tanque posee tres entradas de aire con sus respectivos difusores sumergidos (tipo flauta) para proveer mezclado, mantener los sólidos en suspensión y oxidar la materia orgánica.

**Tamiz:** Una vez que el afluente se encuentra en el tanque de descarga generales, se envía mediante una bomba de desplazamiento positivo a un tamiz. Este consiste en un equipo para retención de partículas con tamaño mayor de 1 mm. La salida del afluente ya filtrado es por gravedad y se dirige a un tanque acondicionador. Los sólidos retenidos son enviados a la primera piscina aeróbica.

---

---

**Tanque Acondicionador:** Esta unidad consiste en un tanque cilíndrico de 400 m<sup>3</sup> de capacidad, en el que se lleva a cabo la pre-acidificación del efluente antes de entrar al reactor anaeróbico, con soda cáustica (NaOH) al 50%. Cuando el afluente alcanza un pH óptimo, es enviado al reactor anaeróbico por una de las dos bombas disponibles para tal fin.

**Reactor Anaeróbico:** Tanque rectangular que contiene un manto de lodos biológicos activos. El afluente es alimentado por la parte inferior del reactor, al ascender la materia orgánica es transformada a metano y dióxido de carbono, el lodo activo flotante se adhiere a las burbujas de gas y son separados del efluente líquido mediante un separador gas-sólido-líquido colocado en la parte superior del reactor. Posee 500 m<sup>3</sup> de capacidad y tiene acoplada una campana recolectora de gases con su respectivo manómetro. La degradación de la materia orgánica se lleva a cabo por la acción de microorganismos que se desarrollan en ausencia de oxígeno.

**Unidad Anóxica:** El efluente del reactor anaeróbico pasa por gravedad a un estanque rectangular abierto a la atmósfera, donde se libera el nitrógeno en forma gaseosa debido a reacciones en ausencia de oxígeno disuelto. Esta unidad posee 110 m<sup>3</sup> de capacidad. Una vez desnitrificado el afluente se dirige a la primera piscina aeróbica por decantación.

**Piscinas Aeróbicas:** Consta de tres piscinas rectangulares provistas por difusores de aire, se trata de un sistema de lodos activados con una capacidad total de 2000 m<sup>3</sup> aproximadamente. En esta etapa se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica que persiste del tratamiento anaeróbico por parte de bacterias que se desarrollan en presencia de oxígeno. El efluente pasa a través de las piscinas por decantación.

**Sedimentador Primario:** Unidad alimentada por decantación desde el tratamiento aerobio, la velocidad de alimentación es 15 l/s la cual se reduce a cero

---

---

permitiendo que por efecto de la gravedad los lodos y sólidos se precipiten al fondo. Su objetivo principal es clarificar el efluente mediante separación por gravedad de los lodos generados en el sistema aeróbico. Parte del lodo retenido en este proceso se recircula a la primera piscina aeróbica y el resto se envía mediante una bomba (fosa seca) a un tanque de almacenamiento de lodos.

**Sedimentador Secundario:** En este clarificador se pretende separar los sólidos que aún persisten o que no se depositaron en el sedimentador primario. El efluente se alimenta desde el sedimentador primario por rebose. También posee una recirculación de lodos a la primera piscina aeróbica y una bomba en fosa seca para enviar los mismos al tanque de almacenamiento de lodos.

**Unidad de Cloración:** Consiste en un tanque rectangular de concreto que contiene tabiques intermedios que permiten aumentar el tiempo de contacto entre el afluente y el desinfectante adicionado para garantizar la calidad bacteriológica del agua. La cloración se realiza con hipoclorito de calcio, para luego descargar el efluente a la tubería de red cloacal pertinente.

**Tanque de Almacenamiento de Lodos:** Se trata de un tanque rectangular construido de concreto que almacenan temporalmente los lodos aerobios provenientes del sedimentador primario, el tanque es vaciado cuando se procede al prensado mecánico de los mismos.

**Filtro Prensa:** Para mantener la masa microbiana constante en el tratamiento aeróbico, se debe extraer lodo del sistema periódicamente. Generalmente, se extrae lodo del tanque de almacenamiento de lodos. A esta solución se le dosifica un polímero a efectos de facilitar la floculación del lodo. El filtro prensa consta de bandas de tela, montadas sobre un conjunto de rodillos que giran mientras presionan mutuamente, ejerciendo una presión en el lodo capaz de retirar gran parte de su



---

---

contenido de humedad. Este filtro prensa tiene acoplada una tolva para descargar los lodos deshidratados o prensados.

**Quemador de Gases:** Los gases provenientes del reactor anaerobio son pasados por etapas sucesivas de condensación, los incondensables son los que llegan al quemador. El piloto necesario para la combustión del gas, se obtiene mezclando propano y oxígeno, los cuales al pasar por una bujía que se activa mediante un switch, da la chispa que enciende el piloto. Al colocarse en contacto el gas generado con el piloto se enciende el quemador de gases. Es decir, se produce la combustión de los gases originados en el reactor anaeróbico, principalmente, metano.

**Sopladores:** Es un equipo mecánico utilizado para el suministro de aire a presiones relativamente bajas. Su objetivo es suministrar aire a todas las zonas que requieran oxígeno para su funcionamiento. Estos sopladores suministran aire a razón de 5.252 cfm/soplador y sus motores poseen una capacidad de 240 Hp cada uno.

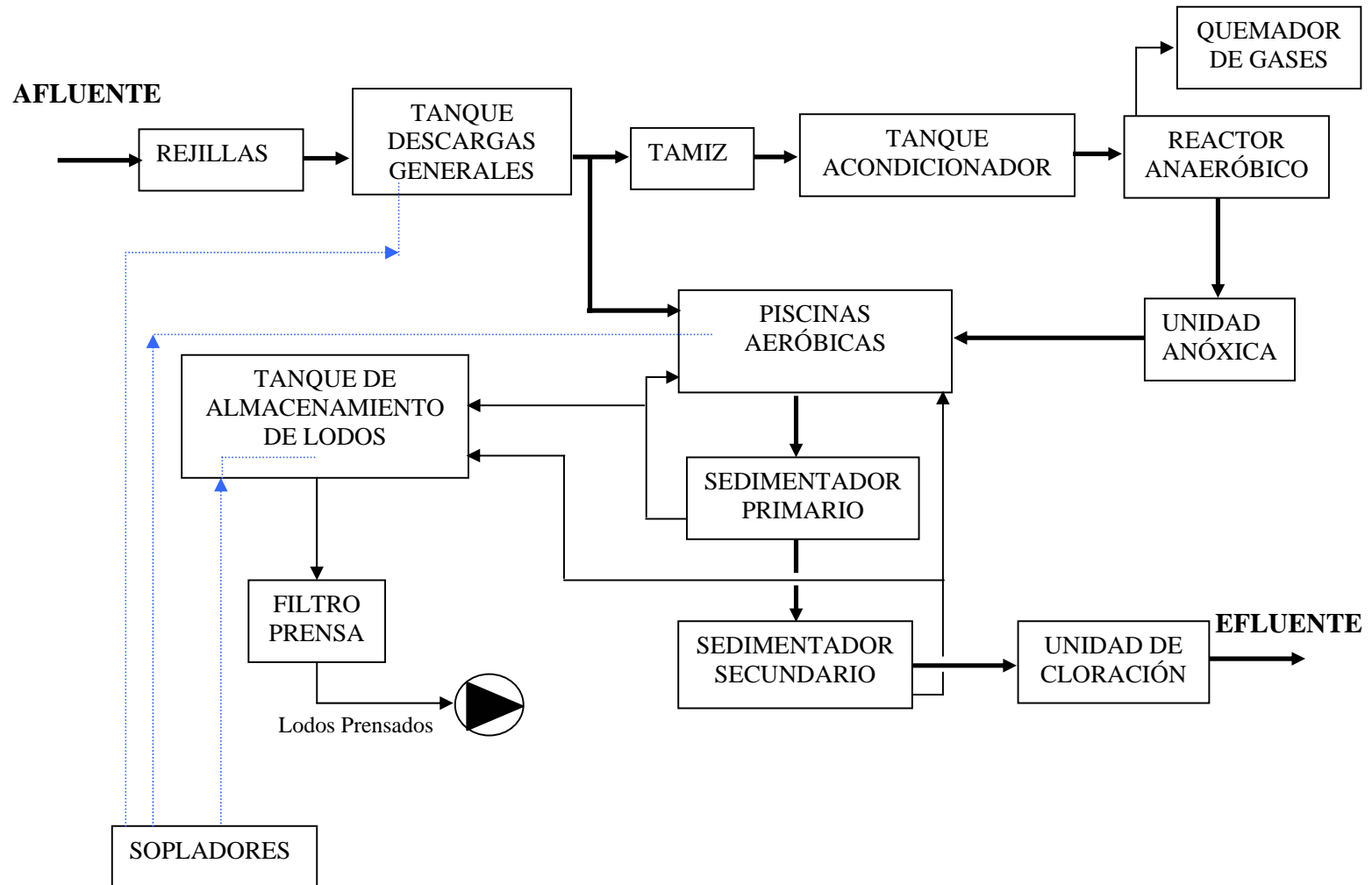


Figura 7. Diagrama de Bloques de la Planta de Tratamiento de Efluentes Residuales (PTER)

## **CAPÍTULO III**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

En este capítulo se consideran los aspectos teóricos que respaldarán el presente estudio, para cumplir con los objetivos propuestos. Además permitirá tener una visión más amplia de lo que es el problema con miras a disponer del soporte adecuado para la interpretación de los resultados que de él se deriven y la generación de las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

#### **III.1.- ASPECTOS GENERALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:**

Toda comunidad genera residuos domésticos e industriales tanto sólidos como líquidos. La porción líquida de los mismos, aguas residuales, es esencialmente el agua que desecha la comunidad una vez que ha sido contaminada en los diferentes usos para los cuales ha sido empleada. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, se puede definir el agua residual o servida como la combinación de los residuos líquidos, procedentes tanto de residencias, como de instituciones públicas y establecimientos comerciales e industriales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

En un principio, los pueblos se asentaron en lugares donde las condiciones de vida eran adecuadas, tanto por sus recursos naturales, como por su posición. Luego estos fueron creciendo, convirtiéndose en ciudades próximas a lagos o cauces superficiales con suficientes recursos hidráulicos para su vida y desarrollo.

El acentuado crecimiento poblacional, en muchas comunidades, junto con sus crecientes necesidades de agua por el aumento de su nivel de desarrollo industrial, fueron exigiendo una mayor demanda de agua, y por ende generando mayores volúmenes de aguas residuales, al extremo de que los recursos hidráulicos existentes han pasado a ser insuficientes para recibir dichos residuos sin modificar la fauna y la flora de los ríos y mares. Es por ello que se ha planteado uno de los problemas más acuciantes en la actualidad, como lo es la contaminación del agua.

Por ello, ha surgido la necesidad de tratar las aguas de desecho, tanto domésticas como industriales, antes de ser enviadas a los cuerpos receptores, para evitar y minimizar los impactos negativos al ambiente, como la mortandad de muchas especies acuáticas, tanto vegetales como animales, y permitir la disponibilidad de dichas aguas para distintos usos: recreacional, industrial, riego, etc.

En vista de la diversidad de usos que se le da al agua como insumo industrial, los procesos utilizados para el tratamiento de las mismas, dependen del tipo de afluente a tratar. Estos procesos se dividen en tratamiento preliminar, primario, secundario, terciario o especial, además se clasifican en físicos, químicos y procesos biológicos según el tratamiento de purificación. En páginas posteriores de este capítulo se abordarán con más detalle los aspectos relacionados con estos procesos. <sup>[9]</sup>

### **III.2.- COMPOSICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES:**

En términos generales puede decirse que las aguas residuales o servidas están constituidas por un 99% de agua y un 1% de sólidos, en suspensión y disueltos. Estos sólidos pueden clasificarse en inorgánicos y orgánicos, estando los sólidos inorgánicos formados principalmente por nitrógeno, fósforo, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio, carbonatos, bicarbonatos y algunas otras sustancias tóxicas como arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc. Los sólidos

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

orgánicos se pueden clasificar en nitrogenados y no nitrogenados. Los nitrogenados, es decir, los que contienen nitrógeno en su molécula, son proteínas, ureas, aminas y aminoácidos. Los no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones. Para el caso del fósforo, este puede ser un contaminante inorgánico y orgánico, dependiendo de la fuente de generación. También existen contaminantes de interés en el agua residual, tal es el caso de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) los cuales son esenciales para el crecimiento de los microorganismos.<sup>[9]</sup>

Para establecer el tipo de tratamiento más apropiado que debe aplicarse a las aguas residuales de una determinada empresa y así asegurar su adecuada disposición, es necesario e imprescindible realizar su caracterización tanto física, como química y biológica. Para ello existen una serie de técnicas analíticas cuantitativas y cualitativas.

Actualmente, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) se rige según el Decreto 3219, publicado en Gaceta Oficial, el 1º de Febrero de 1999, donde se establecen las Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de las Aguas de la Cuenca del Lago de Valencia. En dicho decreto se establecen además los límites máximos y rangos de concentraciones de los vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados en forma directa o indirecta al Lago de Valencia. Estas especificaciones se presentan en la Tabla 1.

En el caso de las aguas residuales industriales concretamente, los parámetros más críticos e importantes dependerán de la actividad propia de cada empresa manufacturera. Sin embargo, en términos generales entre dichos parámetros suelen estar los siguientes:

a.- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): se define como la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable bajo condiciones aeróbicas. Los resultados de la DBO se emplean para: dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales; medir la

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

eficacia de algunos procesos de tratamiento y controlar el cumplimiento de las regulaciones a que están sujetos los vertidos.

**Tabla 1. Concentraciones máximas de algunos contaminantes en efluentes acuosos residuales establecidas en el Decreto N° 3219. <sup>[1]</sup>**

<b>PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS</b>	<b>LÍMITES MÁXIMOS O RANGOS</b>
Aceites y grasas vegetales y animales	20 mg/l
<b>Cloruros</b>	<b>1000 mg/l</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> 20)	60 mg/l
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	350 mg/l
Detergentes	2.0 mg/l
Dispersantes	2.0 mg/l
Fluoruros	5.0 mg/l
<b>Fósforo total (expresado como Fósforo)</b>	<b>1.0 mg/l</b>
Hierro total	10 mg/l
Nitrógeno total (expresado como Nitrógeno)	10 mg/l
pH	6-9 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes
Sólidos sedimentables	1.0 mg/l
Sólidos suspendidos	80 mg/l
Sulfitos	2.0 mg/l
Sulfatos	600 mg/l
Sulfuros	0.5 mg/l
Organismos coliformes totales	1000 NMP/100 ml
Organismos coliformes fecales	200 NMP/100 ml
Órganos fosforados y Carbamatos	0.25 mg/l

En la Tabla 1, puede apreciarse que la DBO según el Decreto N° 3219 debe ser menor a 60 mg/l. Si este parámetro supera notablemente este valor indica que los microorganismos no son capaces de degradar la materia orgánica en el tiempo estipulado para tal fin, ya que las instalaciones de la planta de tratamiento no están diseñadas para permitir dicha degradación por parte de los microorganismos.

b.- Demanda Química de Oxígeno (DQO): El ensayo de la DQO se utiliza para determinar el contenido de materia orgánica químicamente oxidable, presente en un agua residual. De acuerdo a la normativa antes mencionada, este parámetro debe ser

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

menor a 350 mg/l (Ver Tabla 1). Un valor de la DQO por encima del límite exigido, indica que el agua residual posee una gran cantidad de materia orgánica que no puede ser químicamente oxidada o degradada el tiempo estipulado para ello.

c.- Fósforo: El fósforo en sus diferentes formas, es un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos, al igual que el nitrógeno. Por lo tanto, al someter un agua residual a tratamiento biológico, si el contenido de nutrientes es insuficiente, será necesario incrementarlos para el adecuado desempeño de los microorganismos; si por el contrario, los contenidos de fósforo y nitrógeno superan los límites exigidos por el MARNR, que para el caso del fósforo es 1 mg/l y para el nitrógeno 10 mg/l (Ver Tabla 1), se hace necesaria su reducción antes de descargar el agua al cuerpo receptor. El exceso de fósforo en los cuerpos de agua favorece la proliferación de algas, las cuales al morir se convierten en materia orgánica que debe ser degradada por microorganismos, lo que implica un elevado consumo de oxígeno por parte de éstos, como consecuencia de este déficit de oxígeno las especies acuáticas tienden a morir. A este fenómeno se le conoce como eutrofización. <sup>[9]</sup>

d.- Cloruros: En las aguas residuales industriales los cloruros se generan por la utilización de sal común como materia prima en el proceso de manufactura o por reacciones de neutralización que se produzcan en dicho proceso. Los cloruros presentes en las aguas residuales, por lo general no son removidos por los tratamientos tradicionales de aguas residuales, sino por tratamientos especializados o desde sus fuentes de generación, es decir, aguas arriba del proceso productivo. Una descarga de efluentes con altas concentraciones de cloruros a los cuerpos de agua receptores, puede provocar la pérdida de fertilidad de los suelos por problemas de salinidad, toxicidad y permeabilidad afectando a los cultivos, si el agua es utilizada para riego, y si se utiliza para fines industriales perjudica los sistemas metálicos ya que causa incrustaciones y corrosión en los mismos. Estos riesgos aumentan si los cloruros superan los 1000 mg/l exigidos por el MARNR. <sup>[10]</sup>

e.- pH: Es un parámetro que mide indirectamente la concentración del ión hidrógeno, éste es de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo adecuado de pH es de 6 a 9, según el Decreto 3219 del MARNR, para la conveniente proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica, tanto en aguas a tratar como en aguas tratadas. Las aguas residuales con pH fuera de este rango son difíciles de tratar por medios biológicos, siendo necesaria su neutralización. Además, el efluente puede modificar la concentración de ión hidrogeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas, lo cual puede alterar los distintos usos que se le da al agua.<sup>[9]</sup>

f.- Sólidos: Los residuos sólidos comprenden los sólidos disueltos y en suspensión. Se denominan sólidos disueltos aquellas partículas capaces de atravesar un papel de filtro de fibra de vidrio (Whatman GF/C) con un tamaño nominal de poro de 1,2 micrómetros, y sólidos en suspensión a los que no pueden hacerlo. Estos últimos se dividen a su vez en sedimentables y no sedimentables, este parámetro se determina en función de la cantidad de mililitros de sólido que se depositan en una muestra de un 1 litro de agua residual durante una hora en reposo en un cono Imhoff. Los residuos sólidos contenidos en las aguas residuales se clasifican también de acuerdo a su volatilidad, la cual se mide como la fracción sólida volátil (materia orgánica) que se volatiliza a 600 °C, mientras que la fracción remanente o no volátil fija (materia inorgánica) permanece como cenizas.<sup>[9]</sup>

### **III.3.- SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES:**

El tratamiento o depuración de las aguas residuales tiene por objetivo fundamental la remoción o reducción de los compuestos contaminantes contenidos en dichas aguas. Los procesos que se utilizan en la depuración dependen del tipo de afluente, pudiéndose estructurar en tres grandes bloques atendiendo a su naturaleza: físicos, químicos y biológicos. Los tres se basan en la separación del agua residual en



dos fases una de ellas que contiene el agua ya tratada, mientras que en la otra se encuentran los sólidos sedimentables y flotantes.

### **III.3.1.- Procesos Físicos:**

Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas residuales, en las que los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de leyes o principios físicos, se conocen como operaciones unitarias físicas.

En este tipo de procesos se pueden retener sólidos mediante: separación física por rejas o mallas finas, medias o gruesas, en las que el tamaño de abertura es inferior a 1,5 cm., de 1,5-5 cm. y de 5-15 cm., respectivamente. Otros procesos se basan en la utilización de las diferentes densidades de los sólidos contenidos en el agua residual para su remoción ya sea por flotación o por sedimentación. En otros casos se utiliza la fuerza centrífuga como vía de separación de los materiales más pesados. <sup>[11]</sup>

### **III.3.2.- Procesos Químicos:**

Estos procesos son empleados en el tratamiento de las aguas residuales en los que las transformaciones se producen mediante reacciones químicas. Con el fin de alcanzar los objetivos de tratamiento del agua residual, estos procesos se llevan a cabo en combinación con las operaciones unitarias físicas.

Los procesos de tratamiento químico se utilizan cuando los contaminantes se encuentran disueltos en el agua o son demasiado finos (ej. <1 mm), para poderlos cribar. En general, estos procesos se basan en la utilización de sales metálicas de elevada carga eléctrica positiva o negativa, normalmente de hierro, aluminio o silicio, que neutralizan las cargas de los contaminantes disueltos aglomerándolos en flóculos que precipitan y se separan del agua. Otros procesos usados son aquellos basados en

resinas de intercambio iónico que retienen los contaminantes dejando circular libremente el agua limpia. [11]

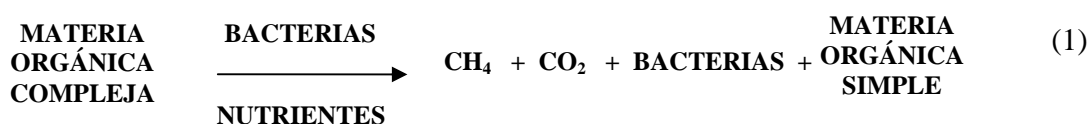
Una de las desventajas inherentes asociada al uso de procesos químicos unitarios es que se trata de procesos aditivos (con la excepción de la adsorción con carbón activado). En muchos casos, la eliminación de un constituyente se consigue por medio de la adición de otra sustancia. Como resultado de ello, se suele producir un incremento neto de los constituyentes disueltos en el agua residual. Por ejemplo, cuando se añaden productos químicos para mejorar la eficacia de eliminación en la sedimentación simple, se produce un incremento en la concentración de sólidos totales disueltos, tal es el caso del sulfato de aluminio hidratado (alumbre) que se utiliza para eliminar los fosfatos presentes en el agua residual pero introduce iones sulfatos a la misma. Si se va a reutilizar el agua tratada, este hecho puede constituir un factor importante, ya que estos nuevos contaminantes pueden ocasionar otros problemas, como corrosión, entre otros. [9]

### **III.3.3.- Procesos Biológicos:**

Es el procedimiento de mayor complejidad desde el punto de vista técnico, pero que proporciona mayor eficacia en el tratamiento de aguas residuales. Se basa en la eliminación de la materia orgánica y otros nutrientes como nitrógeno y/o fósforo presentes en las aguas como sólidos no sedimentables mediante la acción de microorganismos aerobios o anaerobios, que en conjunto son denominados biomasa. Se busca en ellos una doble acción: la metabólica y la bio-floculación de las partículas en suspensión. Estos microorganismos sufren un proceso previo de selección que tiene por objeto su adaptación a los contaminantes específicos de las aguas residuales a ser tratadas. Se adaptan al medio buscando una concentración de oxígeno y un pH adecuados, además de una temperatura óptima, dependiendo del microorganismo, para su apropiado desarrollo y desempeño. Los microorganismos se

agrupan dando lugar a la formación de flóculos de mayor densidad que el agua por lo que precipitan, separando de esta forma la biomasa del agua. [11]

⊕ **Digestión Anaeróbica:** La digestión o descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos puede ser aeróbica o anaeróbica. Cuando la digestión es anaeróbica se realiza en un estanque cerrado llamado digester y no requiere la presencia de oxígeno pues es realizada por bacterias que se desarrollan en su ausencia. Para el óptimo crecimiento de estos microorganismos se requiere una temperatura de 35 °C y un pH entre 6,5-7,5. [9] Las bacterias anaerobias degradan química y biológicamente la materia orgánica presente en el agua servida, en una primera fase, a ácido propiónico, ácido acético y otros compuestos intermedios, como se puede apreciar en la Figura 8, para posteriormente dar como producto final metano (60-70%), anhídrido carbónico (30%) y trazas de amoníaco, nitrógeno, anhídrido sulfuroso e hidrogeno. El metano y el anhídrido carbónico son inodoros; en cambio, el ácido propiónico tiene olor a queso rancio y el ácido acético tiene un olor a vinagre. La digestión anaeróbica se puede describir a través de la ecuación (1): [11]



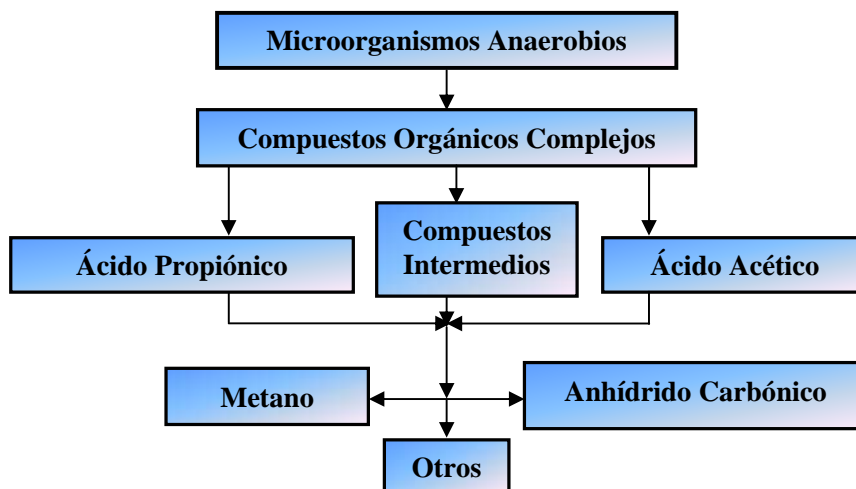
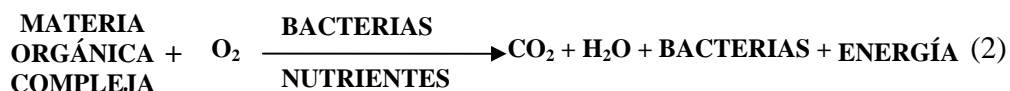


Figura 8. Esquema descriptivo de la digestión anaeróbica. [12]

✦ **Digestión Aeróbica:** La digestión aeróbica se realiza en un estanque abierto y requiere la presencia de oxígeno y, por tanto, la inyección de aire u oxígeno. En este caso la digestión de la materia orgánica es efectuada por bacterias que realizan su actividad a temperatura ambiente, interactuando con el oxígeno del aire para dar como productos de esta interacción o digestión, anhídrido carbónico y agua, como se describe en la ecuación (2). En este tipo de proceso cuando es bien efectuado, no se produce metano ni componentes con olores desagradables. [12]



#### III.4.- ETAPAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES:

Un sistema complejo de tratamiento de aguas residuales estaría constituido por un máximo de 5 etapas:

- Tratamiento Preliminar.
- Tratamiento Terciario o Especial.

- Tratamiento Primario.
- Tratamiento Secundario.
- Tratamiento Avanzado.

#### **III.4.1.- Tratamiento Preliminar:**

Este tipo de tratamiento tiene como objetivos primordiales remover todos aquellos sólidos de gran tamaño, que por sus características perturbarían e incluso llegarían a interrumpir los tratamientos posteriores. Asimismo, el tratamiento preliminar permite proteger las instalaciones que constituyen las obras de tratamiento, estabilizar el pH, la DBO y el contenido de sólidos, previo a las etapas posteriores. Adicionalmente en esta etapa se regula el caudal que ingresaría a una etapa subsiguiente de tratamiento primario de aguas residuales.

Normalmente las plantas de tratamiento están diseñadas para tratar un volumen de agua constante, lo cual debe adaptarse a que el agua servida generada por una comunidad o una empresa no es constante, por lo que deben instalarse sistemas de regulación, como por ejemplo sistemas de medición y control de flujo, de forma que el caudal que ingrese a las etapas posteriores del sistema de tratamiento sea uniforme y así se evitan sobrecargas hidráulicas en el proceso.

Asimismo, el agua residual contiene innumerables cuerpos voluminosos y contaminantes, flotantes y en suspensión, lo que evidencia la necesidad del tratamiento preliminar para retirar estos cuerpos. Por lo tanto, se han diseñado dispositivos con el fin de:

- ⊕ Separar o disminuir el tamaño de los sólidos orgánicos grandes que flotan o están suspendidos. Estos sólidos son generalmente trozos de madera, telas, papel, plásticos y algo de materia fecal.
- ⊕ Separar los sólidos inorgánicos pesados, como las arenas (finas y gruesas), la grava e incluso objetos metálicos.

⊕ Separar aceites y grasas. <sup>[13]</sup>

Entre los dispositivos más empleados para la separación de los sólidos mencionados, se encuentran: rejillas, trituradores, desarenadores, tamices, etc. Estos dispositivos no producen cambios apreciables en las características físicas, químicas o biológicas de las aguas servidas. En esta etapa también se puede realizar la preaireación, a los fines de eliminar los compuestos más volátiles presentes en el agua residual, que se caracterizan por ser malolientes, y aumentar el contenido de oxígeno del agua, lo que contribuye a reducir la generación de malos olores en las etapas siguientes del proceso de tratamiento. <sup>[12]</sup>

#### **III.4.2.- Tratamiento Primario:**

Esta etapa tiene por finalidad principal, reducir la Demanda Bioquímica de oxígeno, producida por sólidos orgánicos suspendidos y coloidales (sedimentables por su propio peso o mediante coagulación), presentes en las aguas residuales. Para lo cual se requiere como infraestructura básica estanques de sedimentación primaria, también conocidos como clarificadores primarios. Habitualmente están diseñados para remover aquellas partículas que tienen tasas de sedimentación de 0,3 a 0,7 milímetros por segundo. Asimismo, el período de retención es normalmente corto, 1 a 2 horas. En función de estos parámetros, la profundidad de un estanque de sedimentación primaria fluctúa entre 2 a 5 metros. <sup>[9]</sup>

Los tipos de tratamientos primarios existentes son los de acción física: separación de sólidos suspendidos mediante unidades de áreas limitadas como los desarenadores o la sedimentación-flotación de partículas; o de acción físico-química: la separación de partículas con la ayuda, además de la coagulación-floculación de sólidos presentes en estado coloidal.

### **III.4.3.- Tratamiento Secundario:**

Luego de cumplida la etapa previamente explicada, se realiza el tratamiento secundario: esta fase es la de mayor importancia debido a que en ella mediante procesos biológicos, principalmente, aplicados a las aguas residuales, se puede obtener un alto porcentaje (65 a 95%) de reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno presente en el agua a tratar, transformando la materia orgánica en materia estable e inofensiva a los cuerpos receptores. <sup>[11]</sup>

En esta etapa del tratamiento, se cumple un proceso biológico de oxidación, en el cual la materia orgánica contenida en las aguas residuales es descompuesta con la ayuda de organismos vivientes (biomasas), en compuestos estables de composición más sencilla, transformando muchos complejos orgánicos en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua y compuestos nitrogenados (NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>). En esta etapa los microorganismos disminuyen la concentración de fósforo y nitrógeno, pues se consumen estos compuestos como nutrientes. <sup>[11]</sup>

Entre los sistemas más utilizados en esta etapa se encuentran: lodos activados y lagunas de aireación, en los cuales son los organismos los que digieren la materia orgánica de las aguas residuales; por otra parte existen también los sistemas de cultivo fijo (filtros biológicos o percoladores, biodiscos y lecho fluidizado) donde los organismos están adheridos al medio de soporte y hacia ellos va el material orgánico a ser depurado; además existen los procesos en los que la biomasa está suspendida, que por lo general se llevan a cabo en lagunas de estabilización y sistemas de digestión de lodo (aeróbicos, facultativos y anaeróbicos).

Además, de los sistemas mencionados anteriormente, existen las unidades anóxicas, las cuales son estanques donde el agua residual permanece por un determinado tiempo, durante el cual se lleva a cabo la desnitrificación, es decir, se elimina el nitrógeno por la acción de un grupo de bacterias que viven en un ambiente

carente de oxígeno molecular. El primer paso consiste en la conversión de nitrato a nitrito, y luego se produce óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas que se desprende. Previo a esta etapa, el nitrógeno orgánico contenido en el agua residual es transformado en nitrógeno amoniacal y luego con la presencia de oxígeno molecular este se convierte en nitritos y nitratos, este proceso se llama nitrificación y ocurre en condiciones aeróbicas. <sup>[14]</sup>

#### **III.4.4.- Tratamiento Terciario:**

Aunque con los tratamientos anteriores se puede obtener una calidad de agua aceptable para una serie de usos, a veces la naturaleza de los contaminantes y las necesidades de las comunidades o las regulaciones oficiales exigen mayor calidad y se requiere el diseño de un tratamiento más completo para cumplir con tales exigencias. En los casos, en que las aguas residuales presentan impurezas que no se pueden eliminar con los tratamientos previos, y que de algún modo afectarían a la población que haga uso de las aguas tratadas o alterarían la ecología del agente receptor, por esto se hacen necesarios otros métodos de tratamiento, conocidos como terciarios o especiales. Estos tratamientos comprenden operaciones como la cloración, filtración, tratamiento y disposición final de lodos aerobios, entre otros.

Los objetivos básicos de los tratamientos terciarios más utilizados e importantes son los siguientes:

- a) Remoción de fosfatos y nitratos de los efluentes, remanentes del tratamiento secundario
- b) Eliminación de los huevos de *Schistosoma Mansoni* presentes en aguas cloacales domésticas en regiones donde la bilharzia es endémica.
- c) Remoción de detergentes y contaminantes orgánicos, para evitar la contaminación de cuerpos receptores acuáticos.
- d) Los tratamientos de desinfección que se aplican a los efluentes cloacales para eliminar la presencia de microorganismos entéricos y otras formas de vida, o



agentes transmisores de enfermedades (Bacterias, virus, protozoarios, nematodos, etc.).<sup>[15]</sup>

#### **III.4.5. Tratamiento Avanzado:**

El tratamiento avanzado comprende un nivel de tratamiento que va, más allá del tratamiento secundario y terciario convencional, para la eliminación de constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como los nutrientes, los compuestos tóxicos y los excesos de materia orgánica o de sólidos en suspensión. Además de los procesos de eliminación de nutrientes, otros procesos habitualmente empleados en los tratamientos avanzados son la coagulación, floculación, precipitación y sedimentación seguida de filtración o carbón activado. Para la eliminación de iones específicamente y para la reducción de sólidos disueltos, se emplean métodos menos comunes, como el intercambio iónico y la ósmosis inversa. También se emplea el tratamiento avanzado para diversas posibilidades de reutilización de las aguas residuales para los cuales es preciso obtener efluentes de alta calidad, como puede ser el caso del agua utilizada para refrigeración industrial.

En la Figura 9 se puede apreciar las instalaciones necesarias en una planta de tratamiento de aguas residuales, para llevar a cabo los tratamientos explicados anteriormente. Es importante mencionar que el orden de los tratamientos descritos depende del agua a tratar. El caso que visualiza en la Figura 9, se refiere a la depuración de aguas servidas municipales; es decir, que para aguas residuales industriales este orden puede variar atendiendo a las necesidades de las especificaciones exigidas para el efluente final y del tipo de contaminante.

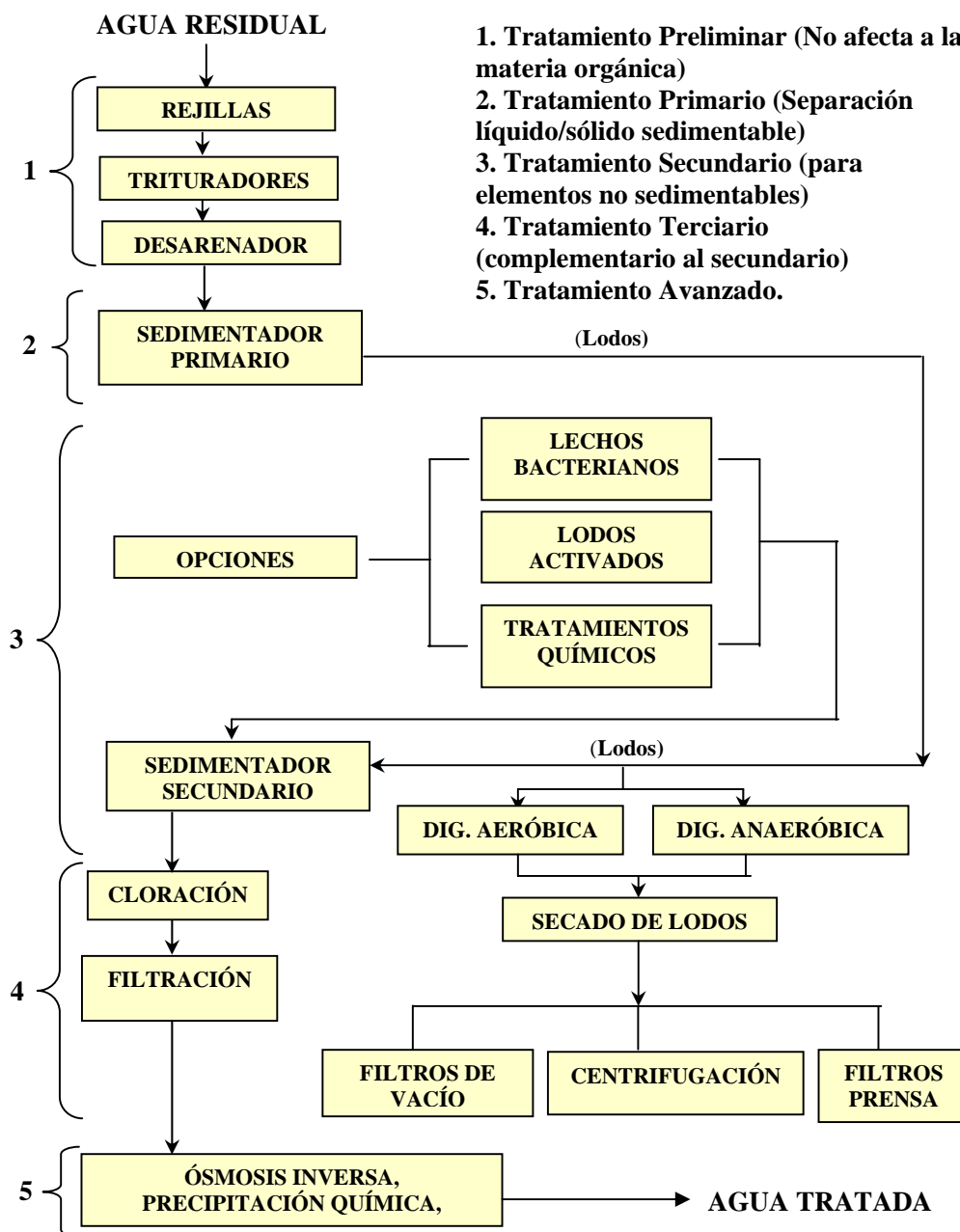


Figura 9. Esquema secuencial de una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas. <sup>[16]</sup>

### **III.5.- ORIGEN DEL FÓSFORO Y LOS CLORUROS EN LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES:**

El fósforo está contenido en el agua residual formando la base de un gran número de compuestos, de los cuales los más importantes son los fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ). Los fosfatos se basan en átomos de fósforo rodeados en una disposición tetraédrica por átomos de oxígeno. En las aguas residuales industriales el fósforo proviene de compuestos que son utilizados como materia prima, principalmente de los fosfatos. Asimismo, cabe mencionar que el fósforo puede provenir de los detergentes no biodegradables utilizados para la limpieza en plantas industriales y de la purga de las calderas aunque esta cantidad por lo general es insignificante. <sup>[9]</sup>

El fósforo en altas concentraciones (ej. 2 mg/l) puede provocar el fenómeno llamado eutrofización, descrito en secciones anteriores, el cual asociado con el deterioro de la calidad de las aguas, ha estado limitando la factibilidad de uso de la misma, ya sea para consumo humano, riego, cría de peces o uso recreacional. Por lo tanto, es importante disminuir las concentraciones de fósforo en los vertidos líquidos industriales para evitar que la masa de agua receptora se contamine.

Por su parte el cloro, o cloruro en su forma iónica ( $\text{Cl}^-$ ), es uno de los aniones que con mayor frecuencia se encuentra en los líquidos domésticos, ya que proviene de una de las sales más utilizada en la dieta del hombre (cloruro de sodio) y porque aparece en muchas ocasiones en lugares cercanos al mar. Su presencia, en las aguas receptoras puede constituir un indicativo del mayor o menor grado de contaminación de las mismas. <sup>[15]</sup>

Los cloruros se pueden generar por reacción de una base (óxido, hidróxido, carbonato, etc.) y ácido clorhídrico. Algunos metales muy reactivos, como por ejemplo el zinc (Zn), reaccionan también directamente con el ácido clorhídrico produciendo hidrógeno elemental y el cloruro correspondiente.

Frecuentemente, el ión cloruro es añadido al agua residual como parte de un tratamiento de la misma para la remoción de algún agente contaminante, tal es el caso del cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) que se utiliza como coagulante para precipitar el fósforo; sin embargo, este compuesto no incrementa una cantidad significativa de cloruros al agua residual. Por otra parte, el cloruro de sodio es usualmente utilizado para regenerar resinas de intercambio iónico gastadas en la purificación del agua. Los iones cloruro pasan a lo largo del lecho de la resina sin permanecer en ella y salen como residuo. <sup>[15]</sup>

Los iones cloruro son altamente solubles en el agua, y cuando se presentan en altas concentraciones (ej. 300 mg/l) interfieren en el desarrollo del crecimiento vegetal, limitándolo o impidiéndolo, debido a que resultan absorbidos por la flora, alterando el ciclo de vida de la misma, además resultan perjudiciales para la fauna acuática cuando se presentan en concentraciones muy elevadas (ej. 1000 mg/l), por lo cual resulta importante el control de sus niveles en los efluentes que van a los lagos, ríos o lagunas. <sup>[17]</sup>

Asimismo, en las aguas que se utilizan para fines industriales la presencia de cloruros en concentraciones elevadas ocasiona problemas de corrosión en tuberías y equipos. Es altamente perjudicial para sistemas de calderas de allí que su control es esencial para impedir daños a dichos sistemas. <sup>[18]</sup>

### **III.6.- ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DEL FÓSFORO:**

El fósforo esta presente en el agua residual en forma de ortofosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ), polifosfato ( $\text{P}_2\text{O}_7$ ) y en compuestos orgánicos. El fósforo se elimina en los tratamientos biológicos mediante su incorporación al tejido celular de los microorganismos; el contenido de fósforo en el tejido celular es del orden de una quinta parte del contenido de nitrógeno y puede variar en función de las condiciones

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

ambientales específicas, como pH y temperatura, parámetros que deben estar en niveles adecuados u óptimos para el desarrollo microbiológico.<sup>[11]</sup>

El porcentaje de fósforo eliminado durante el tratamiento secundario por la purga de lodos, oscila entre 10 y 30 % de la cantidad total inicial. El factor crítico en la eliminación biológica del fósforo es la exposición de los organismos a secuencias alternadas de condiciones aeróbicas y anaeróbicas. La exposición a condiciones alternadas obliga a los microorganismos a consumir cantidades de fósforo superiores a los niveles de consumo normales. El fósforo no sólo se emplea para el mantenimiento celular, síntesis, y transporte de energía, sino que también se almacena para su uso posterior. El lodo que contiene el exceso de fósforo se purga o se conduce a un proceso colateral complementario, donde se procede a la eliminación del exceso de fósforo, por ejemplo por precipitación química.<sup>[9]</sup>

La Figura 10 muestra los diversos procesos de tratamiento biológico típicos para la eliminación de fósforo. Estos procesos son: el proceso A/O para la eliminación de fósforo en la línea principal; el proceso PhoStrip para la eliminación de fósforo en la línea auxiliar, y el proceso basado en el Reactor Discontinuo Secuencial (RDS). Este último se emplea para pequeños caudales de agua residual, y permite la suficiente flexibilidad de operación como para abordar la eliminación de nitrógeno además de la de fósforo.

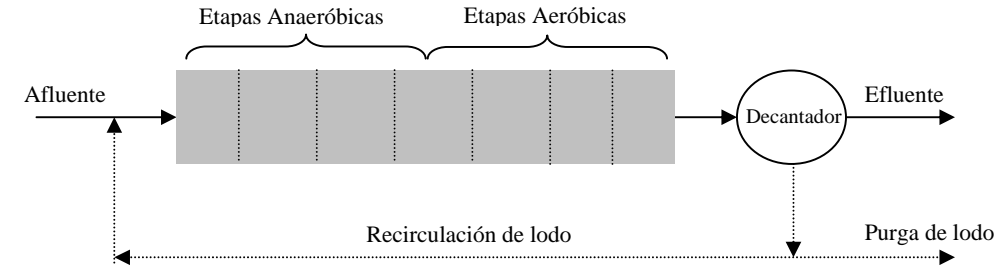
**Proceso A/O:** es un sistema que combina secuencialmente etapas aeróbicas y anaeróbicas. Si se requiere que, adicionalmente, se produzca la nitrificación, es necesario procurar el suficiente tiempo de detención en la fase aeróbica, es decir el tiempo de residencia en el sistema aeróbico. Una vez que ingresa el agua a tratar, se somete a etapas anaeróbicas y aeróbicas, como se mencionó anteriormente. Luego, pasa a un decantador o sedimentador en el cual el lodo sedimentado se recircula a la entrada del reactor (anaeróbico-aeróbico) y se mezcla con el agua residual entrante. El fósforo se separa de la corriente líquida a través de la purga de lodo activado. Bajo

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

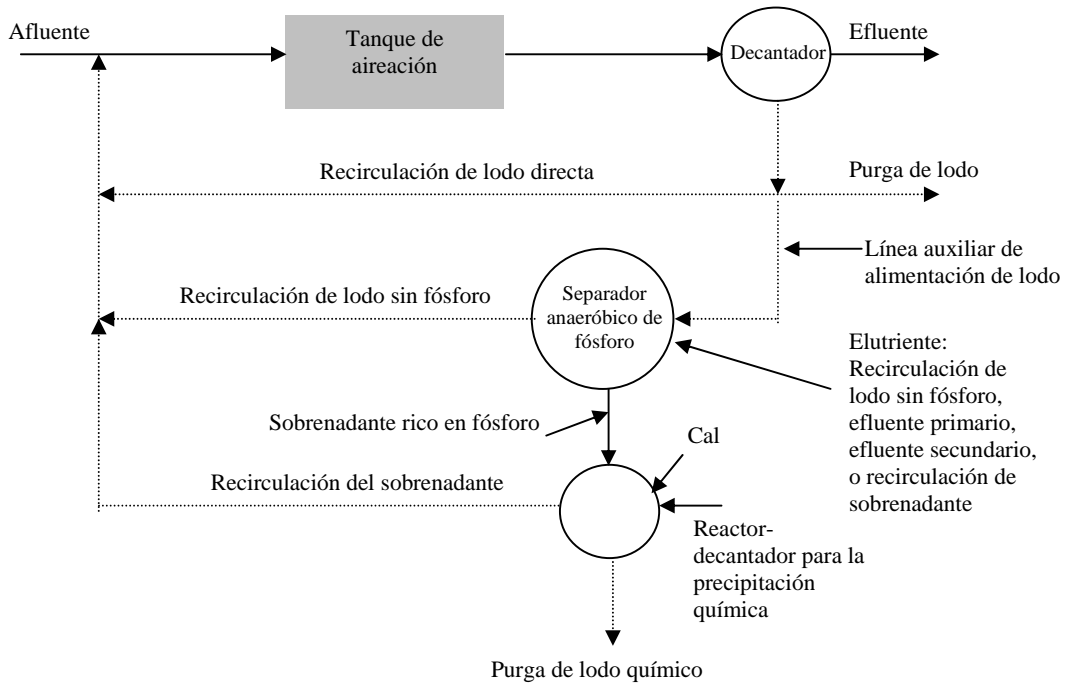
---

condiciones anaeróbicas, el fósforo presente en el agua residual y en la masa celular recirculada se libera en forma de fosfatos solubles y es asimilado por la biomasa aerobia. En esta etapa también se produce una cierta reducción de DBO. La concentración de fósforo en el efluente depende, principalmente, de la relación DBO/fósforo en el agua residual a tratar. Comúnmente, cuando esta relación es superior a 10:1, se pueden alcanzar concentraciones de fósforo soluble en el efluente iguales o inferiores a 1 mg/l. En los casos en los que la relación DBO/fósforo es inferior a 10:1, para conseguir concentraciones bajas de fósforo en el efluente, se deben adicionar sales metálicas al proceso, tales como sulfato de alúmina o cloruro férrico.

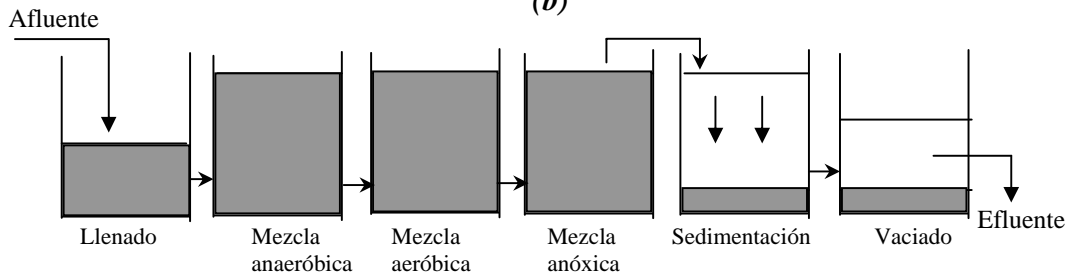
**Proceso PhoStrip:** en este proceso una vez que el agua residual ingresa al sistema se retiene por cierto tiempo en un tanque aireado y luego en un decantador, parte del lodo de recirculación del tratamiento biológico se desvía a un tanque separador anaeróbico de eliminación de fósforo. El tiempo de retención en el separador anaeróbico varía, normalmente, entre 8 y 10 horas. El fósforo liberado en este tanque se extrae junto con los sobrenadantes, y el lodo activado de bajo contenido en fósforo se recircula al tanque de aireación. El sobrenadante rico en fósforo se trata con cal o con otro coagulante, como el cloruro férrico o algún polímero, en un tanque independiente, y se conduce a los tanques de decantación primaria o a un tanque de floculación/clarificador independiente para separar los sólidos. El fósforo se extrae del sistema como componente del precipitado químico. Al separador anaeróbico de fósforo también se introduce una corriente llamada elutriente, la cual puede contener la recirculación de lodos sin fósforo, el efluente primario, el efluente secundario o la recirculación del sobrenadante. Los sistemas PhoStrip son capaces de producir efluentes con contenidos totales de fósforo inferiores a 1,5 mg/l.



(a)



(b)



(c)

Figura 10. Sistemas alternativos de eliminación biológica de fósforo: (a) Proceso A/O, (b) Proceso PhoStrip, y (c) RSD.<sup>[9]</sup>

**Reactor Discontinuo Secuencial:** este proceso comprende las etapas de llenado, reacción, sedimentación, vaciado. La etapa de llenado tiene como objetivo la adición de sustrato (agua residual bruta o efluente primario) al reactor, esta fase suele llevar el 25% de la duración total del ciclo. Luego, en la etapa de reacción se complementan las reacciones iniciadas durante la fase de llenado, esta etapa suele ocupar el 35% de la duración total del ciclo, ya que comprende una sección anaeróbica donde se produce la liberación del fósforo y consumo de la DBO, una sección aeróbica en la que los microorganismos se consumen el fósforo y una sección anóxica donde se desnitrifica el agua. Consecutivamente, se da la sedimentación de los sólidos para conseguir un sobrenadante clarificado como efluente, este proceso de sedimentación es mucho más eficiente en un reactor discontinuo secuencial que en uno de flujo continuo, debido a que el contenido del reactor esta completamente en reposo, y representa el 20% de la duración total del ciclo.

Posteriormente, se hace el vaciado o la extracción del agua clarificada del reactor, para ello se emplean métodos de decantación. Esto tarda por lo general del 20% al 50% de la duración total del ciclo. La duración total del ciclo del reactor puede variar entre 3 y 24 horas, dependiendo si también se quiere reducir el nitrógeno y oxidar carbono. La principal desventaja de este proceso es que para llevarse a cabo, requiere de unidades físicas repetidas (tanques).<sup>[9]</sup>

Al comparar los tres procesos de eliminación de fósforo descritos anteriormente, se puede afirmar que los más ventajosos son el PhoStrip y el A/O porque se ajustan fácilmente a cualquier planta de tratamiento de aguas residuales pues no requieren de muchas unidades físicas para la operación y son adecuados para caudales considerables. Sin embargo, el proceso A/O requiere que exista una relación DBO/fósforo mayor a 10:1 en el afluente, si no se tiene esta relación y el tiempo de retención celular de la fase aeróbica es corto, es necesario emplear equipos que proporcionen elevadas tasas de transferencia de oxígeno, como sopladores de gran capacidad. Por el contrario el proceso PhoStrip no está gobernado por la relación



DBO/fósforo, pero involucra la adición de cal o de algún coagulante para precipitar el fósforo sobrenadante y ello implica un costo adicional y un aumento de los lodos a tratar. En el proceso A/O la adición de coagulantes es opcional ya que si se cuenta con equipo que proporcione una tasa adecuada de transferencia de oxígeno, esta adición no es necesaria porque igual se conseguirán concentraciones bajas de fósforo. Sin embargo, la elección de uno u otro método debe ser evaluada tomando en cuenta la fácil incorporación al sistema de tratamiento con que se cuenta en particular.

### **III.7.- MÉTODOS AVANZADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA DISMINUIR FÓSFORO Y CLORUROS:**

Los métodos avanzados de tratamiento constituyen un conjunto de procesos químicos y físicos especializados, que se utilizan para disminuir la cantidad de contaminantes específicos que quedan en el agua después de los tratamientos primario, secundario y terciario, como lo son: fósforo, cloruros, nitrógeno, minerales, metales pesados y compuestos orgánicos, entre otros. Estos tratamientos avanzados dependen del tipo de contaminantes que tenga el agua. Son procedimientos que pocas veces se utilizan debido a las altas inversiones que se requieren.

El fósforo, puede ser removido tanto por tratamientos no avanzados como avanzados. En este sentido se conocen experiencias de eliminación de fósforo por medio de tratamientos biológicos y químicos o por ósmosis inversa y precipitación química. Su principal fuente de generación son los fosfatos utilizados en el proceso de manufactura de alimentos. <sup>[15]</sup>

En general, los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales no remueven cloruros, y cuando estos se encuentran en concentraciones mayores de 25000 mg/l son considerados tóxicos para el tratamiento biológico. En las empresas manufactureras de alimentos, existen varias fuentes de generación de cloruros, como por ejemplo el resultante de una neutralización; sin embargo se considera que las

fuentes más importantes se generan en las secciones donde se emplea sal común (NaCl) como materia prima. Entre los métodos avanzados para disminuir cloruros se encuentran la ósmosis inversa, el intercambio iónico, la electrodiálisis que se utiliza para la desmineralización de las aguas y eliminación de los iones orgánicos, precipitación química, la evaporación multietapa y multiefecto, y la cristalización, entre otros. <sup>[11]</sup>

A continuación se presenta una descripción de los métodos de tratamiento avanzado que se utilizan para disminuir fósforo y cloruros de las aguas residuales industriales:

### **III.7.1.- Precipitación Química:**

El tratamiento de las aguas residuales lleva consigo la adición de productos químicos, fundamentalmente coagulantes, con la finalidad de alterar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión, y facilitar su eliminación por sedimentación. En algunos casos, la alteración es pequeña, y la eliminación se logra al quedar atrapados dentro de un precipitado voluminoso constituido, principalmente, por el propio coagulante. Otra consecuencia de la adición de productos químicos es el incremento neto en los constituyentes disueltos del agua residual.

Los procesos químicos, junto con algunas de las operaciones físicas, se han desarrollado para proporcionar un tratamiento secundario completo a las aguas residuales no tratadas, incluyendo la eliminación del nitrógeno, y del fósforo, o de ambos a la vez. Este método representa una alternativa eficiente para remover fósforo, mientras que por el contrario, son pocos los compuestos que precipitan efectivamente los cloruros dada su alta solubilidad en medio acuoso, tales como sales de plata y platino. Pues estas además de ser costosas, pueden no ser viables en la estabilización del lodo por digestión anaeróbica debido a la toxicidad de los metales

pesados precipitados, pues pueden llegar a ocasionar la muerte de los microorganismos.<sup>[9]</sup>

**Precipitación Química para la Eliminación de Fosfatos:** La eliminación del fósforo contenido en el agua residual se realiza mediante la incorporación de fosfatos a los sólidos en suspensión y la posterior eliminación de éstos. El fósforo se puede incorporar, tanto a los sólidos biológicos (p.e. microorganismos) como a los precipitados químicos. Para lograr remover o eliminar los fosfatos por precipitación química, se debe agregar un agente químico capaz de perturbar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión a fin de formar un precipitado voluminoso que arrastre el fósforo contenido en el agua residual, y así sedimentar el precipitado y reducir la concentración de este contaminante mediante purgas a los sedimentadores.

**Estrategias para la Eliminación del Fósforo:** Los productos químicos que se han utilizado para eliminar el fósforo incluyen sales metálicas, tales como: el cloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ), el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), y la cal o hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). También se utilizan el sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) y el cloruro ferroso ( $\text{FeCl}_2$ ), las cuales se pueden obtener como subproductos en la fabricación de aceros. El uso de polímeros combinados con sales de hierro y aluminio también ha proporcionado resultados satisfactorios en remoción de fosfatos. La cal no se emplea con frecuencia, puesto que causa un notable aumento en la cantidad de lodo producido, así como otros problemas relacionados con su dosificación.<sup>[9]</sup>

La Tabla 2 presenta las propiedades físicas de algunas de las sustancias que se emplean para remover fósforo mediante precipitación.

**Tabla 2. Propiedades Físico-Químicas de las sustancias más empleadas para precipitar fosfatos. <sup>[19]</sup>**

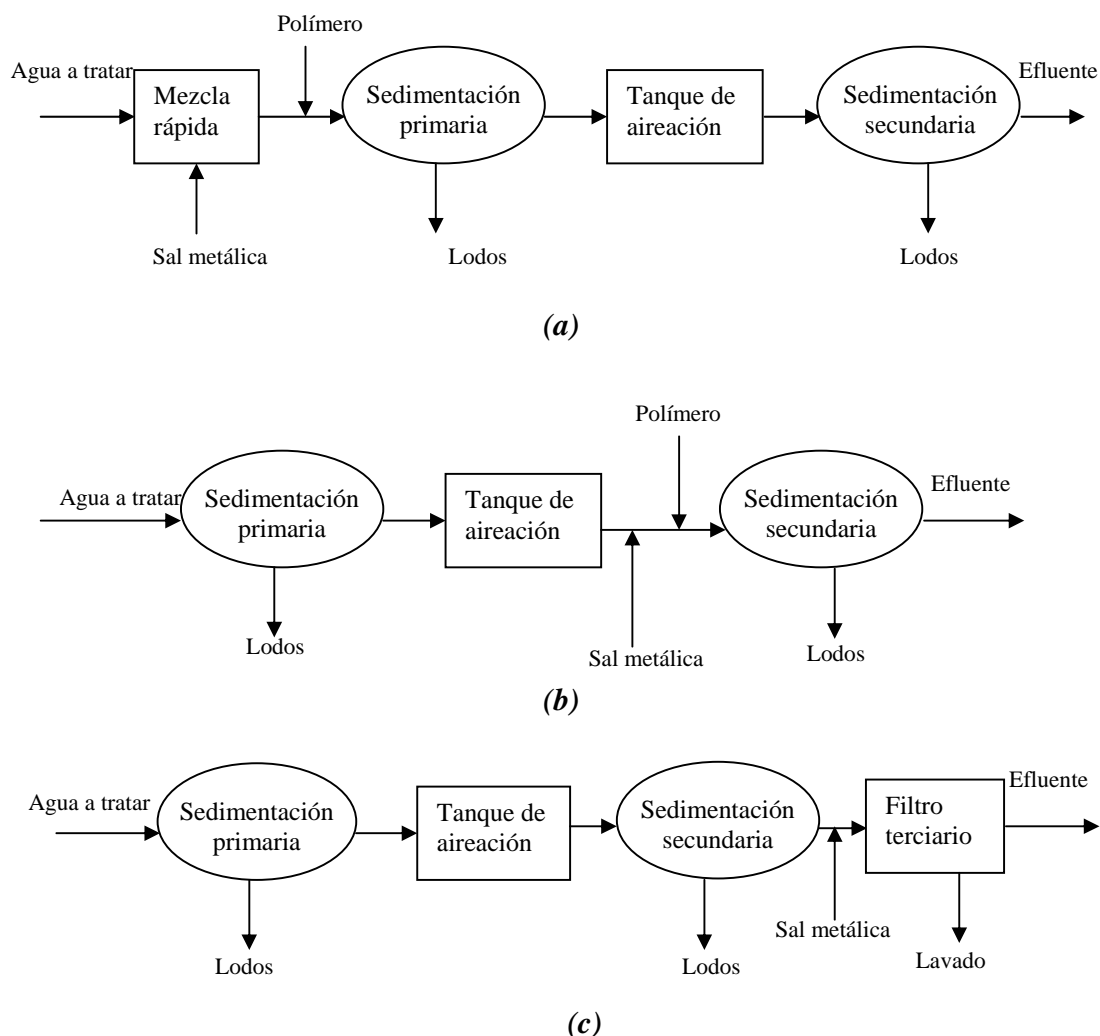
Sustancia	Peso molecular	Densidad (Kg/l)		Solubilidad en agua
		Seca	Líquida	
<b>Cloruro Férrico (FeCl<sub>3</sub>)</b>	162,22	-	1,345-1,490	En todas las proporciones
<b>Sulfato de Aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18 H<sub>2</sub>O)</b>	666,7	0,961-1,201	1,250-1,281	En todas las proporciones
<b>Cal (Ca(OH)<sub>2</sub>)</b>	56,0 como CaO	0,560-0,800	-	En todas las proporciones

La precipitación del fósforo contenido en un agua residual puede producirse en varios puntos diferentes, como se puede observar en los diagramas de flujo que se presentan en la Figura 11. Dependiendo del sitio en que se le adicione la sal o el polímero, el fenómeno de precipitación recibe el nombre de: pre-precipitación, co-precipitación o post-precipitación.

**Pre-precipitación:** Este nombre se aplica a la adición de productos químicos para la precipitación del fósforo al agua residual cruda en la sección previa a la sedimentación primaria. En este caso el fósforo precipitado se elimina con la purga del lodo primario.

**Co-precipitación:** Se define como co-precipitación al proceso de adición de productos químicos para la formación de precipitados que se eliminarán junto con los lodos biológicos. Los productos (sales metálicas o polímeros) se pueden adicionar al efluente de las instalaciones de sedimentación primaria, al líquido mezcla del proceso de lodos activados (tanque de aireación), o al efluente de un proceso de tratamiento biológico antes de la sedimentación secundaria, que es el caso que se evidencia en la figura 11 (b). Para este último, el fósforo precipitado se eliminará con la purga del lodo secundario.

**Post-precipitación:** La post-precipitación comprende la adición de productos químicos al efluente de la sedimentación secundaria y la posterior eliminación de los precipitados químicos. En este proceso, los precipitados químicos se suelen eliminar por filtración del efluente, como se refleja en la figura 11 (c), o en instalaciones complementarias de sedimentación.<sup>[9]</sup>



**Figura 11. Diagramas de flujo para la eliminación del fósforo: (a) pre-precipitación, (b) co-precipitación, (c) post-precipitación.<sup>[9]</sup>**

El cloruro férrico y el de aluminio se suelen emplear en proporciones molares que oscilan entre 1 y 3 iones metálicos por cada ión de fósforo. La proporción

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

exacta se determina mediante ensayos “in situ” y varía de acuerdo a las características particulares de cada agua residual. También, es importante considerar que teóricamente la solubilidad mínima del  $\text{AlPO}_4$  se presenta cuando el pH es de 6,3 y la del  $\text{FePO}_4$  ocurre a pH de 5,3; sin embargo, la aplicación práctica del proceso ha producido buenos rendimientos de eliminación de fósforo para cualquier pH situado entre 5,5 y 7,0, valores compatibles con cualquier proceso de tratamiento biológico. [11]

La Tabla 3 muestra el porcentaje de reducción de fósforo en función de la relación molar de aluminio y fósforo. En esta se puede observar que a medida que se aumenta la proporción de aluminio dosificada, aumenta la cantidad de fósforo removido, es decir, la relación entre estos es directamente proporcional. A partir de esta información se puede tener un estimado de la cantidad de aluminio que se puede dosificar para lograr la remoción deseada de fósforo.

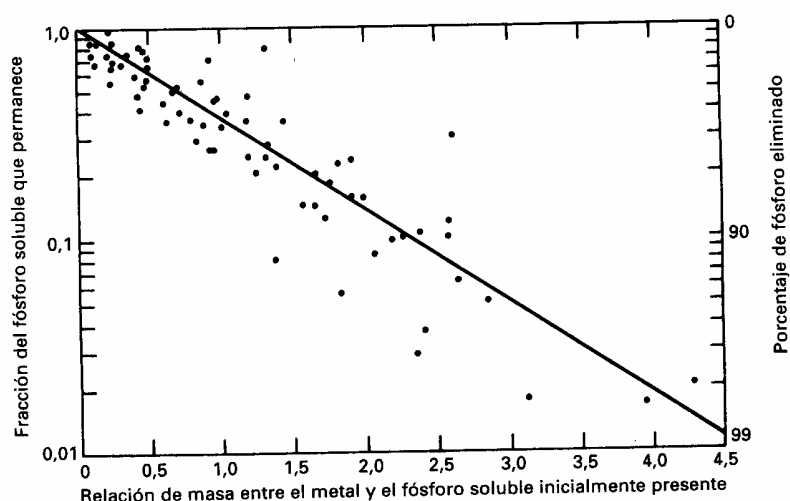
**Tabla 3. Dosificaciones de aluminio necesarias para varios niveles de eliminación de fósforo. [11]**

Reducción de Fósforo (%)	Relación Molar, Al/P	
	Intervalo	Típico
75	1,25:1-1,5:1	1,4:1
85	1,6:1-1,9:1	1,7:1
95	2,1:1-2,6:1	2,3:1

En el mismo orden de ideas, la Figura 12 presenta la variación de la fracción soluble de fósforo que no se logra remover y el porcentaje de este compuesto eliminado en función de la relación másica entre el metal (hierro o aluminio) y el fósforo soluble presente inicialmente. Con este gráfico se puede ver el comportamiento del fósforo soluble en el agua residual con los distintas relaciones másicas metal/fósforo, lográndose observar que a mayor dosificación del metal, mayor es el porcentaje de fósforo eliminado y menor es la fracción de soluble de este en el agua.

Es importante destacar que la Figura 12 es particular para cada agua residual, la cual se construye con datos experimentales, lo que resulta un poco engorroso porque implica una gran cantidad de ensayos. Por lo tanto, este gráfico sirve de aproximación para establecer la dosis de sal metálica a emplear para remover el fósforo presente en el agua residual.

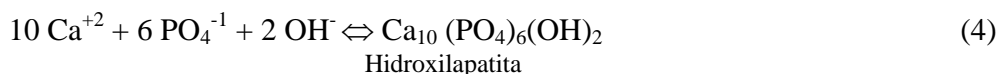
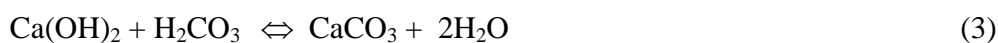
**Química de la eliminación de los fosfatos:** La precipitación química para remover el fósforo se consigue mediante la adición de sales de iones metales de varias valencias, tales como: el calcio [ $\text{Ca}^{+2}$ ], el aluminio [ $\text{Al}^{+3}$ ] y el hierro [ $\text{Fe}^{+3}$ ], que forman precipitados de fosfatos poco solubles.



**Figura 12. Eliminación de fósforo soluble por adición de Cloruro Férrico.**<sup>[9]</sup>

⊕ Precipitación de fosfato con calcio:

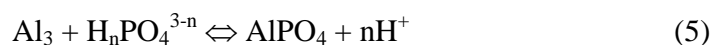
El calcio se puede añadir en forma de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). En la ecuación (3), se observa que cuando se adiciona cal al agua, reacciona con la alcalinidad natural del carbonato para precipitar  $\text{CaCO}_3$ . Cuando el pH del agua residual alcanza valores por encima de 10, el exceso de iones calcio reaccionará con el fosfato, como se muestra en la ecuación (4), para precipitar hidroxilapatita  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ .



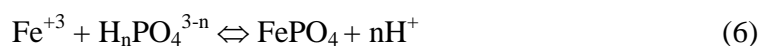
Debido a que la cal reacciona con la alcalinidad del agua residual, la cantidad de cal necesaria será prácticamente independiente de la cantidad de fósforo presente en el agua, y será función, fundamentalmente, de la alcalinidad del agua. La cantidad de cal necesaria para la precipitación del fósforo en el agua residual suele ser de 1,4 a 1,5 veces la alcalinidad total expresada en  $\text{CaCO}_3$ . Si el pH del afluente está entre 8,5 y 9,5 la dosis de cal varía entre 75 y 250 mg/l como  $\text{Ca(OH)}_2$ .<sup>[9]</sup>

Las reacciones básicas que intervienen en el proceso de precipitación del fósforo con hierro y aluminio son las siguientes:

⊕ Precipitación de fosfatos con aluminio:



⊕ Precipitación de fosfatos con hierro:



En las ecuaciones (5) y (6) se indican las reacciones asociadas a la precipitación de fosfatos cuando se utilizan sales de aluminio y de hierro, como se puede observar, 1 mol precipitará 1 mol de fosfato. Sin embargo, estas ecuaciones resultan engañosamente simples y deben ser consideradas teniendo en cuenta la multitud de reacciones secundarias que se producen, las constantes de equilibrio asociadas, los efectos de la alcalinidad, pH, y trazas de elementos presentes en el agua residual. En consecuencia, no se pueden emplear las ecuaciones (5) y (6) para estimar directamente las dosis necesarias para la precipitación, razón por la cual éstas suelen



### Presentación y Discusión de los Resultados

establecerse de manera empírica a partir de ensayos a escala de laboratorio y, ocasionalmente, si se usan polímeros, a escala real. Por ejemplo, para concentraciones equimolares iniciales de  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$  y fósforo, la Figura 13 muestra la concentración total de fósforo soluble en equilibrio con el  $\text{FePO}_4$  y el  $\text{AlPO}_4$ . Las líneas de trazo continuo representan la concentración de fósforo residual soluble después de la precipitación. Los fosfatos metálicos puros son precipitados dentro de la zona sombreada, y los precipitados complejos mixtos se forman fuera de esta zona, en los valores más altos del pH. Es decir, la Figura 13 presenta una curva de solubilidad tanto para el hierro como para el aluminio. Por ejemplo, para el caso del hierro se aprecia que para un pH de 2, aproximadamente, hay una concentración de fósforo residual en el agua después de la precipitación, igual que la concentración de fósforo soluble con un pH de 7, aproximadamente. En fin, estas curvas se utilizan para verificar someramente la solubilidad del fósforo después de la precipitación para cada valor de pH y la posibilidad de formación de otros compuestos. [9]

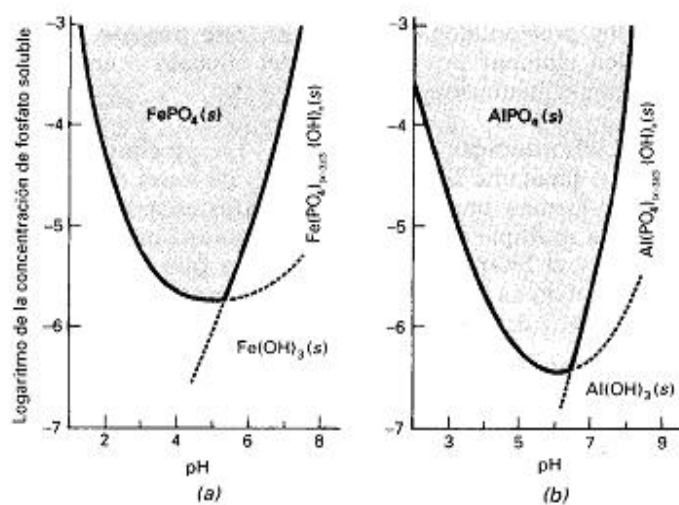


Figura 13. Concentración de fosfato férrico y de aluminio en equilibrio con fósforo soluble. (a) Fosfato de hierro (III), y (b) Fosfato de aluminio (III). [9]

Existen ciertos factores que deben tenerse en cuenta en la selección de un producto químico para la eliminación del fósforo por precipitación, y estos son los siguientes:

- ⊕ Nivel de fósforo en el afluente
- ⊕ Sólidos suspendidos en el agua residual
- ⊕ Alcalinidad
- ⊕ Costos de los reactivos
- ⊕ Seguridad del suministro de productos químicos
- ⊕ Instalaciones para el tratamiento de lodos
- ⊕ Compatibilidad con otros procesos de tratamiento de la planta. <sup>[20]</sup>

### **III.7.2.- Intercambio Iónico:**

Es un proceso en el que algunos iones de las diferentes especies en disolución son reemplazados por otros iones presentes en un determinado material insoluble de intercambio. En el caso de aguas residuales este proceso se usa para remover contaminantes disueltos, como por ejemplo: cloruros, sulfatos, entre otros. Sin embargo, el uso más extendido de este proceso es el de reducción de dureza del agua, proceso éste que usualmente se denomina ablandamiento del agua, en el que los iones sodícos ( $\text{Na}^+$ ) de la resina catiónica de intercambio sustituyen a los iones de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) presentes en el agua, reduciendo por lo tanto su dureza. Para la reducción de los sólidos disueltos totales, en una determinada corriente de agua es necesario utilizar tanto resinas de intercambio aniónico como resinas de intercambio cationico. Primeramente, el agua a ser tratada se hace circular a través de un intercambiador de tipo cationico, en el que los cationes o iones positivos se sustituyen por iones hidrógeno. El efluente del intercambio catiónico se hace pasar por una resina de intercambio aniónico, proceso en que los aniones se sustituyen por iones hidróxilos. Por lo tanto, los sólidos en suspensión se sustituyen por iones hidrógeno e hidróxilos que reaccionan para formar moléculas de agua.

Los intercambiadores de iones suelen ser de tipo tambor o columna, en los que el agua a tratar entra por la parte superior de la columna a una cierta presión, circula en sentido descendente a través del lecho de resina, y sale por la parte inferior; cuando se agota la capacidad de la resina, es decir cuando esta se satura, la columna se somete a un ciclo de regeneración, el cual consiste en un lavado con agua a contraflujo, para eliminar los sólidos atrapados y luego se procede a regenerar la resina, dicha regeneración se efectúa en el caso de la resina de intercambio catiónico con un ácido fuerte, como el ácido sulfúrico o el clorhídrico, mientras que para regenerar las resinas de intercambio aniónico, el regenerante que se utiliza con mayor frecuencia es el hidróxido de sodio. <sup>[9]</sup>

El empleo de esta tecnología para remover cloruros, consiste en la utilización de una resina de intercambio aniónico de tipo base débil. Las resinas de intercambio aniónico de tipo base fuerte son más selectivas hacia iones tales como hidroxilo y bicarbonato, y por ende, menos efectivas para el tratamiento de cloruros. La remoción de estos no es completa, el tratamiento alcanza una efectividad de hasta un 80% de desechos (ej. Cloruros) que tienen concentraciones entre 600 y 3600 mg/l. Además, esta tecnología presenta limitaciones en sólidos disueltos, que deben ser menores a 2000 mg/l, y el agua debe ser ligeramente alcalina para un buen tratamiento. <sup>[13]</sup>

### **III.7.3.- Ósmosis Inversa:**

El proceso de ósmosis inversa se basa en el uso de una membrana semipermeable, que cuando está en contacto con la solución, permite el paso de pequeñas moléculas de disolvente y bloquea el paso de moléculas o iones de mayor tamaño como el soluto y que solamente permita el paso del agua. La ósmosis inversa es un proceso en el que se separa el agua de las sales disueltas en disolución mediante la filtración a través de una membrana semipermeable a una presión superior a la presión osmótica provocada por las sales disueltas en el agua a tratar. Con las

membranas y equipos actuales, las presiones de funcionamiento varían desde la presión atmosférica hasta 6900 kPa. [9]

El fenómeno de la ósmosis inversa es útil para la desmineralización del agua y para la eliminación de materia inorgánica, orgánica y nutrientes disueltos en el agua, ya que logra la eliminación de la materia que no es susceptible de remover con otras técnicas. Esta tecnología es la más utilizada en la actualidad para eliminar cloruros y nutrientes presentes en aguas servidas, como el fósforo; ya que permite obtener un 90% de agua que puede ser reutilizada. La ósmosis inversa puede llegar a lograr una desmineralización del 90% con una pérdida de aproximadamente el 10% del agua de alimentación en forma de salmuera.

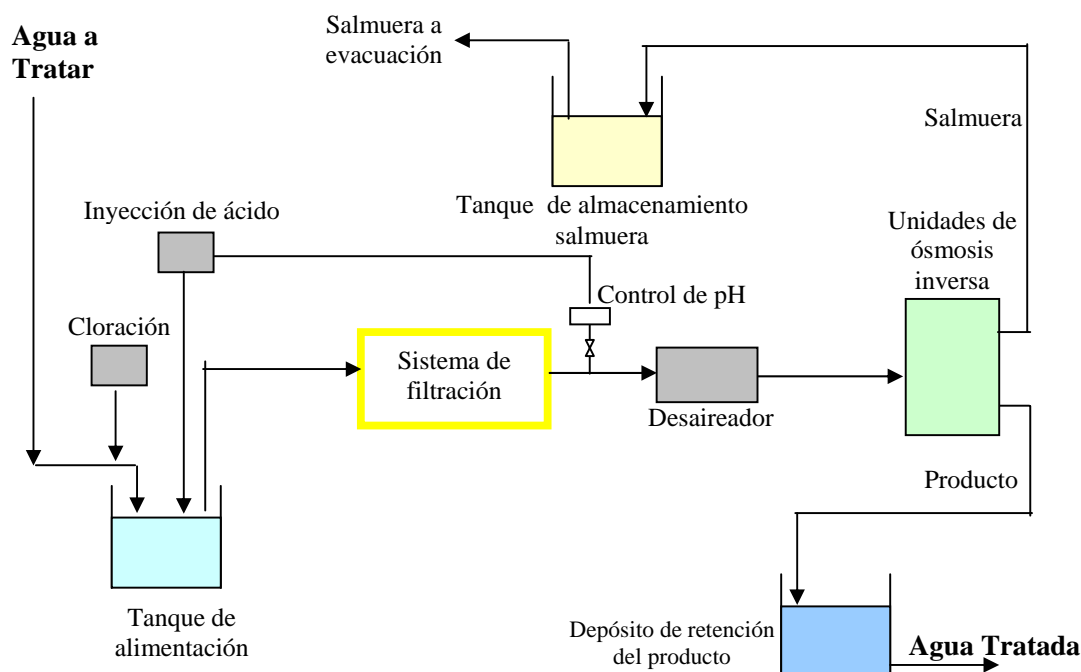
Los componentes principales de una unidad de ósmosis inversa (Figura 14), son la membrana, una estructura de soporte de la membrana, un recipiente contenedor, y una bomba de alta presión. Como materiales de membrana se han utilizado el acetato de celulosa y el nylon. Se han empleado cuatro sistemas de soporte de la membrana: tejido espiral, tubular, y de ficha hueca. Las unidades de ósmosis inversa se pueden conectar en paralelo, para conseguir la capacidad hidráulica necesaria, o en serie para conseguir el grado de desmineralización deseado. Este proceso consiste en bombear el agua a tratar a un sistema de filtración, para eliminar sólidos suspendidos, luego pasa por un desaireador y es bombeado desde allí, a la unidad de ósmosis inversa donde se obtiene por el tope de la misma una solución concentrada en sales y por el fondo, el agua ya tratada.

Para que el funcionamiento de las unidades de ósmosis inversa sea el adecuado, es necesario acondicionar el afluente de este sistema. La presencia de material coloidal en este puede provocar fallos en las membranas. Suele ser necesario hacer un pretratamiento del afluente con un tratamiento químico seguido por filtración de arenas, o pueden utilizarse otros procesos de membrana como microfiltración y ultrafiltración. Además, en ocasiones es necesario eliminar el hierro

y el manganeso para reducir el potencial de aparición de incrustaciones carbonatadas. El pH del afluente se debería limitar al intervalo comprendido entre 4 y 7,5 para evitar la formación de incrustaciones carbonatadas. Para restaurar el flujo a través de la membrana, es necesario llevar a cabo regularmente el lavado químico de los elementos de la membrana (por lo menos una vez al mes). [11]

### III.7.4.- Desmineralización por Electrodiálisis:

En el proceso de electrodiálisis los componentes iónicos de una solución se separan mediante el uso de membranas semipermeables selectivas a iones. La aplicación de un potencial eléctrico entre los dos electrodos origina una corriente eléctrica que atraviesa la solución, la cual, a su vez, da lugar a una migración de cationes hacia el electrodo positivo. Dada la disposición alternada de las membranas permeables a los cationes y aniones, se forman células de sales concentradas y diluidas. En la Figura 15 se esquematiza este proceso.

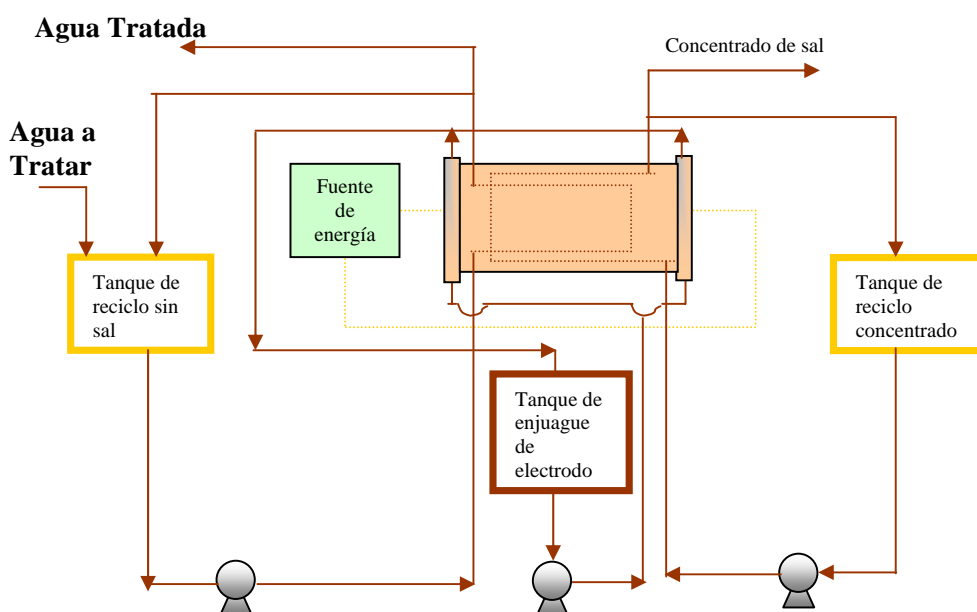


**Figura 14. Diagrama de flujo típico del Proceso de Ósmosis Inversa.** [11]

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

El agua a tratar se bombea a través de las membranas que están separadas por unos espaciadores y dispuestas en pilas. Dicha agua se retiene, generalmente, durante 10 a 20 segundos aproximadamente en cada pila individual o etapa. La eliminación de sólidos disueltos varía con: la temperatura del agua residual; la corriente eléctrica que se hace circular; el tipo y concentración de iones presentes; la selectividad de la membrana; el potencial del agua residual a producir obturaciones e incrustaciones; los caudales de agua residual, el número y configuración de las etapas.

Este proceso puede funcionar tanto en modo continuo como en discontinuo. Las unidades se pueden disponer en paralelo para obtener la capacidad hidráulica necesaria o bien en serie para alcanzar el grado de desmineralización deseado. Es necesario, un aporte de agua tratada, alrededor del 10% del volumen de alimentación, para lavar de forma continua las membranas.



**Figura 15. Esquema de una unidad de Electrodiálisis.** <sup>[10]</sup>

Los problemas relacionados con el proceso de la electrodiálisis para el tratamiento de aguas residuales incluyen la precipitación química de sales de poca solubilidad en la superficie de la membrana y la obstrucción de ésta por la materia coloidal residual de los efluentes de las plantas de tratamiento. Para reducir la obturación de las membranas, conviene llevar a cabo un pretratamiento con carbón activo, posiblemente precedido por precipitación química y alguna forma de filtración. <sup>[10]</sup>

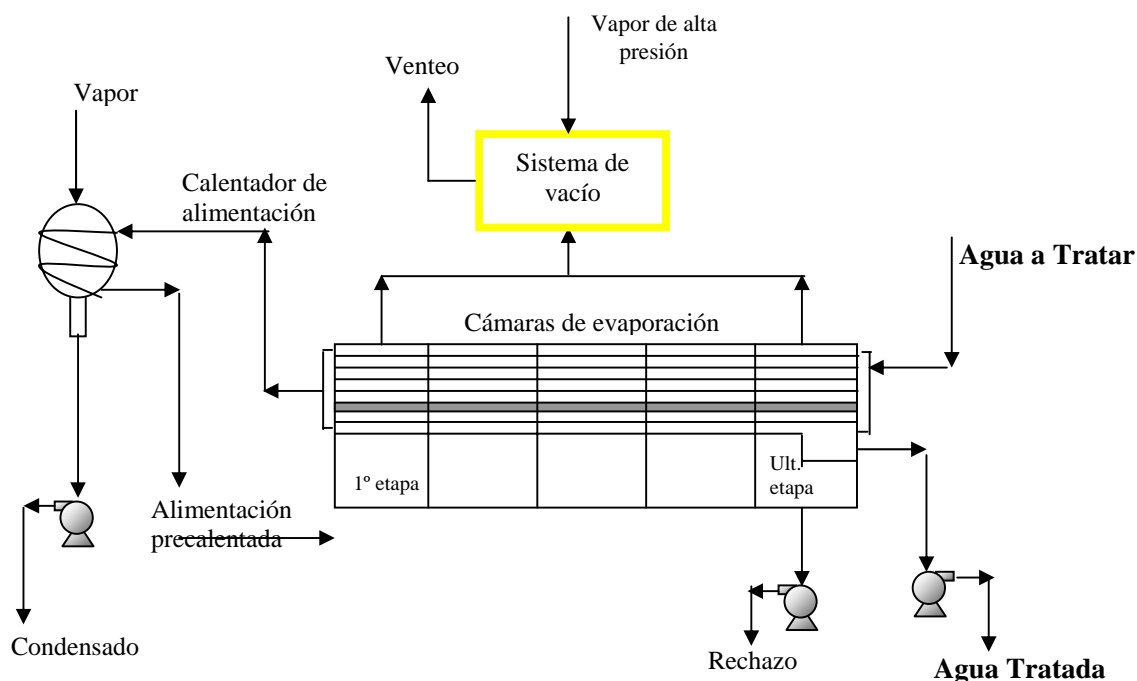
### **III.7.5.- Evaporación Multietapa:**

Este es el principio más antiguo de separación de agua fresca a partir del agua mar. El procedimiento requiere simplemente llevar el agua a tratar hasta el punto de ebullición y condensar el vapor para obtener el agua desalinizada, y por supuesto la sal precipitada. Para ensamblar este proceso se debe proveer energía térmica para generar el vapor, así como un mecanismo para condensar el vapor.

Este proceso abarca la evaporación a lo largo de varias cámaras o etapas (multietapa). La alimentación es calentada a alta presión y es introducida en la primera etapa “*Cámara flash*”, donde se produce una caída brusca de presión, de modo que el agua se evapora, este fenómeno ocurre como consecuencia de la acción de un sistema de vacío. Este proceso continua para la corriente que no resultó evaporada en las siguientes cámaras, ya que la presión es menor en la siguiente sección. El vapor generado en cada una de las etapas es generalmente condensado utilizando enfriadores ubicados en el tope de cada cámara. El fluido de enfriamiento es el agua de alimentación, de modo de hacer más eficiente desde el punto de vista energético al proceso. <sup>[12]</sup>

A nivel industrial, en las plantas donde esta tecnología ha sido implantada se utilizan de 15 a 25 cámaras, y están sujetas a corrosión, a menos que sea usado acero inoxidable. Adicionalmente estas plantas presentan problemas de erosión, ocasionada

por la turbulencia del agua alimentada en la cámara cuando pasa de una etapa a otra. En la Figura 16 se ilustra un esquema de esta tecnología. [10]



**Figura 16. Esquema del Proceso de Evaporación Multietapas.** [12]

### **III.7.6.- Evaporación Multiefecto:**

Ocurre en una serie de tambores y utiliza los efectos de evaporación y condensación a presión de ambiente reducida. En esta tecnología, consiste en conectar diversos evaporadores (efectos) entre sí, de forma que el vapor secundario producido en uno de ellos se utiliza como vapor primario o fluido calefactor en otro y así sucesivamente (Figura 17). De este modo, se consigue un sistema de  $n$  efectos. Cuando una cierta masa  $m$  de vapor primario se condensa a nivel del primer efecto, se evapora aproximadamente una masa  $m$  de agua; esta masa de vapor liberado se condensará en otro evaporador consiguiendo la evaporación de una masa similar de agua. Por tanto, en conjunto, la masa de agua que se evapora es aproximadamente  $n \times m$ .



## Presentación y Discusión de los Resultados

Mientras mayor sea el número de evaporadores, será mejor el desempeño del sistema. Dependiendo de la forma de arreglo de los equipos, las unidades pueden ser clasificadas como de tubo horizontal, vertical o tubos apilados verticalmente.

Las ventajas del sistema multiefecto, respecto al monoefecto o simple efecto, consisten en el ahorro del fluido de calentamiento, debido al aprovechamiento más efectivo de la energía térmica y a la del agua de enfriamiento ya que el propio líquido a evaporar contribuye a la condensación parcial del vapor producido. Adicionalmente se debe mantener la superficie de transferencia de calor libre de incrustaciones.

Esta tecnología puede ser utilizada en el tratamiento de aguas residuales para eliminar cloruros, ya que precipitan en forma de sal (de sodio por ejemplo). En este caso particular, igualmente precipitan otros compuestos presentes, y resulta especialmente importante tomar en cuenta la cantidad de sólidos disueltos, dureza y la alcalinidad, que pueden provocar incrustaciones y corrosión, mientras que el agua sale en condiciones que pueden permitir su reutilización.<sup>[10]</sup>

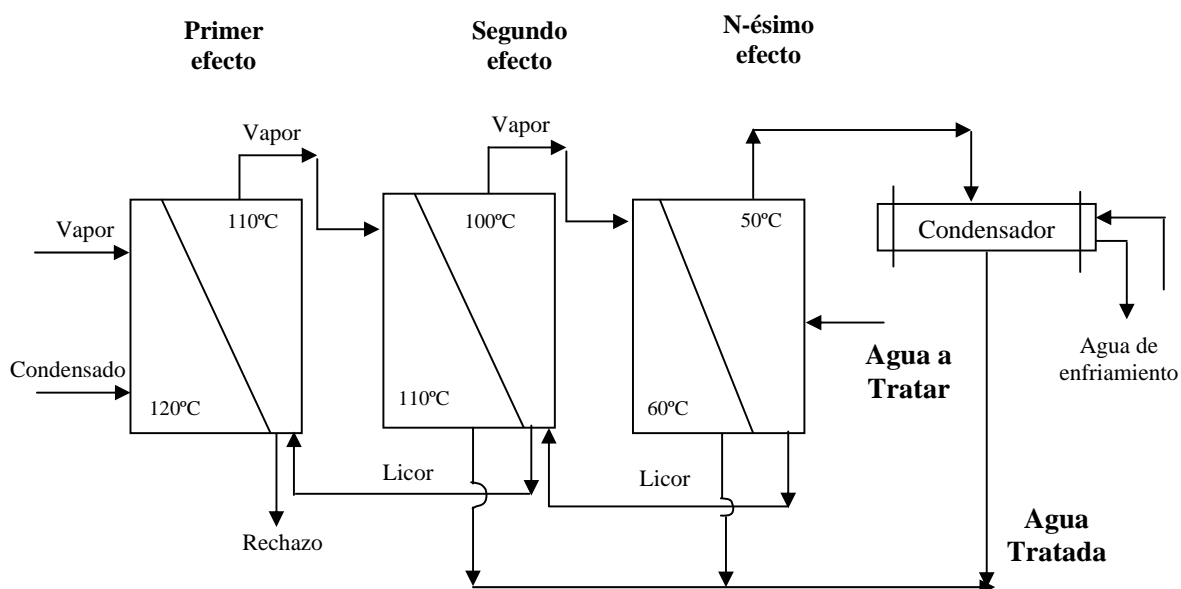


Figura 17. Proceso de Evaporación Multiefectos.<sup>[10]</sup>

### **III.7.7.- Evaporación por Compresión de Vapor:**

Este proceso es utilizado o bien en combinación con otros procesos como evaporación multiefecto o por sí mismo. El calor para evaporar el agua proviene de la compresión de vapor. En vez del intercambio de calor directo con el vapor producido en una caldera, las unidades de compresión de vapor han sido construidas en una variedad de configuraciones. Por lo general, un compresor mecánico es utilizado para generar el calor de evaporación. Las unidades de este tipo son en su mayoría pequeñas en capacidad.

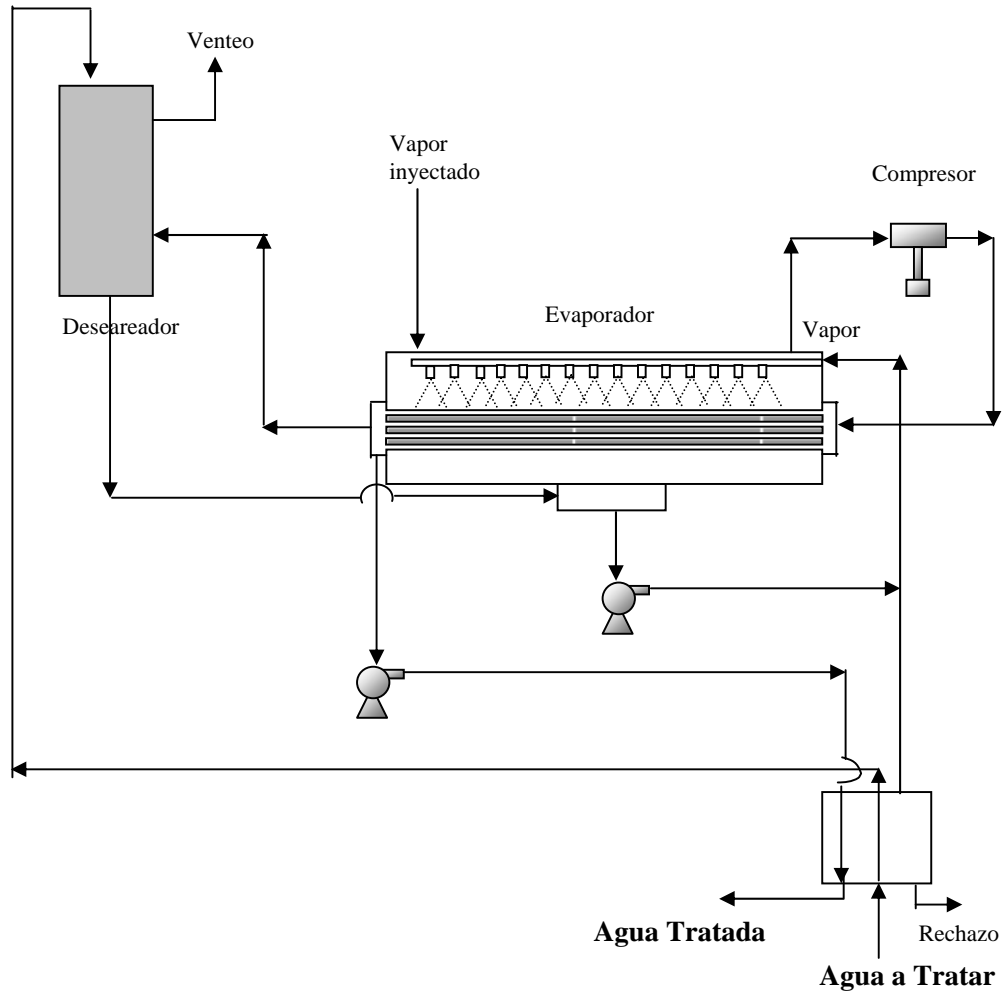
Esta técnica básicamente consiste en desairear la alimentación, que es vapor secundario (de otro proceso), para condensarla mediante un cambio poco significativo de presión. Seguidamente, este líquido es introducido en el evaporador a través de un sistema de spray o “regadera”, el cual intercambia calor con el vapor de alta presión que viene del compresor, permitiendo que ocurra la evaporación. En la Figura 18 se presenta un esquema de esta tecnología. <sup>[17]</sup>

### **III.7.8.- Cristalización:**

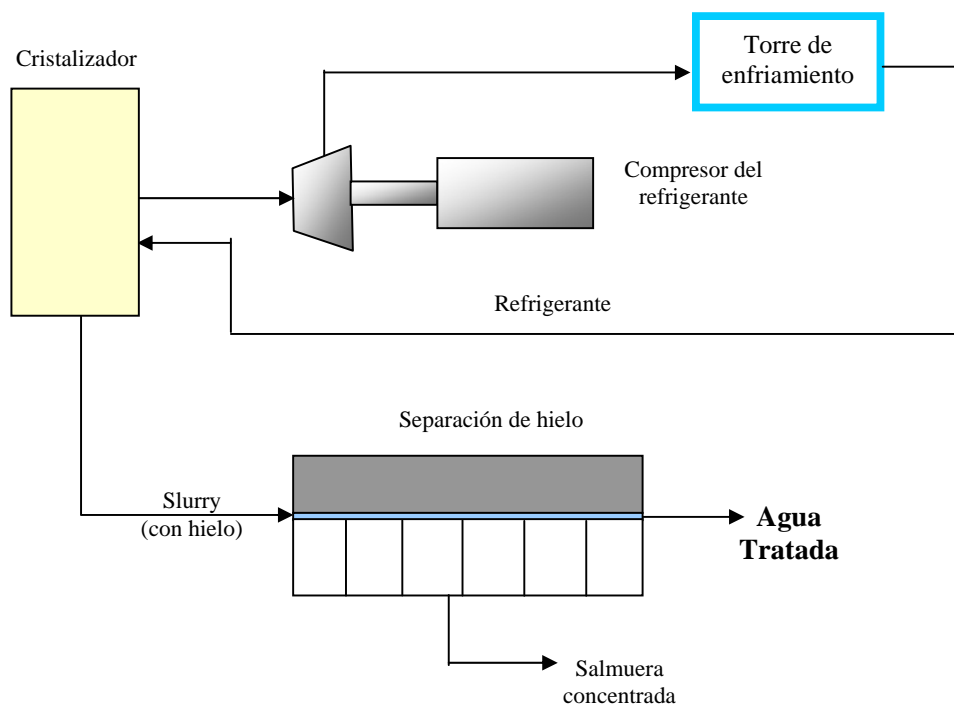
Este proceso se basa en el enfriamiento de una solución salina a su punto de congelación, la cual permite la formación y el depósito de cristales de sal. Esta tecnología presenta la ventaja sobre el proceso de evaporación, en el sentido de que a bajas temperaturas los procesos de corrosión se reducen, y por otro lado el proceso de congelación tiene los más bajos requerimientos energéticos. En la Figura 19 se muestra un esquema de una unidad de cristalización. Sin embargo, los refrigerantes empleados en este proceso, por lo general, son costosos. <sup>[17]</sup>

Esta tecnología consiste en introducir la corriente contaminada acuosa en una unidad cristalizadora para llevarla a su punto de congelación, luego se obtiene un slurry o una masa granizada, y posteriormente, se separa el hielo del agua. El

refrigerante utilizado en la cristalización, esta sometido a un ciclo de compresión-enfriamiento para recuperar su temperatura.



**Figura 18. Proceso de Evaporación por Compresión de Vapor.** <sup>[17]</sup>



**Figura 19. Esquema del Proceso de Cristalización.** <sup>[17]</sup>

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA**

Una vez establecido en los capítulos anteriores el basamento teórico de este Trabajo Especial de Grado, a continuación se presenta la estrategia metodológica a seguir en el presente estudio, a los fines de alcanzar los objetivos establecidos. Es decir, el conjunto de métodos, técnicas y protocolos instrumentales que se emplearon en el proceso de recolección y análisis de datos en la investigación propuesta, para trazar estrategias que permitan minimizar las concentraciones de fósforo y cloruros en el efluente de la PTER.

#### **IV.1.- CONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO:**

Esta constituye la etapa inicial de la investigación, y comprende las actividades previas al análisis cualitativo de la generación de los residuos líquidos en la EMA. Para ello se realizaron una serie de actividades que serán descritas a continuación:

##### **IV.1.1.-Proceso de Producción de la EMA:**

Inicialmente se procedió a conocer el proceso de producción de cada una de las tres empresas filiales de la EMA. Para ello, se recurrió a la ayuda del personal técnico encargado de cada área (supervisores, operadores, etc.) con la finalidad de entender con mayor detalle lo que ocurre en cada sección de la corporación. Esta actividad también contempló la revisión de manuales de operación y diagramas de flujo de procesos.

Una vez conocida el área de trabajo, se realizó una inspección más detallada de las áreas donde se generan corrientes con concentraciones significativas de fósforo y cloruros, solicitando información al personal sobre la cantidad de sal y compuestos fosfatados manejada en cada zona, las horas de descarga y el desalojo de los mismos. Se hizo una primera inspección visual de cada zona para tener una estimación inicial de los efluentes que tienen una contribución considerable de cloruros y fósforo.

De esta actividad, se obtuvo un diagrama de bloques general de la corporación (Ver Figura 1) y una visión general de los procesos de cada una de las filiales. Además, se obtuvo una descripción más detallada de los procesos que generan cloruros y fósforo desde las distintas plantas de la EMA hacia la PTER.

#### **IV.1.2.-Estudio de las Etapas y Equipos de la Planta de Tratamiento de Efluentes Residuales (PTER):**

Se realizaron inspecciones usando el esquema general de funcionamiento de la PTER y de cada uno de los equipos que la componen, así como también se realizó una revisión del estado físico del sistema de alcantarillado que conduce el efluente de los distintos procesos hacia la planta de tratamiento, para verificar la factibilidad de muestreo. Por lo que se pudo construir un diagrama de bloques del proceso de la PTER (Figura 7).

Se realizó una extensa revisión bibliográfica de los procesos que están involucrados en la PTER, además se examinaron manuales de operación de dicha planta, buscando la existencia de algún lugar donde se le estuviera dando un tratamiento al agua residual para la remoción de fósforo y/o cloruros. Posteriormente, se revisaron las normativas legales aplicables en cuanto a concentraciones de fósforo y cloruros, y los tratamientos existentes para remover estos compuestos.

#### **IV.2.- IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS:**

Se procedió a realizar un análisis integral detallado de la problemática existente en cuanto a remoción de fósforo y cloruros; para ello se revisaron y evaluaron las formulaciones de los insumos y productos del proceso de manufactura para identificar las corrientes que mayor aporte tienen en cuanto a concentración y volumen de fósforo y cloruros. También se examinó la data histórica referente a contenido de estos compuestos en los afluentes y efluentes de la PTER.

#### **IV.3.- ESTRATEGIA DE MUESTREO:**

En esta fase se identificaron y seleccionaron los puntos donde se efectuarán los muestreos de afluentes y efluentes según su criticidad en cuanto a su aporte de fósforo y cloruros, factibilidad de muestreo, confiabilidad y/o seguridad; para ello se realizó un recorrido por las distintas alcantarillas de cada una de las plantas para ubicar e identificar en campo las mejores alternativas como puntos de muestreo, así como verificar el acceso de las mismas. Además, se revisaron los programas de producción y se mantuvo una comunicación con el personal de las plantas para establecer una frecuencia conveniente de las mediciones necesarias para caracterizar las aguas residuales a los fines del presente trabajo. En la Tabla 4 se muestra la selección y ubicación de los puntos de muestreo.

**Tabla 4. Selección y ubicación de los puntos de muestreo.**

Agua residual	Descripción	Ubicación
Afluentes	Afluentes combinados	En la alimentación de PTER, específicamente en el tanque de descarga generales.
	Afluentes separados	En cada una de las plantas de la EMA.
Efluentes	Efluente de PTER	A la salida de PTER, específicamente en la Unidad de Cloración

El criterio utilizado para tomar las muestras y para la frecuencia de las mismas se varió en relación al área de muestreo, según se explica a continuación:

⊕ Los afluentes combinados se muestrearon en el Tanque de Descargas Generales de la PTER y el efluente fue tomado en la Piscina de Cloración. Las muestras eran de tipo compuestas, se tomaron con frecuencia de 1 hora, diariamente durante la jornada laboral por un lapso de un mes, con el fin de recolectar la mayor cantidad de datos posibles. Las mismas fueron almacenadas y refrigeradas en el laboratorio de PTER. Los afluentes combinados se muestrearon para cuantificar la concentración de fósforo y cloruros que ingresaban a la planta de tratamiento y el efluente se muestreó para ver la eficiencia de remoción de estos. Además, se tomaron muestras compuestas en la entrada y en la salida tanto del sistema anaeróbico como aeróbico para evaluar la eficiencia de remoción de fósforo, por un período de 15 días. Esta última actividad no se realizó para los cloruros ya que en los pasos intermedios de PTER no hay remoción para estos.



⊕ Para evaluar la contribución de las distintas zonas de producción, en cuanto a concentraciones de fósforo y cloruros, se tomaron muestras en las descargas directas de cada una de las plantas que conforman la corporación. Estas muestras fueron instantáneas. La frecuencia de muestreo estuvo determinada por el programa de producción semanal y cuando el personal informó de alguna descarga en especial.

⊕ Para la planta de ablandamiento de agua, por ser un proceso discontinuo, se tomaron muestras durante el proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico, a fin de cuantificar la emisión total de cloruros durante dicho proceso, se tomaron en intervalos de 2 min. hasta completar el tiempo total de regeneración. Las muestras fueron instantáneas, para representar de la manera más real el proceso de elución de cloruros. Este estudio se realizó en tres oportunidades.

Posteriormente, se realizó una inspección en el área del laboratorio de la PTER, para conocer las técnicas de análisis, el instrumental, los equipos y el material necesario para la caracterización de las aguas residuales, lo que permitió familiarizarse con la experimentación a fin de minimizar errores en la misma. Para la determinación de la concentración de fósforo se utilizó un kit de colorimetría marca HACH y para la de los cloruros se utilizó una bureta para la titulación.

#### **IV.4.- APORTES MÁSCOS DE FÓSFORO Y CLORUROS A LA PTER:**

Una vez que se tomaron las muestras se procedió a caracterizarlas. Esta fase consistió en la determinación de la concentración de fósforo, mediante el método colorimétrico con molibdato de amonio y la determinación de los cloruros a través del método de Morh por titulación con nitrato de plata (Ver Apéndice A).

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

Por otra parte, el caudal se determinó midiendo el tiempo que se tardaba en ocupar el agua un recipiente cilíndrico de 20 litros de capacidad, con la ayuda de un cronómetro. Esta operación se realizó por triplicado, pudiéndose determinar un valor de caudal promedio para cada una de las áreas donde se realizó el muestreo, a excepción de la PTER donde el caudal de ingreso es controlado a través de la frecuencia de una bomba de alimentación al sistema y es contabilizado por un medidor de flujo.

Una vez obtenida toda esta información, era apuntada en hojas de recolección de datos a fin de llevar un control del comportamiento de los distintos puntos muestreados, construyendo así el balance de materiales en función al aporte másico de cada una de las zonas, obtenido como el producto de la concentración medida por el caudal estimado, en unidades consistentes.

A partir de toda la información obtenida con esta actividad, se construyó el diagrama de bloques en función a los contenidos másicos de cada sitio, y en función a los porcentajes de aporte de cada zona a la planta de tratamiento se pudieron conocer las corrientes con mayor aporte de fósforo y cloruros a la misma. De modo de poder plantear los posibles escenarios de tratamiento de los compuestos en cuestión.

#### **IV.5.- EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS:**

Una vez caracterizada el agua residual se realizaron evaluaciones de las distintas opciones de tratamientos convencionales existentes para disminuir las concentraciones de fósforo y cloruros.

#### **IV.5.1.- Evaluación de Alternativas de Tratamientos Convencionales para Disminuir Fósforo:**

En primer lugar, se evaluó la eficiencia de remoción de fósforo por parte del tratamiento biológico, por lo que se realizaron caracterizaciones del afluente y efluente del sistema aeróbico y anaeróbico una vez que los microorganismos fueron sometidos a secuencias alternadas de condiciones anaeróbicas y aeróbicas; esto permitió verificar el consumo de fósforo por parte de los microorganismos. De igual forma, se caracterizó el afluente y efluente de la planta de tratamiento, como se mencionó anteriormente, para verificar la remoción actual de fósforo en la PTER.

En segundo lugar, se contempla probar agentes químicos, como las sales metálicas de hierro y aluminio, para evaluar su efectividad en la precipitación de este compuesto. Para seleccionar estos aditivos químicos, se tomaron en cuenta los recomendados por la bibliografía; además, se consideró la disponibilidad del aditivo y la oferta por parte de los suplidores. Sin embargo, desde un principio se descartó la cal por producir un exceso de lodo, como lo indica la bibliografía.<sup>[9]</sup> Por lo tanto, las evaluaciones se realizaron con Cloruro Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), Policloruro de Aluminio ( $\text{AlCl}_3\text{-Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl-Al}(\text{OH})_3$ ) y Aluminato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ ).

Para probar los aditivos químicos antes mencionados, se llevaron a cabo pruebas de jarra, estas consisten en simular en unos vasos de precipitado o jarras el proceso de coagulación que se produce en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento. Las pruebas de jarras pueden utilizarse tanto para controlar la coagulación-floculación de una planta de tratamiento existente como para obtener los datos de diseño para el proyecto de nuevas unidades.<sup>[12]</sup> Estas pruebas permitieron determinar el coagulante adecuado y la dosis óptima del mismo, para ello se evaluaron cualitativamente la cantidad de lodo producido y sedimentado, la turbiedad y cuantitativamente el pH y el porcentaje de remoción de fósforo.

Las pruebas de jarras se realizaron siguiendo el siguiente procedimiento:

Cada una de las jarras poseía 1.000 ml de agua residual, a esta muestra se le determinó la concentración de fósforo inicial. Dichas jarras se colocaron debajo de los agitadores a 120 rpm, luego se le inyectó el coagulante con una pipeta, la mezcla rápida originada por esta velocidad se dejó por 5 min., posteriormente ésta se disminuyó a 30 rpm por 5 min., se suspendió la agitación y se dejó sedimentar por un período de 15 min. Finalmente, se filtró el agua clarificada y se le determinó la concentración de fósforo que aún estaba presente. El porcentaje de remoción de fósforo se obtuvo a partir de la concentración inicial y final del mismo. Es importante acotar que las pruebas de jarras iniciales para cada compuesto se realizaron con la dosis recomendada por los suplidores de los mismos.

#### **IV.5.2.- Evaluación de Alternativas de Tratamientos Convencionales para Disminuir Cloruros:**

Como ya se ha mencionado en secciones anteriores, los cloruros no son removidos por tratamientos convencionales de aguas residuales, por lo que no se realizaron evaluaciones en la PTER de este compuesto.

Sin embargo, se buscaron y analizaron soluciones aguas arriba de la planta para minimizar la generación de cloruros. De esta actividad, surgió la necesidad de realizar una auditoría o evaluación integral del proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico de la sección de ablandamiento, ya que esta es una de las secciones donde se tiene una descarga considerable de cloruros. Esta evaluación se realizó para establecer y optimizar la cantidad de cloruro de sodio utilizada y la eficiencia de intercambio del sodio con la resina, es decir, realizar la curva de elución de la salmuera (% másico de NaCl vs. tiempo) y a partir de esta establecer las anomalías del proceso de regeneración. La curva de elución de la salmuera, es una representación gráfica que permite apreciar el comportamiento del intercambio iónico

## ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

entre la resina y el cloruro de sodio; por lo tanto, existen distintas posibilidades en cuanto a la forma de esta curva, dependiendo del problema que presente el proceso de regeneración. Para obtener dicha curva, se va midiendo cada 2 min. la concentración de sal a la salida del suavizador, mediante un densímetro que reporta los grados salométricos de la solución que eluye del mismo. Los grados salométricos representan la cantidad de sal presente en una muestra.

Además, se analizó la posibilidad de cambiar de regenerante partiendo de los recomendados por la bibliografía <sup>[21]</sup>, los cuales son cloruro de sodio (NaCl) al 25% en masa y ácido clorhídrico (HCl) al 6% en volumen, para generar menos cloruros de los generados por el regenerante actual (cloruro de sodio). La eficiencia del ácido clorhídrico con respecto a la del cloruro de sodio como regenerante fue medida por el volumen de agua suavizada y la concentración de los cloruros generados, variando la concentración de regenerante en cada caso. Es importante mencionar que esta eficiencia fue medida para suavizar la misma agua que presenta 310 ppm de dureza, aproximadamente. Sin embargo, se presume que al regenerar la resina con ácido clorhídrico, el pH del agua suavizada debe adecuarse para los distintos fines en el proceso de manufactura; para evitar que esto suceda, se evaluaron concentraciones más bajas de ácido clorhídrico para ver si el pH del agua suavizada es cercano a 7.

El ensayo se realizó de la siguiente manera, primero se tomó una muestra de resina de los suavizadores ya saturada de dureza, luego esta se lavó varias veces en el frasco que la contenía con agua dura, seguidamente se llenó hasta 31 ml una bureta de 50 ml, con la muestra de la resina. Luego, se preparó una solución de ácido clorhídrico al 6% y al 3% en volumen y se procedió a hacer pasar 100 ml por la bureta que contiene la resina para regenerarla.

**IV.6.- EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA REMOVER FÓSFORO Y CLORUROS:**

Una vez evaluadas las alternativas convencionales, se procedió a identificar a través de revisión de información técnica y contactos con suplidores, las opciones tecnológicas (tratamientos avanzados) existentes para remover fósforo y cloruros de las aguas residuales, incluyendo por supuesto el tratamiento utilizado en la actualidad en la PTER, como alternativa de referencia.

La preselección de las tecnologías se realizó con base en los siguientes criterios: eficiencia en la remoción de fósforo y cloruros, experiencia previa de aplicaciones y aceptación a nivel industrial, complejidad de la tecnología, disponibilidad de suplidores, servicios técnicos, mantenimiento, seguridad y evidentemente economía. Por otra parte, cada criterio fijado se evaluó cuantitativamente bajo la siguiente escala: 100% si era excelente, 75% si era bueno, 50% si era regular y 25% si era deficiente. En la tabla 5 se presenta el porcentaje ponderado de cada criterio y posteriormente son explicados con mayor detalle:

**Tabla 5. Matriz de selección de tecnologías.**

<i>Parámetros</i>	<i>Porcentaje asignado (%)</i>
Eficiencia	20
Experiencia	20
Complejidad	10
Mantenimiento	20
Seguridad	10
Economía	20
<i>Total</i>	<i>100</i>

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

- ⊕ Eficiencia: En este caso se analizó la calidad del efluente obtenido en cuanto a contenido de fósforo y cloruros.
  
- ⊕ Experiencia: En este aspecto se revisaron los antecedentes de cada tecnología, en términos de que tan aceptada es ésta en el campo industrial actual. Esto también incluyó una revisión de la disponibilidad de suplidores de dichas tecnologías.
  
- ⊕ Complejidad: Se revisaron las características de los pre-tratamientos exigidos, la cantidad de equipos adicionales necesarios, el grado de conocimiento técnico requerido por el personal para el correcto funcionamiento del sistema, el espacio físico requerido por la alternativa y su disponibilidad dentro de la planta.
  
- ⊕ Mantenimiento: Son todos aquellos elementos considerados para garantizar el correcto funcionamiento del sistema una vez que se encuentre en operación, esto incluye las paradas de planta y la vida útil de los equipos.
  
- ⊕ Seguridad: Este aspecto incluyó las medidas de seguridad industrial que deben ser tomadas en cuenta en pro de la integridad del personal que maneje el sistema.
  
- ⊕ Economía: Sin entrar en un estudio económico exhaustivo, se compararon los gastos relacionados en servicios para mantener en correcto funcionamiento los equipos asociados, es decir, energía eléctrica, mano de obra, compuestos químicos adicionales y otros.

Una vez determinada las mejores alternativas desde el punto de vista técnico, se procedió a su evaluación desde el punto de vista ambiental, para ello se consideró el efecto de los residuos generados por cada tecnología, representados por los

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

rechazos de cada una de ellas. En este sentido, se evaluó el estado físico de cada uno de los residuos, la mejor disposición final y el impacto ambiental que tendrían los mismos. Con esto se buscó garantizar que efectivamente se están minimizando los niveles de fósforo y cloruros en el efluente de la PTER, sin la generación de problemas adicionales.

#### **IV.7.- EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS:**

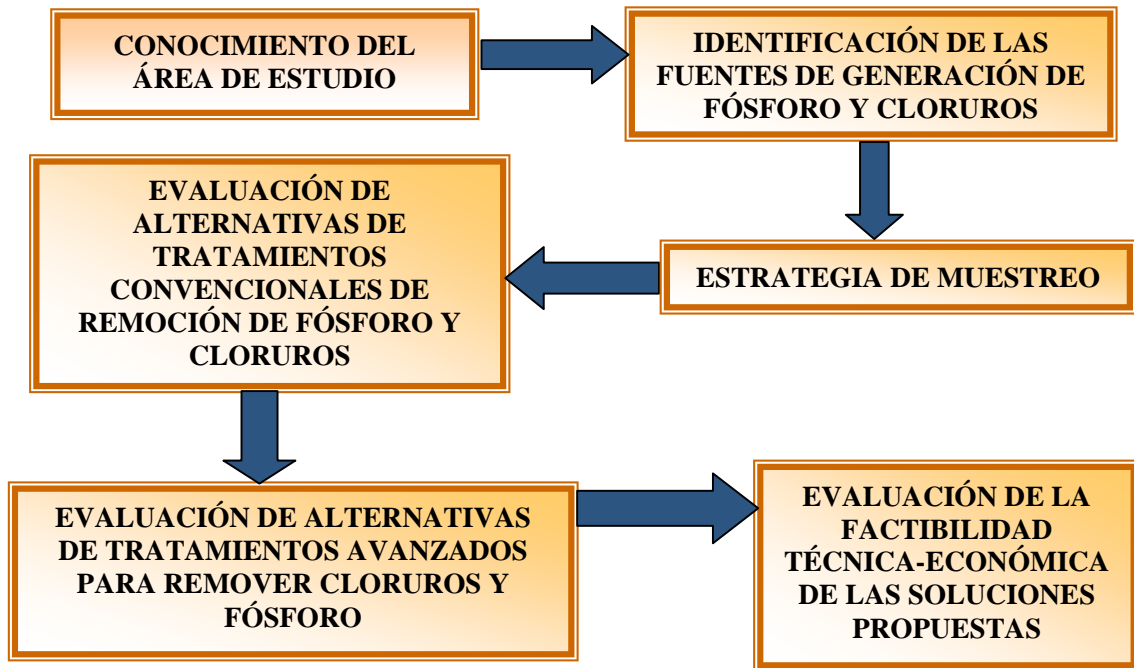
Finalmente, se realizó una evaluación técnico-económica de las opciones que resulten seleccionadas en cada caso, según la evaluación técnica y ambiental, para establecer su factibilidad. Para ello, se construyó en la Tabla 6 un baremo con los siguientes aspectos:

**Tabla 6. Baremo utilizado para la evaluación económica.**

Aditivo	Costo del aditivo (Bs./Kg.)	Dosis del aditivo (l/s)	Costo mensual (Bs./mes)	Porcentaje de Remoción (%)	Disponibilidad del aditivo (%)
Cloruro Férrico	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	CM <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>
Aluminato de Sodio	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	CM <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
Policloruro de Aluminio	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	CM <sub>1</sub>	P <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>



La Figura 20 que se presenta a continuación, describe por medio de un Flujograma la secuencia metodológica antes descrita.



**Figura 20. Flujograma de la Metodología.**

## **CAPÍTULO V**

### **PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

En este capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos en el marco de los objetivos trazados y a partir del plan de actividades descrito en el capítulo de Metodología del presente Trabajo Especial de Grado.

#### **V.1.- IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS:**

Después de la inducción en planta, se inició el proceso de reconocimiento de las áreas de generación de fósforo y cloruros, que son descritas a continuación en detalle.

##### **V.1.1.-Procesos Involucrados en la Generación de Fósforo:**

En lo concerniente a este aspecto se identificaron básicamente tres zonas que brindan un aporte significativo de fósforo en los afluentes a la Planta de Tratamiento de Efluentes Residuales (PTER), la zona de producción, específicamente en Planta de Almidones Modificados (Planta 1), la Planta de Molienda Húmeda (Planta 2) y el Área de Calderas.

En la manufactura de almidones especiales o modificados, se utiliza como materia prima el trimetafosfato de sodio, el cual es un compuesto polifuncional que reacciona con el almidón para producir almidones modificados entrecruzados. El cambio más notable en el entrecruzamiento es el incremento de la estabilidad del grano hinchado del almidón, esto hace que presente cierta estabilidad cuando se le somete a altas temperaturas, bajo pH y agitación mecánica. <sup>[21]</sup>

## ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

Los almidones modificados fosfatados una vez fabricados se someten a un lavado con agua, para eliminar trazas del compuesto fosfatado que no haya reaccionado y de otros residuos como cenizas, entre otros; dicho lavado genera un desecho líquido que contiene fosfato, el cual es enviado a la PTER a través de un drenaje. La cantidad de trimetafosfato de sodio que se utiliza por batch para modificar los almidones es de 2,5-6 Kg./ ton. de almidón regular en base seca, dependiendo del producto, lo que a diario en promedio aporta 0,3 Kg/día de fósforo en el desecho o afluente líquido que va a la PTER.

Por otra parte, es importante mencionar que los almidones modificados fosfatados se elaboran según el programa de producción, por lo que el envío de agua residual concentrada en fósforo no es constante. Sin embargo, los productos fosfatados que se manufacturan en la Planta 1 son seis y comúnmente se fabrican cinco batches semanalmente, lo que implica 12 ton. de producto.

En Planta 2, el aporte de fósforo observado se debe a que el grano de maíz presenta en su composición cierto contenido de este compuesto, lo cual se explicará con detalle en páginas posteriores, este aporte se refleja en 0,029 Kg./día de fósforo que va a la PTER. Asimismo, se apreció que el agua desechada por las purgas de las calderas contiene fósforo debido a que en este sistema de generación de vapor se utiliza un producto químico que posee fosfatos y que funciona como un anti-incrustante de dureza, aportando 0,0002 Kg./día de fósforo a la planta de tratamiento.

### **V.1.2.- Procesos Involucrados en la Generación de Cloruros:**

Al realizar el recorrido por todas las secciones de la corporación, se observaron dos zonas que presentan una contribución considerable de cloruros hacia la PTER. Estas secciones son la Planta 1 y la Planta de Ablandamiento de Agua (Planta de Agua). A continuación se explican los procesos que resultan directamente involucrados.

**Planta 1:** En el proceso de elaboración de almidones modificados se utiliza cloruro de sodio como materia prima, específicamente para los productos fosfatados. El cloruro de sodio protege al grano de almidón del impacto químico que ejercen otros reactivos que se utilizan en la modificación de los almidones, como por ejemplo: hidróxido de sodio <sup>[21]</sup>. La cantidad de cloruro de sodio utilizada por batch es 4 Kg./ ton. de almidón regular, en base seca. Los productos que se elaboran con este compuesto son seis y su frecuencia de fabricación depende del programa de producción.

Otra zona del proceso de producción de almidones modificados que genera cloruros es la neutralización de las reacciones que están involucradas en dicho proceso, ya que esta se realiza con ácido clorhídrico, aunado a esto, este compuesto se utiliza como materia prima al igual que el hidróxido de sodio, en algunos casos. Por otra parte, para ajustar el pH de las suspensiones de almidones se emplea los compuestos nombrados anteriormente, lo que origina cloruros que se incorporan al agua en el lavado de los almidones. Adicionalmente, otra de la materia prima utilizada es el carbonato de sodio que reacciona con el ácido clorhídrico para producir cloruros.

Las cantidades de hidróxido de sodio y ácido clorhídrico que se emplean como materia prima por batch son de 5 Kg. y de 6-30 Kg./ ton. de almidón regular en base seca, respectivamente. La cantidad de productos y la frecuencia con que se elaboran es la misma que la de parte anterior. Por lo tanto, el aporte brindado de cloruros en el efluente de la Planta de Almidones Modificados es de 213 Kg./día hacia la PTER.

**Planta de Agua:** En la regeneración de la resina de intercambio iónico, como ya se ha mencionado en el capítulo II, se utiliza una solución de salmuera concentrada, la cual intercambia sus iones cloruros con los iones de calcio y magnesio que están adheridos a la resina, dejando la misma con los iones sodio.

## ***Presentación y Discusión de los Resultados***

Debido a este proceso, se forman cloruros de calcio y magnesio que se descargan a un drenaje que va a la PTER, aunado a esto, el exceso de sal que se utiliza en la preparación de la salmuera, también se dirige a la planta de tratamiento, en conjunto estas representan a diario 1200 Kg./día de cloruros que se dirigen a dicha planta.

En esta fase también se examinó la data histórica referente al contenido de estos compuestos en los afluentes y efluentes de la PTER, incluyendo los valores de materia orgánica, las cuales se resumen en la Tabla 7, donde se muestran los rangos de variación de concentración para distintos parámetros, tanto en el tanque de descargas generales (entrada) como en la unidad de cloración justo en el punto de descarga final (salida), comparando este último con los valores máximos exigidos por la normativa legal vigente para el efluente final.

**Tabla 7. Data histórica de concentración de algunos parámetros en la PTER.**

<i>Parámetro</i>	<i>Entrada</i>		<i>Salida</i>		
	<i>Mínima (mg/l)</i>	<i>Máxima (mg/l)</i>	<i>Mínima (mg/l)</i>	<i>Máxima (mg/l)</i>	<i>Exigida (mg/l)</i>
DQO	1.500	40.000	27	55	350
Fósforo	0,33	14	0,19	3,3	1
Cloruros	50	10.000	162	1.682	1.000

### **V.2. ESTRATEGIA DE MUESTREO:**

Al realizar la evaluación de cada uno de los puntos de muestreo, se apreció que no es posible caracterizar el efluente de la planta manufacturera de productos de consumo masivo y directo (tercera empresa filial), ya que no existen alcantarillas ni drenajes de fácil acceso. De manera similar ocurrió con el efluente de la planta de procesamiento de trigo (segunda empresa filial), porque el proceso que se lleva a cabo en esta planta es en seco al igual que su higienización. Sin embargo, al realizar el recorrido por las instalaciones de la planta mencionada en primer lugar, se pudo

## ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

verificar que se utilizan compuestos fosfatados en sus formulaciones, además de ello utilizan maíz desgerminado que contiene fósforo como sustancia mineral; los residuos de estos compuestos se eliminan a través del proceso de limpieza y se dirigen a la PTER. Por otro lado, no se observaron fuentes de generación de cloruros. Este hecho ejerce un impacto significativo sobre los fines del presente trabajo ya que no se logró cuantificar la concentración de fósforo y cloruros, ni el volumen total descargado por esta filial, por lo tanto, el aporte másico de esta corriente con respecto a dichos compuestos fue estimado a través del balance de masa.

Con respecto a la primera empresa filial sólo pudieron caracterizarse los efluentes de Planta 1, Planta 2, el Área de las Calderas y Planta de Agua, ya que los efluentes de Planta Refinería de Glucosa y Color Caramelo no poseen alcantarillas de fácil acceso. Aunque, en el recorrido por estas últimas plantas no se identificaron fuentes generadoras de fósforo ni cloruros, es decir, que el incidente de no poder muestrear estos efluentes no es significativo para los fines de este proyecto.

### **V.3.-APORTES MÁSICOS DE FÓSFORO Y CLORUROS A LA PTER:**

Se presentan a continuación los resultados obtenidos una vez ejecutado el trabajo de recolección de muestras, con el fin de determinar las concentraciones y caudales que permitieron realizar el balance de materiales a lo largo de la planta.

#### **V.3.1.-Determinación de la Concentración de Fósforo y Cloruros de las Corrientes Afluentes a PTER:**

En primer lugar, se cuantificaron las concentraciones de fósforo y cloruros en las zonas de descarga directa de cada una de las plantas que conforman la corporación. A modo de realizar un análisis comparativo de las zonas productivas involucradas (Planta 1 y Planta 2).

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

La caracterización del efluente de Planta 1, se realizó para cada uno de los grupos de productos que dicha planta elabora, a saber: Oxidados, Fosfatados, Fosfatado-Acetilado, Baja Humedad, Hidrolizado, Almidón Modificado Waxy.

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la caracterización del efluente de Planta 1 para cada uno de los productos de los grupos mencionados anteriormente y la cuantificación del volumen total de descarga.

**Tabla 8. Concentraciones de Fósforo y Cloruros en la descarga de Planta 1.**

<b>Grupo</b>	<b>Producto</b>	<b>Concentración de Fósforo, Cf (mg/l)</b>	<b>Concentración de Cloruros, Ccl (mg/l)</b>	<b>Volumen Total de Descarga. Vt (l/día)</b>
Oxidados	A <sub>1</sub>	0	30.000	40.000
Fosfatados	A <sub>2</sub>	6,6	1.620	45.160
	B <sub>2</sub>	3,3	2.360	44.984
Fosfatados-Acetilados	A <sub>3</sub>	0,99	2.280	50.000
	B <sub>3</sub>	0,66	4.720	47.600
	C <sub>3</sub>	6,6	3.320	39.530
	D <sub>3</sub>	3	2.200	42.000
Baja Humedad	A <sub>4</sub>	0,66	1.440	12.500
Hidrolizado	A <sub>5</sub>	0,33	1.860	38.900
Almidón Modificado Waxy	A <sub>6</sub>	0,66	3.280	41.320

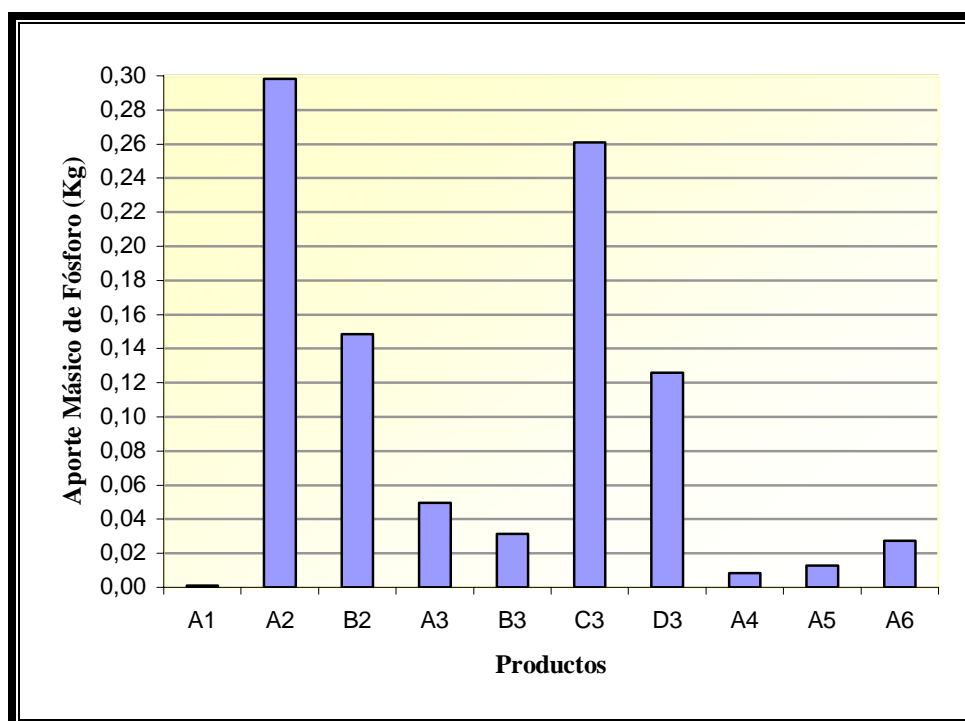
En los resultados de la Tabla 8 se observa que las mayores concentraciones de fósforo la presentan los almidones modificados fosfatados y fosfatados-acetilados, debido a que en su reacción de modificación se utiliza trimetafosfato de sodio en exceso para acelerar dicha reacción y garantizar que se fosfate todo el almidón, este exceso se incorpora al agua en el proceso de lavado de dichos productos, siendo esta última drenada a la PTER. Por otro lado, se observa que los productos oxidados no presentan fósforo ya que en su fabricación no se utiliza ninguna materia prima, ni ningún insumo que contenga fósforo.

En cuanto a la concentración de cloruros, se visualiza que el mayor aporte está representado por el Almidón Modificado Oxidado A<sub>1</sub>, el cual presenta la mayor

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

concentración de cloruros, de manera significativa en comparación con los otros productos. Esto se debe a que en la elaboración del mismo se utiliza como materia prima hipoclorito de sodio ( $\text{HOCl}_3$ ) y una base que dan origen a los cloruros, los cuales son arrastrados por el agua de lavado de los almidones modificados. A su vez, en la Tabla 8 se observa que el producto que menor contribución de cloruros presenta es el almidón modificado de baja humedad.

Con los resultados de las concentraciones de los compuestos en estudio y el volumen total descargado, se obtiene el aporte másico de los mismos a la PTER. La Figura 21 presenta el aporte másico de fósforo de cada producto manufacturado en Planta 1. En dicha figura se puede observar que el mayor aporte másico de fósforo lo constituye la elaboración del almidón modificado fosfatado  $A_2$ , pues es uno de los productos que presenta la mayor concentración de fósforo al igual que el  $C_3$ , pero el primero presenta mayor volumen de descarga lo que se deduce en un mayor aporte másico de este compuesto.

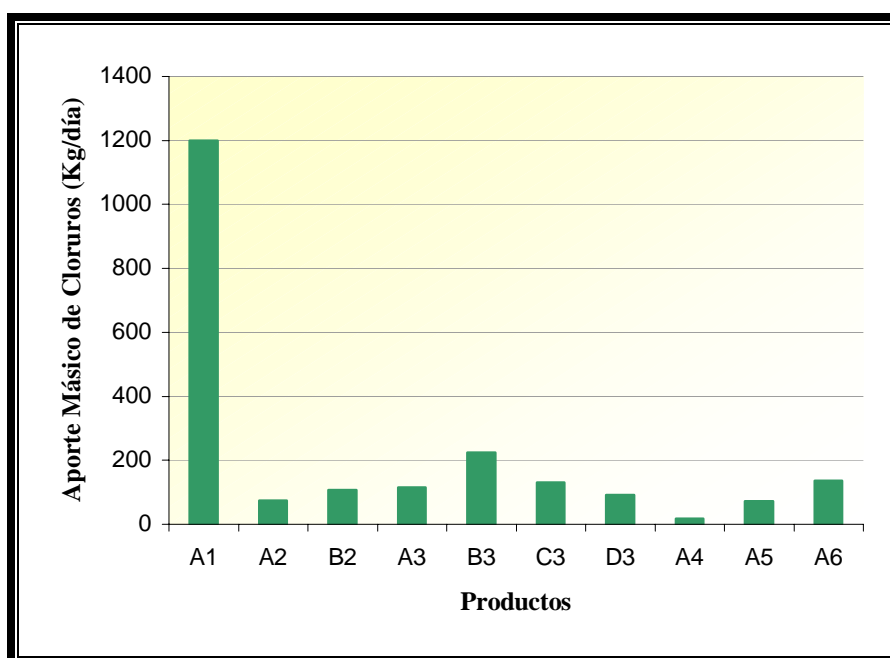


**Figura 21. Masa de Fósforo aportada por la elaboración de almidones modificados.**



### *Presentación y Discusión de los Resultados*

De manera similar, la Figura 22 muestra los aportes másicos de cloruros en el agua residual de Planta 1 para cada uno de los productos que allí se fabrican. Al apreciar esta figura, se observa que el producto oxidado A<sub>1</sub>, es el que mayor aporte másico ofrece en cuanto a cloruros, pues posee la mayor concentración de este compuesto aunque no el mayor caudal de descarga.



**Figura 22. Masa de Cloruros aportada por la elaboración de almidones modificados.**

Por otra parte se caracterizó el efluente de la Planta de Molienda Húmeda del Maíz (Planta 2), para verificar la contribución de dicha corriente en cuanto a concentración de fósforo y cloruros. Esta planta desecha agua proveniente de un vapor que posteriormente condensa; este vapor es utilizado en las tinajas de maceración. Además, en ocasiones se desecha agua proveniente del secado del almidón porque no poseen un buen sistema de concentración, es decir, el agua que proviene de la centrifuga (agua con almidón) se envía a un tanque pero este cuando agota su capacidad se rebosa, lo que implica un exceso de agua en el sistema por lo que es necesario drenarlo. En la Tabla 9 se exhiben los resultados obtenidos de la

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

caracterización realizada al efluente de Planta 2. Allí se logra observar que la mayor concentración de fósforo la presenta el agua proveniente del secado del almidón regular de maíz, ya que el grano de maíz posee una cantidad significativa de fósforo en su composición (3,10 mg/100 g) <sup>[22]</sup>, este se puede solubilizar en el proceso de maceración lo que indica que luego pasa a los afluentes que se dirigen a la planta de tratamiento. Por otra parte, la mayor concentración de cloruros también la posee el agua residual procedente del secado, aunque la diferencia entre esta y la concentración del agua procedente del condensado es de un 10%.

**Tabla 9. Caracterización del efluente de Planta 2.**

<b><i>Agua Residual</i></b>	<b><i>Conc. de Fósforo, Cf (mg/l)</i></b>	<b><i>Conc. de Cloruros, Ccl (mg/l)</i></b>	<b><i>Volumen Total de Descarga (l/día)</i></b>
<b>Agua de Condensado</b>	0	320	43.200
<b>Agua del secado del Almidón Regular de Maíz</b>	1,32	360	21.600

En la Figura 23 se presenta el aporte másico de fósforo que ofrecen las corrientes efluentes de Planta 2 a la PTER. En esta se visualiza que el mayor aporte másico de fósforo lo brinda el agua proveniente del secado del almidón regular de maíz ya que posee la mayor concentración aunque no el mayor caudal de descarga. El agua de condensado no aporta fósforo ya que es agua de servicio que no se mezcla con el maíz.

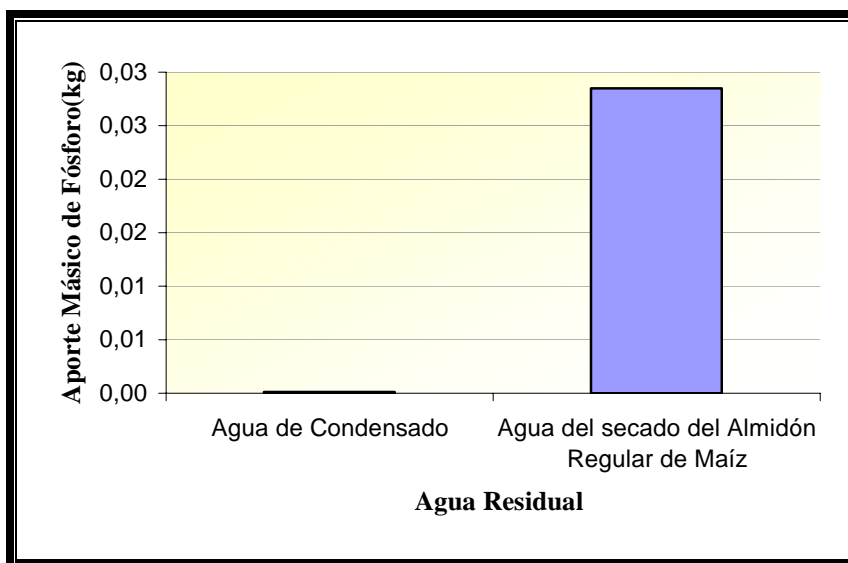


Figura 23. Masa de Fósforo aportada por los efluentes de Planta 2.

En el mismo orden de ideas, la Figura 24 muestra los aportes másicos de cloruros del agua desechada en la Planta de Molienda Húmeda del Maíz. Se observa que la mayor cantidad en masa de cloruros la aporta el agua de condensado, ya que tiene el mayor volumen total de descarga. Sin embargo, esta cantidad que aporta el agua de condensado no es significativa con respecto al aporte másico de cloruros de los productos de Planta de Almidones Modificados (213 Kg./día vs. 1.200 Kg./día). Lo antes expuesto se evidencia con claridad en la Tabla 10.

De los resultados obtenidos hasta ahora se puede afirmar que la corriente del proceso productivo que más contribuye es la procedente de Planta 1 cuando se lava el Almidón Modificado Fosfatado A<sub>2</sub>, en cuanto a aporte másico de fósforo y la que menos contribuye es la del agua de condensado proveniente de Planta 2, que permite diluir el resto de las corrientes concentradas una vez que llegan al Tanque de Descargas Generales de PTER.

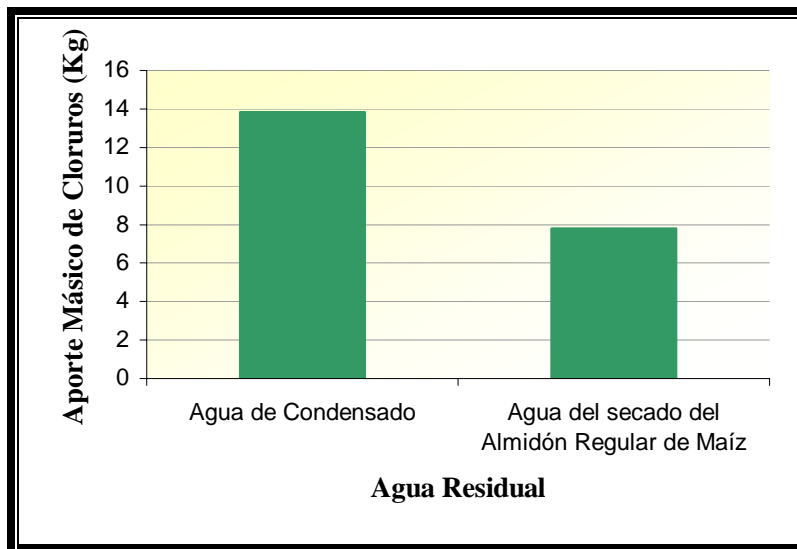


Figura 24. Masa de Cloruros aportada por los efluentes de Planta 2.

Tabla 10. Resumen de los aportes en las descargas directas del proceso productivo (corrientes críticas).

Proceso Productivo	Agua Residual	Concentración de Fósforo, Cf (mg/l)	Concentración de Cloruros, Ccl (mg/l)	Volumen Total de Descarga, Vt (l/día)	Aporte Másico de Fósforo, Mf (Kg./día)	Aporte Másico de Cloruros, Mcl (Kg./día)
Planta 1	Almidones Modificados Oxidados	0	30.000	40.000	0	1.200
	Almidón Modificado Fosfatado A <sub>2</sub>	6,6	1.620	45.160	0,30	73,16
Planta 2	Agua de Condensado	0	320	43.200	0	13,82
	Agua de Secado del Almidón Regular de Maíz	1,32	360	21.600	0,028	7,78

De igual manera se puede afirmar que la corriente con mayor aporte másico de cloruros es la originada del lavado del Almidón Modificado Oxidado A<sub>1</sub>, debido a

## ***Presentación y Discusión de los Resultados***

la gran concentración que esta presenta. Por el contrario, la corriente que menos aporta es la del agua de condensado procedente de Planta 2, que es aprovechada para diluir el resto de las corrientes en PTER como se señaló en el párrafo anterior.

Asimismo, se realizó la caracterización del efluente del Área de las Calderas para verificar en que proporción ofrece su contribución de fósforo y cloruros a la PTER. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11.

**Tabla11. Caracterización del agua residual de la purga de las Calderas.**

<i>Concentración de Fósforo, Cf (mg/l)</i>	<i>Concentración de Cloruros, Ccl (mg/l)</i>	<i>Volumen Total Descargado, Vt (l/día)</i>	<i>Aporte Másico de Fósforo, Mf (Kg/día)</i>	<i>Aporte Másico de Cloruros, Mcl (Kg/día)</i>
3,8	140	60	0,0002	0,0084

En la tabla anterior se logra apreciar que es poca la contribución en masa que ofrece la zona de las calderas hacia la planta de tratamiento, en lo referido a fósforo y cloruros. Esto es consecuencia del pequeño volumen que se desecha, pues su aporte resulta insignificante con respecto al área de producción.

Otra de las zonas identificadas como generadora de cloruros, es la Planta de Ablandamiento de Agua (Planta de Agua), por lo que fue necesario cuantificar los cloruros que son enviados a la PTER, mediante el estudio de elución de los mismos durante el proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico. Los resultados del estudio se presentan en la Figura 25.

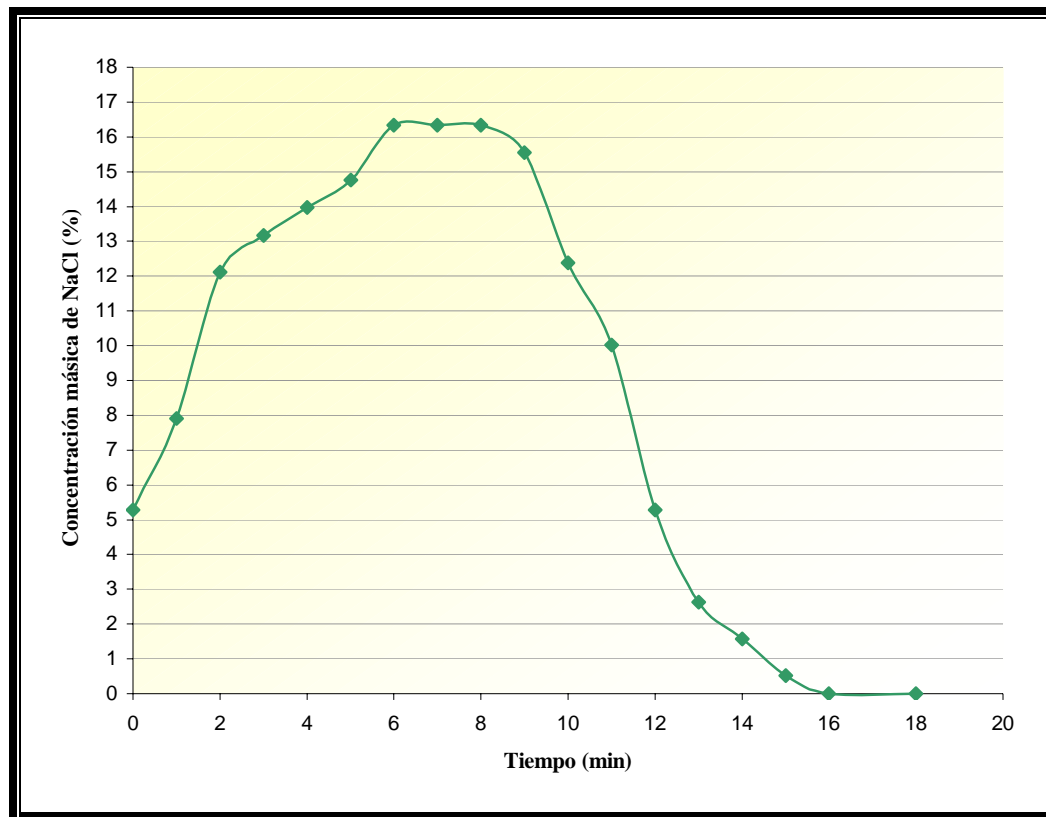


Figura 25. Estudio de elución de Cloruros durante el proceso de regeneración.

En esta figura se observa que el comportamiento de la curva de elución en principio es ascendente, lo que indica que se están intercambiando los iones calcio y magnesio con los iones cloruros de la salmuera, hasta que llega a un punto de máxima concentración (16,34% en masa) correspondiente al momento de mayor capacidad de intercambio durante todo el proceso, y posteriormente comienza un proceso de disminución como consecuencia del intercambio, ya que los iones calcio y magnesio van siendo desplazados por los iones sodio de la salmuera alimentada. La forma esperada de esta curva debe ser comenzando desde cero, esta acotación se explicará en secciones posteriores con más detalle.

En lo referido al aporte másico, se obtuvo que la cantidad total de cloruros que son enviados a la planta de tratamiento es 1.197,24 Kg/regeneración y por lo general se realiza una regeneración diaria, es decir, 1.197,24 Kg/día con un caudal

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

aproximado de 318 l/min. (34.980 l/día). No se pudo determinar la cantidad total de magnesio y calcio generados durante el proceso ya que no hay disponibilidad de materiales ni de reactivos para determinar las concentraciones de estos compuestos en la corporación. Por ello se ha considerado que los cloruros generados están presentes en forma de ión cloruro, esta simplificación no permite conocer la masa de cloruros de calcio y magnesio que se forman, pues al conocer estas cantidades se puede conocer la masa de cloruro de sodio que sale del suavizador sin ser aprovechada por la resina. En el Apéndice B se muestran los cálculos realizados para esta sección de la empresa.

Posteriormente, se realizó un estudio del comportamiento de las cuatro corrientes afluentes que convergen finalmente en la PTER, para determinar cuál o cuáles de ellas aportan el mayor contenido de fósforo y cloruros. El primer factor caracterizado fue la concentración de estos compuestos, luego el volumen total de descarga y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla 12. Resumen de los aportes que ofrecen las corrientes afluentes a PTER.**

<i>Agua Residual</i>	<i>Concentración de Fósforo, Cf (mg/l)</i>	<i>Concentración de Cloruros, Ccl (mg/l)</i>	<i>Volumen Total de Descarga, Vt (l/día)</i>	<i>Aporte Másico de Fósforo, Mf (Kg./día)</i>	<i>Aporte Másico de Cloruros, Mcl (Kg./día)</i>
<b>Planta 1</b>	2,38 ± 0,15	5.308 ± 1.740	52.130 ± 12.350	0,124 ± 0,003	213,38 ± 53,22
<b>Planta 2</b>	0,660 ± 0,005	340 ± 47	32.400 ± 11.521	0,020 ± 0,001	11,02 ± 2,38
<b>Purga de Calderas</b>	0,38	140	60	0,0002	0,0084
<b>Planta de Agua</b>	0	34.226,42	34.980	0	1.197,24

De los resultados mostrados en la Tabla 12, se aprecia que la corriente proveniente de Planta de Almidones Modificados posee la mayor concentración de fósforo, el mayor volumen de descarga y por ende es la corriente que más aporta masa de fósforo a la PTER. Este resultado se corresponde con lo esperado, ya que

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

esta corriente contiene el agua del lavado de los almidones modificados que en su composición presentan compuestos fosfatados. Además, se observa que la corriente que menos aporta, tanto en concentración como en masa de fósforo, es la procedente del proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico en Planta de Agua, ya que dicha corriente no posee fósforo, lo cual es lo esperado, porque en esta planta no se utiliza ningún compuesto fosfatado.

Asimismo, en la Tabla 12 se visualiza que la corriente que se origina en Planta de Agua, es la que más aporta cloruros hacia la planta de tratamiento, mientras que, la corriente que menos aporta en este compuesto es la proveniente del Área de las Calderas.

Los resultados de este análisis permiten afirmar que las corrientes que merecen especial atención son: la corriente procedente de Planta de Agua por aportar una cantidad significativa de cloruros y la corriente proveniente de Planta 1 en cuanto a aporte másico de fósforo y cloruros. Con la primera corriente se puede estudiar la posibilidad de tratarla por separado para poder disminuir el contenido de cloruros en el efluente de la PTER.

#### **V.3.2.-Determinación de la Concentración de Fósforo y Cloruros en las Corrientes de PTER:**

A continuación se presenta la evaluación de los niveles de fósforo y cloruros en la planta de tratamiento, que se realizó mediante muestras compuestas. En primer lugar, se presentan los valores de concentración de fósforo y caudal obtenidos tanto en el afluente (Tanque de Descargas Generales); como en el efluente (salida de la Unidad de Cloración). Los resultados se muestran en la Figura 26.

En la gráfica se puede observar, en lo referido a concentraciones, que en la entrada los niveles de fósforo fluctúan considerablemente de un día a otro, es decir,



### Presentación y Discusión de los Resultados

están sujetos directamente a cualquier cambio operacional o de producción que pueda ocurrir dentro de la empresa, y no muestran una tendencia estable. En la salida no ocurre lo mismo, observándose una tendencia más uniforme, de modo que la planta permite amortiguar las fluctuaciones existentes.

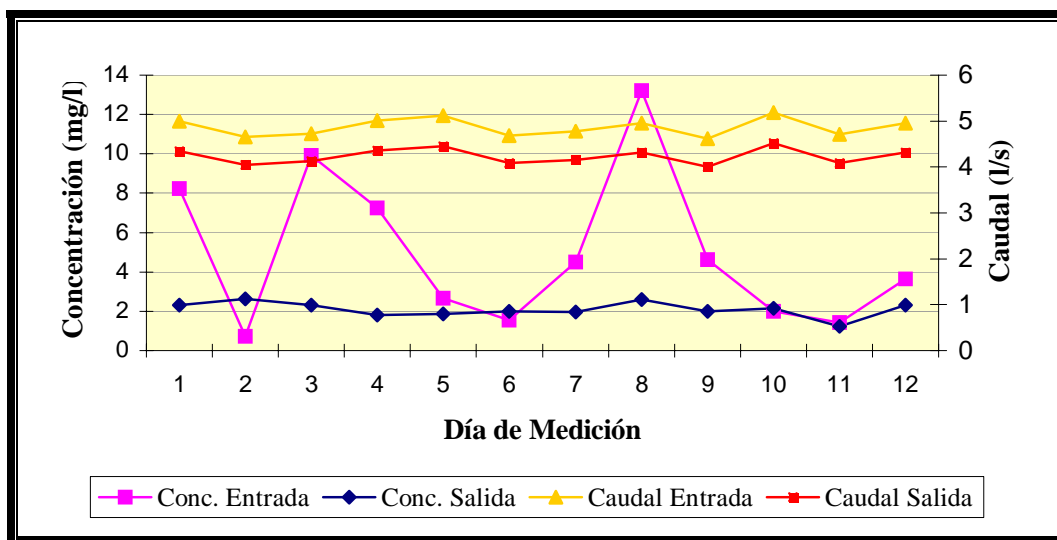


Figura 26. Concentración de Fósforo y caudal del afluente y efluente de la PTER.

En cuanto a caudales, se tiene que los valores obtenidos tanto para la entrada como para la salida presentan una tendencia similar, dentro de un rango de operación, y el caudal de entrada siempre es mayor que el caudal de salida, esto por efecto de la evaporación de agua que ocurre en el sistema aeróbico, además del proceso de extracción de lodos en los clarificadores, por lo cual los resultados se corresponden con lo esperado.

En primer lugar, con los parámetros obtenidos se pudo determinar la masa de fósforo presente tanto a la entrada como a la salida de la planta de tratamiento. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 27.

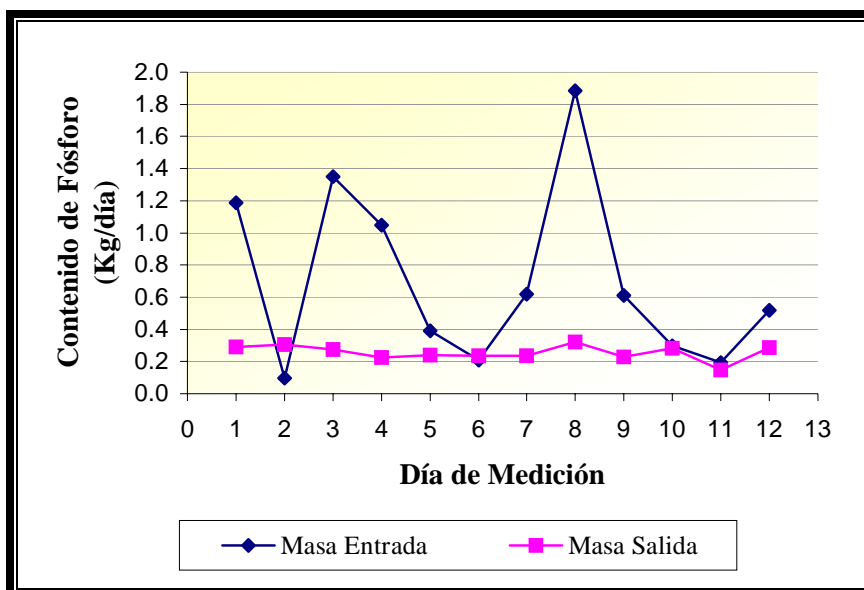


Figura 27. Masa de Fósforo en el afluente y efluente de la PTER.

De la gráfica anterior se observa, en primer lugar, que el flujo másico de fósforo a la entrada presenta un comportamiento inestable, según se observó igualmente para los valores de concentraciones discutidos anteriormente, por lo cual no existe una tendencia fija y los valores están sujetos a las variaciones operacionales de los procesos que se realizan en toda la empresa.

Por otra parte, a la salida de la Unidad de Cloración, se observa que los valores de los niveles de fósforo permanecen relativamente sin mayores cambios de concentración de un instante a otro y por ende de flujo másico. Esto es producto de la homogenización que se le da a la mezcla que entra al sistema, para ello se utiliza el Tanque de Descargas Generales, el Reactor Anaeróbico y los Lodos Activados (con el alto tiempo de residencia que éste presenta, 4 días aproximadamente) y los clarificadores.

En segundo lugar, se presentan los valores de concentración de cloruros y caudal obtenidos tanto en el afluente (Tanque de Descargas Generales); como en el

efluente (salida de la Unidad de Cloración). Los resultados se muestran en la Figura 28.

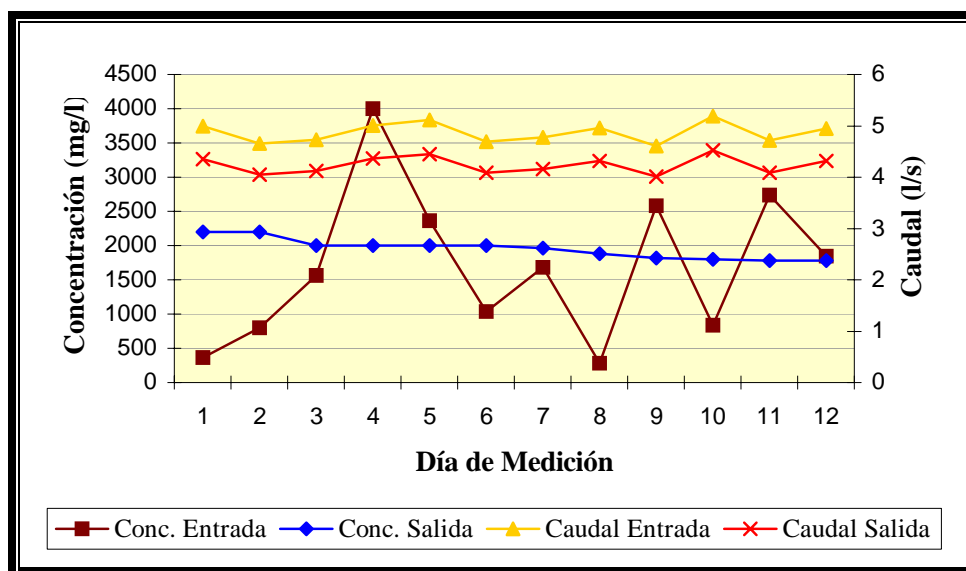


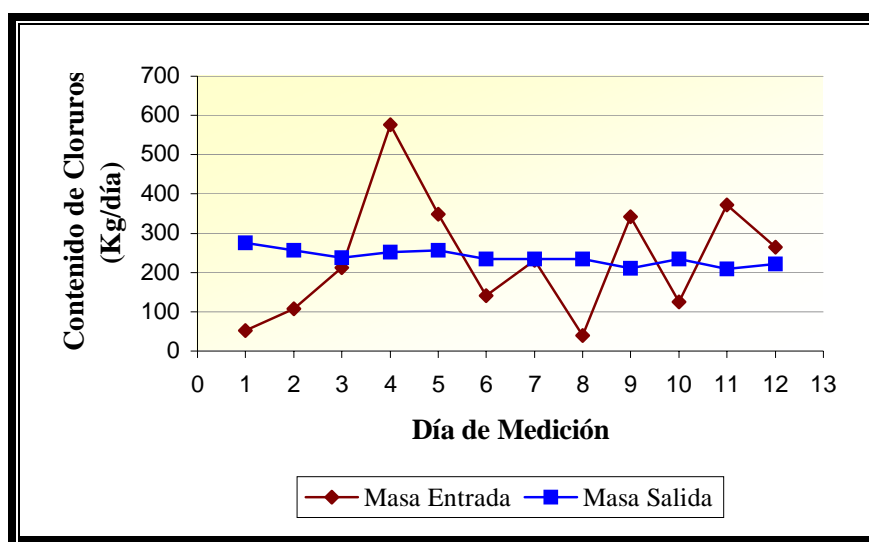
Figura 28. Concentración de Cloruros y caudal del afluente y efluente de la PTER.

En la figura anterior se puede visualizar que el comportamiento de la concentración de cloruros en la entrada es similar a la del fósforo, es decir, se observan cambios bruscos que dependen del programa de producción y de las variaciones operacionales de cada planta. Asimismo, la concentración de salida se aprecia estable, sin cambios bruscos de un instante a otro, y tomando en cuenta que la planta no brinda ningún tipo de tratamiento, su función en este particular consiste en homogeneizar la mezcla que entra al sistema, por el apreciable volumen de agua que manejan sus unidades.

En cuanto a caudales del afluente y efluente, se aprecia que los valores obtenidos tanto para la entrada como para la salida presentan una tendencia similar, dentro de un rango de operación, y el caudal de entrada siempre es mayor que el caudal de salida, por la misma razón expuesta anteriormente, lo cual es lo esperado.

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

Con estos valores de concentración y caudal de entrada y salida, se pudo determinar el flujo másico de cloruros en la entrada y la salida de la PTER. La Figura 29 muestra los resultados obtenidos.



**Figura 29. Masa de Cloruros en el afluente y efluente de la PTER.**

El comportamiento del flujo másico de entrada, mostrado en la figura anterior, es variante, lo cual coincide con los cambios observados para los valores de concentración de cloruros en la entrada de la planta de tratamiento, justificado por los cambios operacionales y de producción. Por su parte, el flujo másico de cloruros en la salida es relativamente estable por la función de homogeneidad antes explicada por parte de la planta de tratamiento.

En la Tabla 13 se muestra un análisis comparativo de los niveles de fósforo y cloruros en la planta de tratamiento tanto en la entrada como a la salida de la misma. Esta tabla viene a esquematizar de forma puntual todo lo discutido anteriormente, ya que se observan las diferencias en los valores reportados tanto en concentración como en flujo para la entrada, mientras que también se aprecian las similitudes en la corriente de salida.

**Tabla 13. Resumen del balance de Fósforo y Cloruros para la PTER.**

<i>Parámetro</i>	<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>
<b>Concentración de Fósforo, Cf (mg/l)</b>	4,97 ± 3,89	2,10 ± 0,38
<b>Concentración de Cloruros, Ccl (mg/l)</b>	2.741,67 ± 2.067,54	1.951,67 ± 146,84
<b>Caudal, Q (l/s)</b>	4,87 ± 0,19	4,24 ± 0,17
<b>Flujo Másico de Fósforo, Ff (Kg./día)</b>	0,70 ± 0,55	0,26 ± 0,05
<b>Flujo Másico de Cloruros, Fcl (Kg./día)</b>	380,30 ± 278,92	238 ± 20

De todos los aportes determinados en esta sección, se elaboró finalmente el diagrama de bloques, representado en la Figura 30. En el mismo se observa que la masa total de fósforo y cloruros que entra a la PTER no coincide con la suma individual de las corrientes afluentes a dicha planta. Ello condujo a deducir que esta cantidad faltante (0,556 Kg./día) para el caso del fósforo, es la aportada por las zonas de la empresa que no pudieron caracterizarse debido a la falta de alcantarillas y drenajes de fácil acceso. Es decir, esta cantidad representa el aporte que realiza la planta manufacturera de productos de consumo masivo y directo, lo que implica una contribución significativa para este caso; aunque no constituye un inconveniente para los objetivos del proyecto porque la evaluación en la remoción de fósforo se lleva a cabo en la PTER. En cuanto a la masa de cloruros se observa que hay 1.041,35 Kg./día que no llegan a la PTER, es decir que existe la posibilidad de que haya un desvío de la corriente que proviene de Planta de Agua, aunque este hecho no pudo verificarse ya que generalmente el proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico se realiza en horas de la noche.

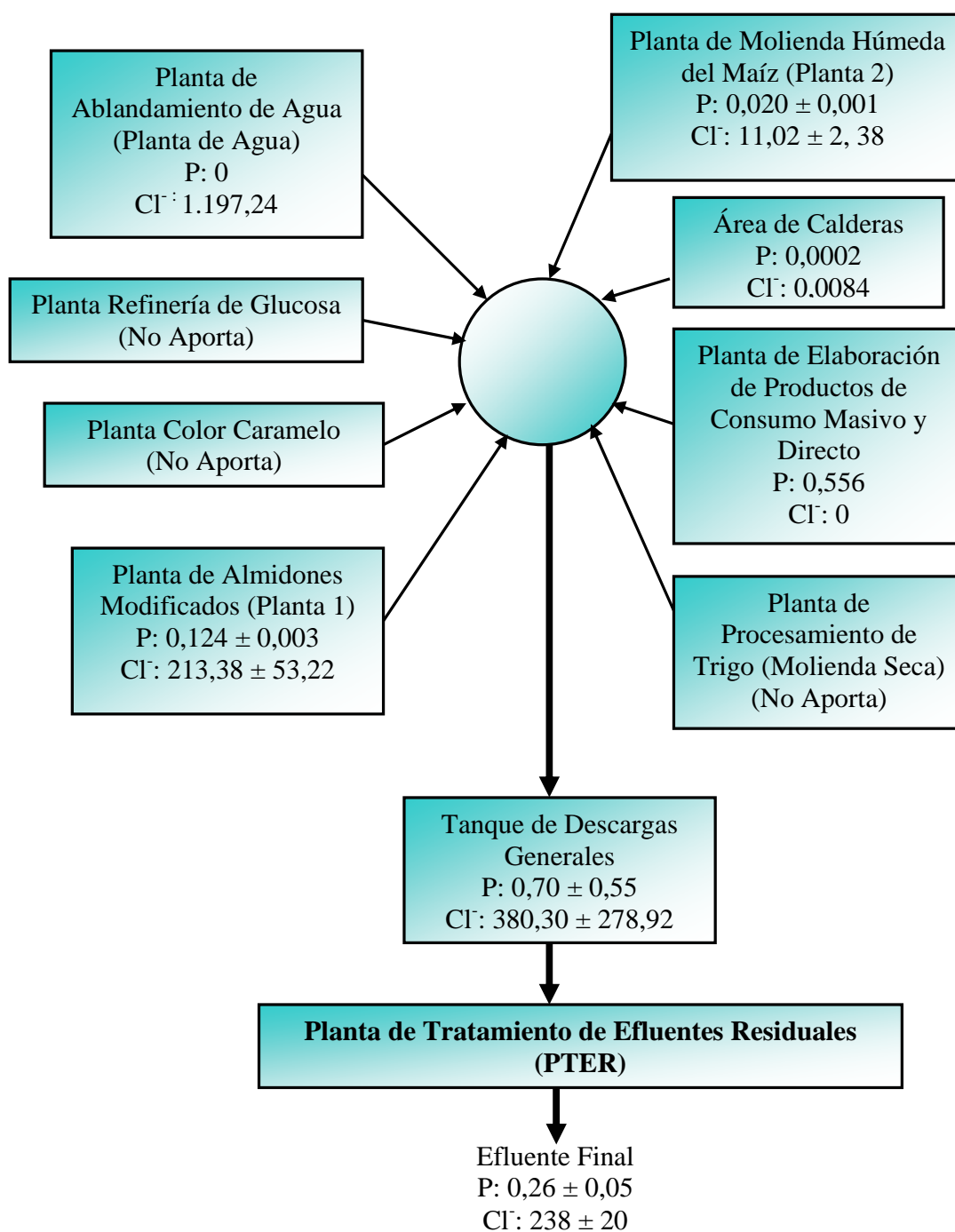


Figura 30. Contribución Másica de Fósforo y Cloruros (Kg. /día).

#### **V.4.-EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS:**

Una vez determinadas las corrientes con el mayor contenido de fósforo y cloruros, además de los distintos puntos de generación se establecieron las alternativas convencionales existentes para remover estos compuestos y se realizó una evaluación de cada una de ellas. A continuación se presentan los resultados de esta actividad.

##### **V.4.1.- Alternativas para Remover Fósforo:**

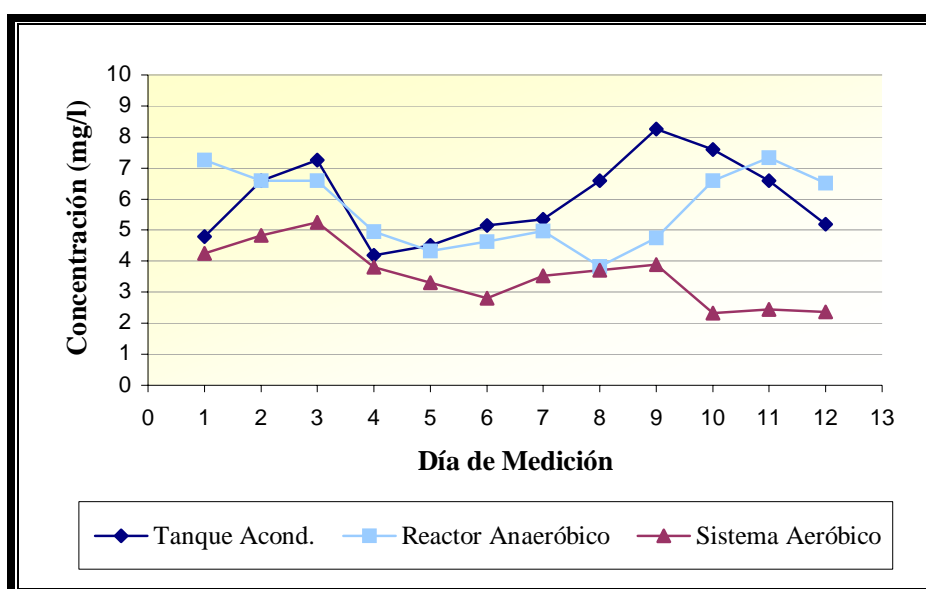
##### **V.4.1.1.- Evaluación de la Remoción de Fósforo por Parte del Sistema Biológico de la PTER:**

Para verificar la cantidad de fósforo que consumen los microorganismos aerobios y anaerobios de la planta de tratamiento, se realizó un muestreo en: la entrada al Reactor Anaeróbico (salida del Tanque Acondicionador), la salida del mismo (Tope del Reactor Anaeróbico), que corresponde con la entrada al sistema aeróbico y en la salida de este último sistema (Tercera Piscina Aeróbica). Los resultados obtenidos en esta etapa se presentan en la Figura 31.

En la Figura 31 se observa que la concentración de fósforo en la entrada y en la salida del Reactor Anaeróbico es fluctuante y no tiene un comportamiento definido, lo que demuestra la inestabilidad del mismo. Por el contrario, la concentración de fósforo en el sistema de Lodos Activados tiende a disminuir con el tiempo, apreciándose una remoción de fósforo por parte de los microorganismos que componen dicho sistema. La inestabilidad del Reactor Anaeróbico puede justificarse por la falta de continuidad en la alimentación, ya que si el personal de producción informa de alguna descarga que pueda afectar la vida y actividad de las bacterias anaerobias se suspende la alimentación del mismo y se desvía al sistema aerobio.

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

Además, en análisis realizados por parte de los operadores de la PTER para determinar la cantidad de sólidos suspendidos no solubles, se ha encontrado que hay un 10% del volumen total del reactor ocupado por estos, por lo cual se piensa que se debe a sólidos no solubles de la alimentación y a la muerte de bacterias que desprenden fósforo de su tejido celular, impidiendo de esta manera que el resto de las mismas realicen su desempeño con eficiencia, ya que el Reactor Anaeróbico no está diseñado para degradar la materia orgánica comprendida por sólidos no solubles. En adición a esto, hubo un período en el cual no se le dosificó Cloruro Férrico al reactor como micro-nutriente, lo que pudo afectar la actividad de los microorganismos y por ende la estabilidad del sistema anaeróbico.



**Figura 31. Concentración de Fósforo en el sistema biológico.**

El comportamiento presentado para la concentración de fósforo, tanto en el Reactor Anaeróbico como en el Sistema de Lodos Activados, también puede justificarse con la revisión bibliográfica, pues en esta se afirma que los microorganismos anaerobios liberan el fósforo que han almacenado como respuesta a la presencia en el agua residual de ácidos grasos volátiles, y si esta zona anaeróbica está seguida de una aeróbica los microorganismos consumen mayores cantidades de



fósforo; es decir, ocurre la liberación de este compuesto en la fase anaeróbica, luego este es consumido en la fase aeróbica y a su vez el lodo que contienen el exceso de fósforo se purga del sistema. [9]

#### **V.4.1.2.- Selección y Evaluación de Aditivos Químicos para Disminuir Fósforo por Precipitación Química:**

Otra de las opciones para disminuir el fósforo en aguas servidas es mediante precipitación química como fue mencionado en el marco teórico de este trabajo. Por lo que fue necesario seleccionar y evaluar algunos aditivos químicos para verificar su eficiencia en cuanto a remoción de fósforo.

En primer lugar, la selección de los aditivos químicos se hizo tomando en cuenta los recomendados por la bibliografía y los disponibles en el mercado. Estos productos son: Cloruro Férrico y Policloruro de Aluminio, Aluminato de Sodio. Este último disponible en el mercado aunque no recomendado por la bibliografía.

Posteriormente, se realizaron pruebas de jarra con cada uno de estos compuestos químicos y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 14. Primeramente, se muestran las pruebas de jarra realizadas en la primera Piscina Aeróbica. Al observar los resultados, se puede apreciar que las dosis óptimas para cada producto son las resaltadas en color amarillo, es decir, 0,0625 ml/s, 0,9 ml/s, 0,46 ml/s, para el Cloruro Férrico, Aluminato de Sodio y Policloruro de Aluminio respectivamente (escala de laboratorio).

Una vez mezclados los coagulantes con el agua, se realizó una inspección cualitativa de la cantidad de lodo que sedimentó en 15 min. y de la apariencia que tenía el mismo. Para tener una base de comparación, se realizó una prueba de jarra con el lodo de la primera piscina aeróbica sin aditivo químico y sometido a las mismas condiciones de velocidad anteriormente descritas, en el cual se pudo apreciar

**Presentación y Discusión de los Resultados**

que a los 5 min. había sedimentado 40 ml de lodo aproximadamente y a los 15 min. sedimentó 80 ml del mismo. A partir de este valor se verificó la cantidad de sedimento que produce cada aditivo.

**Tabla 14. Resultados de las pruebas de jarras realizadas en la primera Piscina Aeróbica.**

<i>Aditivo</i>	<i>Dosis (ml/s)</i>	<i>Conc. inicial de Fósforo (mg/l)</i>	<i>pH inicial</i>	<i>Lodo sedimentado en 15 min. (ml)</i>	<i>pH final</i>	<i>Conc. final de Fósforo (mg/l)</i>	<i>Porcentaje de Remoción (%)</i>
<b>Cloruro Férrico</b>	0,05	6,6	7,53	120	7,38	3,13	52,6
	0,1	2,13	7,89	80	7,52	0,36	83,1
	0,15	2,13	7,89	80	7,63	0,42	80,3
	0,075	2,13	7,89	65	7,7	0	100,0
	0,0625	2,3	7,89	40	7,64	0,51	77,8
<b>Aluminato de Sodio</b>	0,05	11,55	7,33	40	7,41	10,56	8,6
	0,1	11,55	7,33	40	7,51	9,9	14,3
	0,3	11,55	7,33	50	7,63	8,25	28,6
	0,4	11,55	7,33	50	7,75	6,6	42,9
	0,6	4,53	7,89	30	8,2	1,62	64,2
	0,9	4,53	7,89	30	8,56	0,88	80,6
<b>Policloruro de Aluminio</b>	0,2	4,03	7,92	50	7,7	1,82	54,8
	0,25	4,03	7,92	15	7,64	1,95	51,6
	0,37	4,03	7,92	30	7,55	1,09	73,0
	0,46	4,03	7,92	50	7,43	0,86	78,7

Al comparar los tres coagulantes utilizados y los comportamientos de éstos durante las pruebas de jarras, se puede afirmar que con el Cloruro Férrico se logra mayor porcentaje de remoción con menos dosis de este producto, lo que se refleja en bajos costos mensuales. Sin embargo, hay mayor precipitación con el Policloruro de Aluminio, pues es mayor la cantidad de lodo que se deposita ya que forma un floc más resistente y pesado que sedimenta con facilidad. Esto se debe a que el PAC es un polímero ramificado de alto peso molecular, lo que favorece la unión de muchas moléculas porque posee muchos sitios de enlace. Por su parte el Aluminato de Sodio produce más lodo del que ya existe en el sistema, lo que involucra mayor purga de lodo y más costos asociados a la compra del polímero floculante utilizado para el prensado de los lodos aeróbicos; otro aspecto negativo de este aditivo es que aumenta

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

considerablemente el pH del agua lo puede ocasionar que el efluente final salga fuera de especificación, es decir con un  $\text{pH} > 9$ .

También se verificó si era significativo el incremento de cloruros por parte del Cloruro Férrico al agua residual, para ello se tomó una muestra y se le determinó la concentración de cloruros antes y después de la aplicación del coagulante. Obteniéndose como resultado que se incrementó la concentración en 20 mg/l, es decir, aumentó 0,8%, por lo tanto, se puede considerar este aumento prácticamente insignificante.

Tomando en cuenta el efecto que podían ejercer los aditivos químicos sobre los microorganismos aerobios, se procedió a realizar una revisión bibliográfica, en la que sólo se encontró que la biomasa requiere cierta cantidad de algunos elementos añadidos mediante una solución de sus sales. En la Tabla 15 se reflejan estos valores. En esta tabla se evidencia que el Cloruro Férrico no tiene ningún efecto negativo sobre las bacterias, por el contrario es un micro-nutriente para estas.

**Tabla 15. Requerimientos Micro-Nutritivos de los Microorganismos.** <sup>[23]</sup>

Nutriente	Valor Requerido (mg/l)	Adición del Químico Preferido
K	5	KCl
Fe	5	$\text{FeCl}_3$ ó $\text{FeCl}_2$
Mg	5	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ó $\text{Mg}(\text{OH})_2$
Ca	1	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Zn	0,10	$\text{ZnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Cu	0,05	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Mn	0,05	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Ni	0,05	$\text{NiCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Al	0,05	$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Co	0,01	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Mo	0,001	$\text{H}_2\text{MoO}_4$ ó $\text{MoO}_3$

Posteriormente, se evaluó la posibilidad de aplicar el coagulante en la salida del sedimentador primario para observar el comportamiento de los mismos, además previo a esta etapa los microorganismos aerobios de las piscinas aeróbicas se han

## ***Presentación y Discusión de los Resultados***

consumido cierta cantidad del fósforo inicialmente presente y como consecuencia se encuentra en menor concentración en esta zona. Para realizar las pruebas de jarras con el agua de esta área se siguió el mismo procedimiento descrito en la parte anterior, con las dosis ya establecidas. En la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 16. Resultados de las pruebas de jarras realizadas en el Sedimentador Primario.**

<i>Aditivo</i>	<i>Dosis (ml/s)</i>	<i>Conc. inicial de Fósforo (mg/l)</i>	<i>pH inicial</i>	<i>pH final</i>	<i>Conc. final de Fósforo (mg/l)</i>	<i>Porcentaje de Remoción (%)</i>
<b>Cloruro Férrico</b>	0,0625	1,8	7,01	7,11	0,39	78,3
<b>Policloruro de Aluminio</b>	0,46			7,35	0,22	87,8
<b>Aluminato de Sodio</b>	0,9			8,7	0,37	79,4

Se puede visualizar claramente que la remoción es mayor y más efectiva, dosificando el coagulante en el sedimentador primario que en la primera Piscina Aeróbica. Sin embargo, estos agregados químicos le brindan cierta turbidez al agua por sólidos suspendidos existiendo la posibilidad de que el efluente final esté fuera de especificación. Para no estar propenso a este riesgo, es recomendable realizar la dosificación en la primera Piscina Aeróbica.

### **V.4.2.- Alternativas para Remover Cloruros:**

#### **V.4.2.1.- Diagnóstico Previo del Proceso de Regeneración:**

Después de haber identificado la corriente efluente de Planta de Agua como la más contribuyente en masa de cloruros, se realizó una auditoría del proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico, para evaluar las causas de las

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

generación excesiva de cloruros y buscar de una u otra manera opciones para minimizar en la medida de lo posible este hecho.

Inicialmente, se revisaron los manuales de operación para comprobar que el mismo se estuviera cumplido a cabalidad, asimismo se verificó la cantidad de sal necesaria para la regeneración de la resina. Luego, se pidió la colaboración de los operadores para evaluar el procedimiento que ellos seguían. Esta actividad se realizó en dos oportunidades.

Como resultado de este dinamismo junto con el análisis realizado a la curva de elución de salmuera, se logró detectar algunas anomalías en la operación que traían como consecuencia el desaprovechamiento de parte de la sal que es introducida a los suavizadores en forma de salmuera. Esta evaluación fue apoyada con una revisión bibliográfica realizada para tal fin. A continuación se describen las observaciones realizadas en cada etapa del proceso de regeneración:

- ⊕ Retrolavado: En esta fase no se estaba logrando suficiente remoción del sucio adherido a la resina, ya que la válvula de salida del agua se mantiene totalmente abierta y no se logra la presión suficiente para expandir el lecho, de manera tal de elevarlo y separarlo para que el agua dura en contracorriente lo limpie y clarifique. Además, se desecha más agua de la necesaria debido a esta anomalía. Otra consecuencia de un deficiente retrolavado de la resina es que ocasiona las canalizaciones o los caminos preferenciales por donde fluye el regenerante.
  
- ⊕ Regeneración (Ingreso y Desplazamiento de la Salmuera): Debido a una operación del retrolavado ineficiente, se formaban espacios muertos en los que el Cloruro de Sodio no intercambiaba su ión sodio con la resina, por lo que se drenaba salmuera cruda al drenaje. Esto implica que hay un exceso de sal lo cual fue corroborado por la bibliografía revisada <sup>[24]</sup>, pues la

concentración másica de sal requerida en el momento del intercambio iónico es 10% y se alcanzaba el 17%. Otro aspecto importante, para corregir, es que la operación de regeneración no consiste en dejar la resina en contacto con la salmuera durante 30 min. y luego drenarla, como se solía hacer, sino introducir toda la salmuera y desplazarla con una corriente de agua para diluirla, con un caudal tal que el tiempo de contacto sea suficiente para que ocurra el intercambio.

⊕ **Lavado Rápido:** En esta etapa se requiere corregir el caudal utilizado porque se desecha más agua de lo usual. Además, no es necesario culminar con esta fase cuando se logre una dureza de 0 mg/l, sino cuando esta posea un valor de 20 mg/l, esto implicaría pérdida de rendimiento porque se tiene otro suavizador que funciona como pulimento.

El exceso de sal mencionado en la etapa de regeneración, puede visualizarse claramente en la curva de elución mostrada en la Figura 25, donde existe una sobredosis de salmuera y también puede observarse que la curva no parte de cero lo que implica que la salmuera no debe dejarse en contacto con la resina por un tiempo y luego drenarla sino como se indicó en la etapa de regeneración de esta sección.

#### **V.4.2.2.- Evaluación del Ácido Clorhídrico (HCl) como Regenerante:**

Como segunda opción para disminuir los cloruros generados desde la sección de ablandamiento de agua, se estudió la posibilidad de cambiar de regenerante, para ello se evaluó la eficiencia del ácido clorhídrico en la regeneración de la resina de intercambio iónico. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 17.

**Tabla 17. Parámetros medidos para evaluar el ácido clorhídrico como posible regenerante de la resina de intercambio iónico.**

<i>Concentración de HCl (%)</i>	<i>Volumen de HCl utilizado (ml)</i>	<i>Volumen de Agua Suavizada (ml)</i>	<i>pH del Agua Suavizada</i>	<i>Volumen de Soda Cáustica necesario (ml)</i>
6	100	300	2,39	0,006
3	100	210	2,01	0,004

El hecho de que el pH resultante del agua suave, para ambos casos, posea estos valores, implica que puede ocasionar problemas de corrosión en las tuberías. Por lo tanto, se determinó la cantidad de soda cáustica (NaOH) al 50% que es necesario agregar para aumentar el pH a 5,7.

Según los resultados obtenidos a escala de laboratorio, se puede apreciar que es poco factible cambiar el regenerante actual por ácido clorhídrico ya que realmente se necesitarían 100 m<sup>3</sup> de este último para el proceso de regeneración, lo cual es una cantidad excesiva en comparación con el volumen de salmuera utilizado actualmente (1,5 m<sup>3</sup>), adicionalmente el HCl puede corroer el interior de los suavizadores y las tuberías acopladas a estos, por lo que sería necesario cambiar el material de estos equipos, lo que acarrea costos significativos.

#### **V.5.-EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS AVANZADOS DE REMOCIÓN DE FÓSFORO Y CLORUROS:**

La selección de las alternativas estudiadas a través de las distintas bibliografías consultadas, se llevó a cabo con la construcción de una matriz de selección. Esta última se realizó en función a las tecnologías de ósmosis inversa, evaporación y electrodiálisis, ya que las otras tecnologías fueron descartadas por las siguientes razones:

- ⊕ La precipitación química presenta el inconveniente ocasionado por los altos costos de los compuestos que son necesarios para precipitar los cloruros, y por otro lado, generalmente son compuestos que liberan iones de platino o mercurio que contaminan y producen efectos aún peores que los que muestran los cloruros.
- ⊕ El intercambio iónico, si bien permite reducir los niveles de cloruros en el efluente de salida, una vez que se ha desgastado la resina es necesaria su regeneración, con lo cual en el efluente saldrán nuevamente los cloruros que inicialmente fueron retenidos, por lo tanto, su impacto en el cuerpo de agua es el mismo, a fin de cuentas.

Los resultados de la matriz de selección se presentan en la Tabla 18, y en función a ellos, la técnica de la ósmosis inversa es la favorecida desde el punto de vista técnico para tratar el agua que se pretende recuperar, en primer lugar porque el rango de concentraciones se ajusta a los valores recomendados para instalar esta técnica, a diferencia de la evaporación, con lo cual los requerimientos energéticos con respecto a la concentración son altos. La vida útil de las membranas de ósmosis inversa se estima en varios años dependiendo del tratamiento dado a la corriente alimentada, a diferencia de la electrodiálisis, que requiere reemplazo constante de las unidades.



**Tabla 18. Resultados de la matriz de selección de tecnologías.**

<i>Criterio</i>	<i>Tecnología</i>		
	<i>Ósmosis Inversa</i>	<i>Evaporación</i>	<i>Electrodialisis</i>
Experiencia (20%)	100	100	50
<b>Subtotal</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>10</b>
Eficiencia (20%)	100	100	75
<b>Subtotal</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>15</b>
Complejidad (10%)	75	100	75
<b>Subtotal</b>	<b>7,5</b>	<b>10</b>	<b>7,5</b>
Mantenimiento (20%)	75	50	75
<b>Subtotal</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>15</b>
Seguridad (10%)	75	50	75
<b>Subtotal</b>	<b>7,5</b>	<b>5</b>	<b>7,5</b>
Economía (20%)	75	50	75
<b>Subtotal</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>15</b>
<b>TOTAL</b>	<b>85</b>	<b>75</b>	<b>70</b>

**Escala: 100% Excelente, 75% Bueno, 50% Regular, 25% Deficiente.**

#### **V.6.- PLANTEAMIENTO DE PROPUESTAS:**

Después de haber obtenido los resultados de las evaluaciones realizadas en las fases anteriores, de las distintas alternativas u opciones para disminuir las concentraciones de fósforo y cloruros en el efluente final de la PTER, se plantean las posibles soluciones en este mismo orden de ideas.

##### **V.6.1.- Propuestas para Disminuir Fósforo:**

Una vez identificada la corriente de mayor aporte de fósforo, la cual proviene de la zona de producción, específicamente Planta de Almidones Modificados y una vez evaluado el consumo de fósforo por parte de los microorganismos y la remoción

## ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

del mismo mediante precipitación química, se decidió llevar a cabo la remoción de fósforo en la PTER ya que se consideró que dicha planta puede disminuir la concentración de este compuesto por debajo de los valores exigidos por la normativa aplicable.

La solución propuesta consiste en llevar a cabo la remoción de fósforo por acción de los microorganismos, en conjunto con la adición de un producto químico que fue seleccionado anteriormente según los resultados arrojados por las pruebas de jarras, es decir, se requiere la inversión mensual en una solución de Cloruro Férrico al 33% de marca comercial MQ-110.

En definitiva, la concentración de fósforo en el efluente final será menor a 1 mg/l si se alimenta constantemente el Reactor Anaeróbico para garantizar que las bacterias que se encuentran en este reactor consuman este compuesto; y si se dosifica 0,25 ml/s de Cloruro Férrico en la primera Piscina Aeróbica, para eliminar el fósforo que aún permanece en el agua residual, por el fenómeno de coagulación-floculación. Para ello también es necesario purgar constantemente el lodo sedimentado en los clarificadores primario y secundario.

### **V.6.2.- Propuestas para Disminuir Cloruros:**

En primer lugar, se decidió corregir las anomalías en el proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico en Planta de Agua. A continuación se presentan las siguientes propuestas en cada una de las etapas para implantarlas de inmediato:

- ⊕ Retrolavado: Cerrar la válvula de salida de agua del suavizador hasta conseguir un caudal de 3,3-3,5 l/s y una presión en el manómetro de entrada de 30 psi. Además, se debe realizar el retrolavado por un período de 15-20

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

min. o hasta que el agua que va al desagüe salga clara. Por último, se debe cerrar la válvula de salida del agua para evitar que se despresurice el lecho.

- ⊕ **Regeneración:** Al ingresar la salmuera se debe conseguir un caudal de 1-1,2 l/s, manipulando la válvula de salida del suavizador y al desplazar la misma se debe conseguir un caudal dentro de este mismo rango, para garantizar que la salmuera se diluya y que tenga suficiente tiempo de contacto como para realizar el intercambio iónico con la resina. En esta fase debe construirse la curva de elución de salmuera para verificar mediante esta la operación.
  
- ⊕ **Lavado Rápido:** Para esta etapa se recomienda conseguir un caudal manipulando la válvula de salida del suavizador de 3,5-3,7 l/s y una presión de entrada de 30 psi, para lograr desplazar el exceso de cloruros y no desechar gran cantidad de agua.

Una vez realizadas todas estas correcciones en la operación, se realizaron simulaciones para observar los resultados de las curvas de elución con dichos cambios y tratando de minimizar la cantidad de sal utilizada para preparar la salmuera. Estas curvas se presentan en la Figura 32.

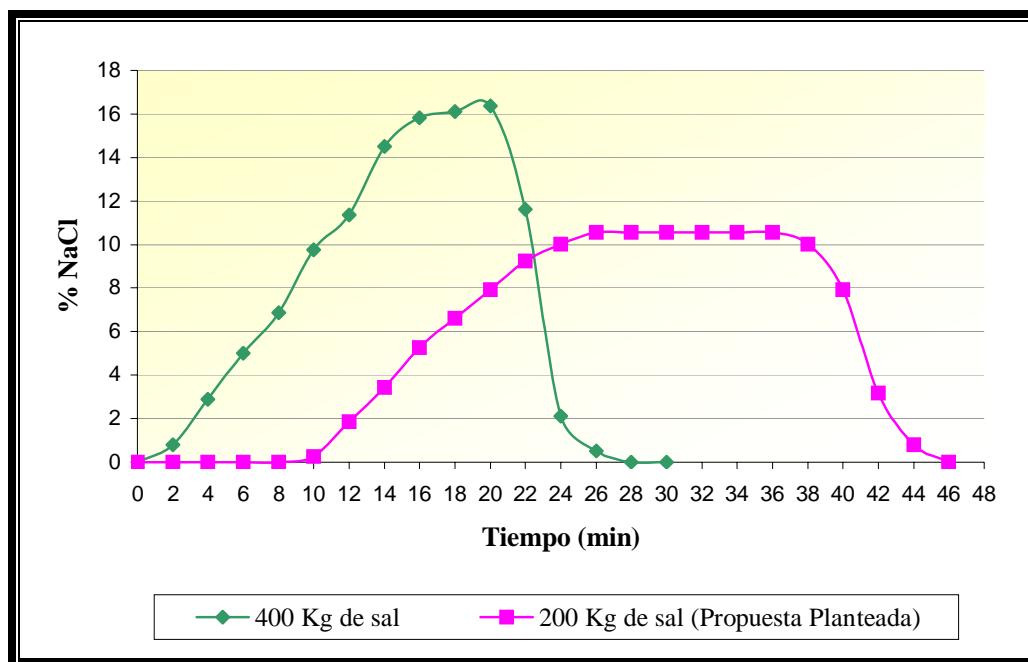


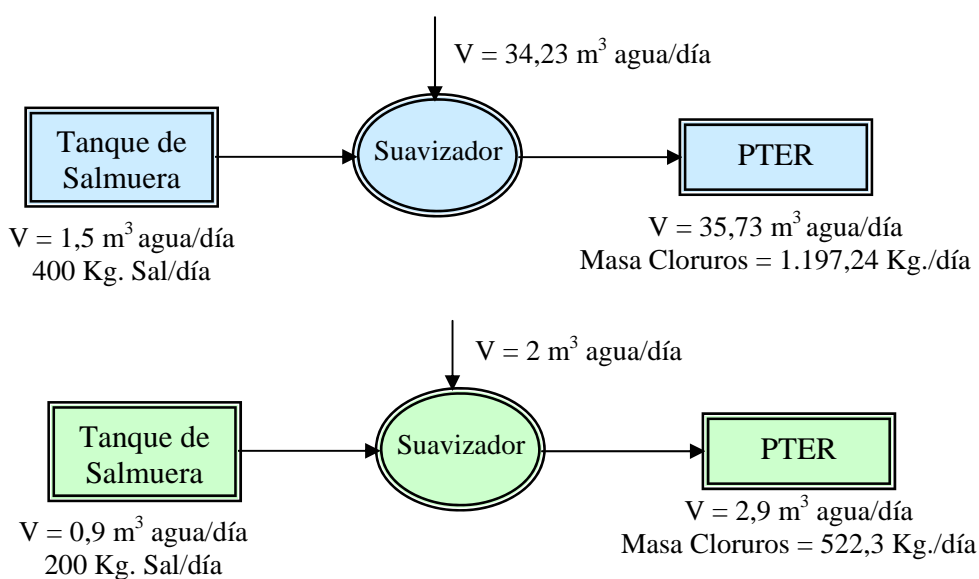
Figura 32. Curva de Elución obtenida para la propuesta planteada.

Al observar la figura anterior, se puede afirmar que se estaban generando más cloruros de los necesarios lo cual se reflejaba en el efluente final de la PTER. Por lo tanto, en vez de utilizar 400 Kg. de sal para regenerar, se deben utilizar 200 Kg., ya que con esta cantidad y con las especificaciones dadas para la operación se puede lograr la misma capacidad de intercambio que la observada en la situación original. Además, se logró obtener la forma habitual de una curva de elución, es decir que la concentración de la salmuera que se drena parte desde cero, lo que significa que hay un tiempo en el que se desplaza el agua dura que contiene el suavizador con la salmuera que se ha introducido.

Con la mencionada curva de elución, se determinó la nueva cantidad de cloruros generados, obteniéndose que se producen 522,3 Kg./regeneración en forma de ión cloruro. Es decir, que se estaban desperdiciando 200 Kg de cloruro de sodio (8 sacos). Sin embargo, la simulación con 175 Kg de sal (7 sacos), arrojaba resultados satisfactorios pero para obtener el mismo rendimiento de los suavizadores, a pesar de

### Presentación y Discusión de los Resultados

las fallas operacionales u otros cambios, se ajustó la concentración de salmuera por exceso (8 sacos) para garantizar una cantidad de iones sodio ( $\text{Na}^+$ ) suficientes para realizar efectivamente el proceso de intercambio, y ese exceso saldrá inevitablemente hacia el drenaje. En la Figura 33 se muestra el análisis comparativo entre la situación actual y la propuesta planteada.



**Figura 33. Situación de Planta de Agua y PTER con la propuesta planteada.**

La planta de tratamiento se ve beneficiada con esta medida, ya que el contenido de cloruros enviado a ella desde este punto disminuye de 1.197,24 Kg./regeneración hasta 522,3 Kg./regeneración (54,4% de reducción). Igualmente esta medida representa un ahorro económico para la empresa, ya que se deja de comprar sal industrial, a un costo aproximado de 308,5 U.S.\$/mes, además de un ahorro en agua porque el tiempo del proceso de regeneración se ha disminuido, lo que a su vez, también implica menos tiempo de dedicación a dicho proceso por parte de los operadores y que puede ser aprovechado para otras actividades. En la Tabla 19 se muestra la composición del nuevo efluente de salida de la PTER, una vez que se adoptó la propuesta planteada.

**Tabla 19. Simulación del nuevo efluente de PTER.**

<i>Fecha</i>	<i>Concentración de Cloruros (mg/l)</i>
15-05-06	1740
16-05-06	1720
17-05-06	1680
18-05-06	1640
19-05-06	1620

En la tabla anterior logra observarse que la concentración de cloruros en el efluente de la PTER va disminuyendo progresivamente a medida que se va desplazando el gran volumen de agua que puede tratar el sistema. Esta es una consecuencia directa de la disminución de masa de cloruros que actualmente están ingresando a la planta de tratamiento. Tomará cierto tiempo apreciar la disminución en la concentración de cloruros a niveles que cumplan con la normativa legal.

Adicionalmente, se estudió la posibilidad de recuperar el agua proveniente del retrolavado y lavado rápido de los suavizadores; lo cual es posible ya que dicha agua no contiene cloruro de sodio. Por lo tanto, esta agua es adecuada para retornarla al tanque subterráneo y reutilizarla, esta propuesta resulta necesaria e interesante para la corporación, ya que actualmente los pozos de agua han presentado dificultades, lo que indica que en un futuro no muy lejano pudiera afrontarse un déficit de agua. Es por ello, que se requiere recuperar parte del agua que hasta el momento ha sido desechada y que puede reutilizarse.

La recuperación del agua de lavado rápido comenzará una vez que el densímetro indique cero grados salométricos, es decir, 0 ppm de NaCl. El volumen de agua recuperado en cada etapa se refleja en la Tabla 20:

**Tabla 20. Propuesta para la recuperación del agua del proceso de regeneración.**

<i>Etapa</i>	<i>Caudal (l/s)</i>		<i>Tiempo de duración de la etapa (min.)</i>		<i>Volumen Recuperado (l)</i>
	<i>Anterior</i>	<i>Propuesto</i>	<i>Anterior</i>	<i>Propuesto</i>	
Retrolavado	5,5	3,5	30	20	4.200
Lavado Rápido	5,9	3,5	45	25	5.250
					Total: 9.450

Esta propuesta resulta atractiva ya que anteriormente se desecharan 35.730 l/regeneración y ahora sólo se desecharán 2.880 l/regeneración (92 % de reducción), la cual es el agua proveniente del desplazamiento de salmuera.

Para la propuesta planteada en primer lugar, es decir, las correcciones en cuanto a operación, y para obtener la mayor eficiencia de los suavizadores se requieren valores exactos de presión y caudal. Por lo que, resulta necesario la instalación de dos placas orificios, ya que la manipulación de las válvulas existentes en Planta de Agua, es relativa y subjetiva. Además, dicha manipulación depende de cada operador.

Cada una de las etapas del proceso requiere un caudal y una presión distinta; sin embargo, para no tener muchos accesorios en las tuberías, se ajustó la presión de cada una de estas fases para obtener el caudal deseado. Por lo tanto, se requieren dos placas orificios: una para la etapa de retrolavado y lavado rápido con un diámetro de 17 mm (3,5 lts/seg.), y la otra para el ingreso y desplazamiento de la salmuera con un diámetro de 10 mm (1,1 lts/seg.). En el Apéndice C se encuentran los cálculos pertinentes para cada una de estas placas.

También, para lograr recuperar tal volumen de agua mencionado anteriormente, es necesaria la instalación de una línea de tubería, comprendida desde un poco antes del drenaje hasta el tanque subterráneo. Estos requerimientos fueron solicitados ante el departamento de Mantenimiento de la empresa. La Figura 34

### ***Presentación y Discusión de los Resultados***

---

describe tanto la tubería necesaria para recuperar el agua como la instalación necesaria para las dos placas orificios.

En segundo lugar, se consideró necesario separar la corriente con el mayor contenido de cloruros antes de su entrada a la planta de tratamiento, contribuyendo a la reducción de la concentración a la entrada, y por ende a la salida de la misma. La propuesta consiste en almacenar en un tanque de 2.032 litros de capacidad, de fibra de vidrio, disponible en Planta de Agua, el agua que se desecha del desplazamiento de la salmuera y luego ir drenándola a un caudal de 0,1 l/s, por lo tanto, este tanque se drenará por completo en aproximadamente 6 horas. Con este hecho se logrará reducir significativamente la concentración de cloruros en el afluente de la PTER. Asimismo, lo que se pretende es diluir de una u otra manera esta corriente con el resto de las corrientes afluentes a la planta de tratamiento.

En la zona de la Planta de Almidones Modificados resulta complicado tratar por separado su efluente, que es sin duda, la zona crítica dentro del proceso productivo, ya que resulta necesario su tratamiento inmediato por la cantidad de materia orgánica contenida en la misma, y se corre el riesgo de descomposición en el largo plazo, por lo cual sería necesario su almacenaje fuera de las zonas de producción.





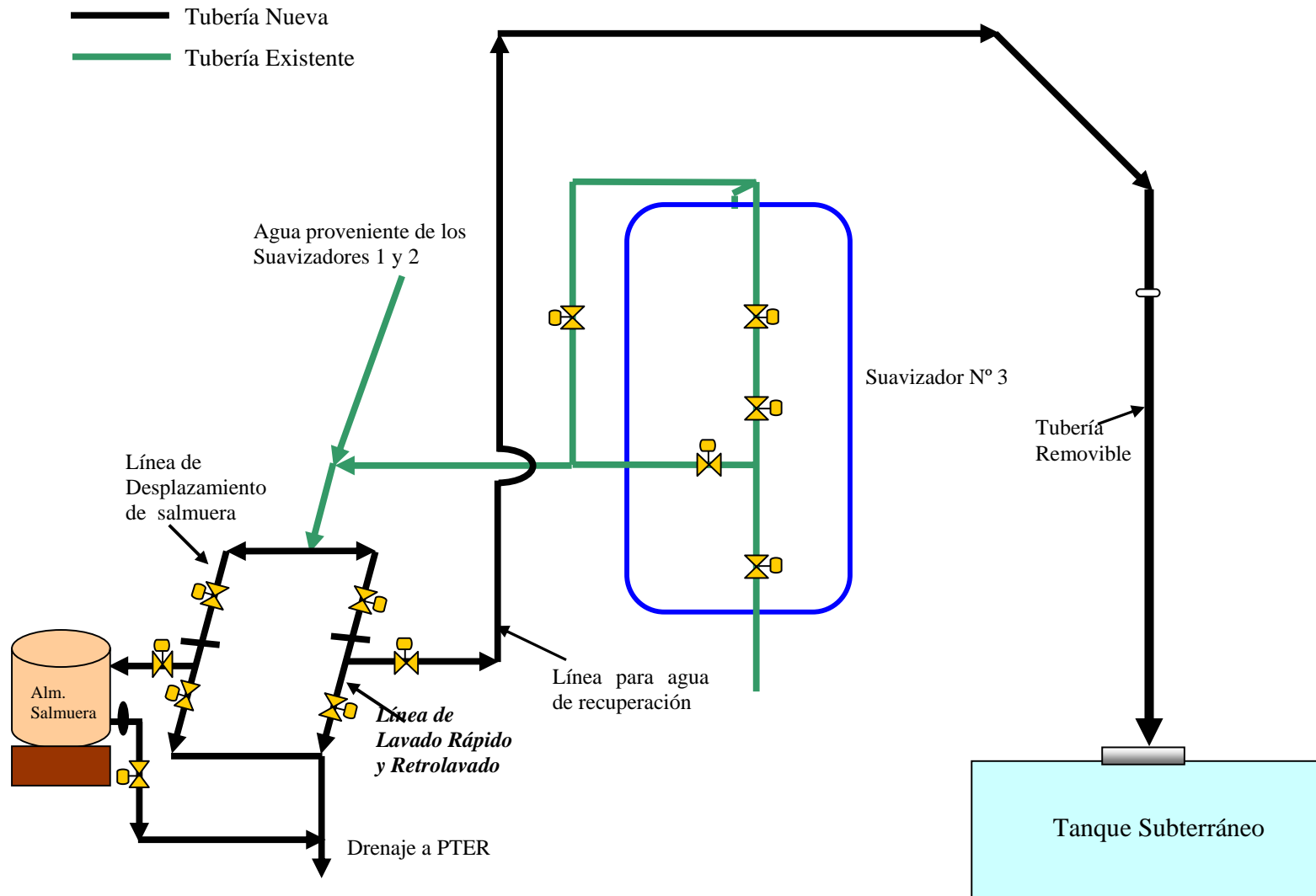


Figura 34. Tuberías y accesorios necesarios para las propuestas en Planta de Agua.

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

Este tipo de corrientes necesita un tratamiento secundario adecuado para degradar de manera efectiva la carga orgánica presente, por lo cual la planta de tratamiento posee las unidades necesarias en este sentido. No resulta factible una alternativa a corto plazo dentro de esta sección de la empresa. La zona de Planta 2 según se ha observado en el balance de masa no realiza un aporte importante comparado con otras zonas de la empresa, como para considerar un tratamiento exclusivo a dichas corrientes, ya que no tendrían mayor impacto en los niveles de cloruros que llegan a la planta de tratamiento.

Para la planta de tratamiento no se realizó ninguna propuesta ya que en esta zona no existe un tratamiento directo que permita de manera efectiva minimizar los niveles de cloruros en su efluente en el corto plazo, sin embargo logrando controlar las descargas según la propuesta planteada para la Planta de Ablandamiento de Agua, se puede lograr un impacto positivo, obteniéndose una reducción en el aporte de cloruros hacia la PTER.

Con respecto a la tecnología de ósmosis inversa, la cual fue seleccionada como la más conveniente para minimizar los niveles de cloruros en el efluente de la PTER, se ha decidido proponerla para implantarla a largo plazo ya que se conseguiría un efluente potabilizado, es decir, que se puede recuperar el agua y la sal utilizada, si la corriente concentrada (salmuera) se somete a evaporación. Es importante aclarar que la implantación de esta tecnología implica una inversión significativa en el pre-tratamiento, tratamiento y post-tratamiento del agua, en lo referido a productos químicos, equipos, tuberías, energía. Por lo tanto, si con las alternativas propuestas anteriormente, en conjunto, se logra un efluente con una concentración de cloruros por debajo de los niveles exigidos por la normativa legal, no se justifica hacer una inversión en un sistema de ósmosis inversa. Sin embargo, la implantación de un sistema como éste pudiera ser necesario si la producción aumentara a futuro más de lo previsto y si la corporación presentara problemas de abastecimiento por parte de los pozos de agua existentes actualmente. Aunque, antes de implantar un sistema

como este es preferible evaluar la posibilidad de cambiar de regenerante para la resina de intercambio, de manera tal de minimizar en la medida de lo posible la generación de cloruros en esta sección.

#### **V.7.- EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS SOLUCIONES PLANTEADAS:**

Después de haberse planteado las propuestas en la sección anterior, para minimizar los niveles de fósforo y cloruros, se realizó una evaluación económica de las mismas. En primer lugar, se hizo la evaluación económica de los aditivos evaluados para remover fósforo, mediante un baremo que se muestra en la Tabla 21.

**Tabla 21. Evaluación económica de aditivos químicos probados para remover fósforo.**

<i>Aditivo</i>	<i>Costo del aditivo (Bs./Kg.)</i>	<i>Dosis del aditivo (l/s)</i>	<i>Costo mensual (Bs./mes)</i>	<i>Porcentaje de Remoción (%)</i>	<i>Disponibilidad del aditivo (%)</i>
<b>Cloruro Férrico</b>	2.350	0,00025	591.692,4	78	100
<b>Aluminato de Sodio</b>	3.220	0,0036	12.325.727,2	80	50
<b>Policloruro de Aluminio</b>	1.955	0,0018	4.453.196	82	50

En la tabla anterior se refleja claramente que el coagulante que implica menos costos es el Cloruro Férrico ya que es el que presenta mayor disponibilidad (producto nacional) y menos dosis, lo que a su vez acarrea menos costo en este producto mensualmente, aunque este aditivo es el que posee mayor precio por kilogramos. Por su parte, el Aluminato de Sodio es el que más costo mensual amerita por ser un producto importado y porque requiere más dosis. Por lo tanto, los costos mensuales en Cloruro Férrico se justifican por el porcentaje de remoción que presenta y por la dosis que se requiere, ya que con la adición de este producto en conjunto con el tratamiento biológico se logra disminuir la concentración de fósforo a menos de 1 mg/l, lo cual es lo exigido por la normativa legal aplicable.

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

Por otro lado, las propuestas realizadas para disminuir la concentración de cloruros que proviene de Planta de Agua, requieren de costos asociados a tuberías, placas orificios y accesorios tales como conexiones, codos, etc. Un somero estudio económico según los metros de tuberías necesarios, los accesorios nombrados anteriormente y la mano de obra requieren un costo de U.S.\$ 1.441,86. La inversión realizada en esta propuesta será recuperada en dos meses por el ahorro en la compra de sal industrial y la energía eléctrica utilizada para la regeneración.

En cuanto a la propuesta de implementar un sistema de ósmosis inversa, se solicitaron cotizaciones de esta tecnología para tratar un caudal de 300 m<sup>3</sup>/día, obteniéndose que la más económica fue ofrecida en U.S.\$ 326.475 y lo más conveniente es ubicar este sistema después de la piscina de cloración ya que se han eliminado los sólidos suspendidos y se ha desinfectado el efluente, lo cual es parte del pre-tratamiento que requiere el afluente de las membranas de ósmosis inversa. Además, se requieren costos mensuales en la operación de dicho sistema de aproximadamente U.S.\$ 743,68, sin incluir los costos asociados al tratamiento que debe darse a la corriente de rechazo que es de aproximadamente 32 m<sup>3</sup>/día.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes derivadas de la realización del presente Trabajo Especial de Grado, las cuales se presentan siguiendo el orden de los objetivos específicos del mismo.

- ⊕ Los procesos que desechan efluentes líquidos con concentraciones de fósforo significativas son los de Planta de Almidones Modificados y Planta de Molienda Húmeda del Maíz.
- ⊕ Los procesos que generan cloruros en sus efluentes son los de Planta de Almidones Modificados y Planta de Agua.
- ⊕ El mayor aporte en masa de fósforo lo ofrece la corriente proveniente de Planta de Almidones Modificados.
- ⊕ Las mayores descargas de cloruros se originan en el proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico, seguido por la Planta de Almidones Modificados.
- ⊕ El fósforo presente en el efluente de Planta de Almidones Modificados se debe a que se utiliza un compuesto polifuncional fosfatado en la elaboración de algunos productos.
- ⊕ En el proceso de regeneración se está utilizando más cantidad de sal de la necesaria, con lo cual hay una generación de cloruros innecesaria hacia la planta de tratamiento.

## *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

- ⊕ Los procesos biológicos que se llevan a cabo en la planta de tratamiento disminuyen la concentración de fósforo en el efluente. Aunque el Reactor Anaeróbico presenta inestabilidad.
- ⊕ La PTER no está diseñada para controlar la concentración de cloruros a lo largo de los distintos procesos que en ella se desarrollan.
- ⊕ El Cloruro Férrico logra remover el fósforo en un 78%, en la primera Piscina Aeróbica, con una dosis de 0,0625 ml/s por litro de agua residual.
- ⊕ La salmuera que se desecha de la sección de regeneración puede ser almacenada y luego drenada a un caudal de 0,1 l/s, a fin de diluirla con el resto de las corrientes afluentes a PTER.
- ⊕ No es factible tratar la corriente concentrada en cloruros proveniente del proceso productivo de Planta de Almidones Modificados a largo plazo, ya que se corre el riesgo de descomposición de la materia orgánica que ésta contiene.
- ⊕ Con la implementación de las propuestas realizadas, para remover fósforo, se logra un efluente final con una concentración menor a la exigida por la normativa legal.
- ⊕ El proceso de regeneración de la resina de intercambio iónico posee el mismo rendimiento con la mitad de sal utilizada anteriormente en la preparación de la salmuera, permitiendo ahorros económicos a la empresa.
- ⊕ Con la implementación de las propuestas realizadas en Planta de Agua, se tiene una menor necesidad de agua dura y se puede reutilizar el agua de las etapas de retrolavado y lavado rápido.

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

- ⊕ De todas las tecnologías disponibles para remover cloruros, la ósmosis inversa proporciona las mejores características, recuperando un agua de excelente calidad que puede ser reutilizada.
  
- ⊕ La inversión que es necesaria realizar para los cambios propuestos en el proceso de regeneración es de U.S.\$ 1.441,86 y se recupera en dos meses con el ahorro de sal y electricidad en Planta de Agua.
  
- ⊕ La implementación de la propuesta a largo plazo de Ósmosis Inversa requiere una inversión de U.S.\$ 326.475, con un costo de operación mensual de U.S.\$ 743,68.



## **CAPÍTULO VII**

### **RECOMENDACIONES**

A fin de mejorar tanto el desempeño actual como la viabilidad de las propuestas generadas en este Trabajo Especial de Grado, se realizan las siguientes recomendaciones:

- ⊕ Revisar si la cantidad de compuesto fosfatado utilizado para la elaboración de los almidones modificados es la necesaria, aunque este se utiliza en exceso se recomienda verificar si se puede reducir parte de este exceso. Para que el efluente de Planta de Almidones Modificados que va hacia la PTER, posea menos contenido de fósforo del actual.
- ⊕ Se recomienda realizar análisis periódicos del proceso de elución (curva de elución de salmuera) de Planta de Agua, a fin de observar el desempeño del intercambio entre la salmuera y la resina, y para mantener la cantidad de cloruros generada bajo inspección.
- ⊕ En la medida de lo posible se sugiere crear drenajes o alcantarillas de fácil acceso en las descargas de cada una de las plantas de la corporación, de manera de facilitar el muestreo en caso de que se presenten futuros problemas.
- ⊕ Se recomienda solicitar cotizaciones a otros proveedores de coagulantes y membranas, a fin de tener más opciones de evaluación.
- ⊕ Si en algún momento se considera reutilizar la sal proveniente de la corriente de rechazo se debe remover en primer lugar el calcio presente, ello se logra

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

por el tratamiento con químicos, específicamente mediante dosificación de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a fin de convertir el cloruro de calcio en cloruro de sodio (sal) y precipitar el calcio en forma de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta solución se debe pasar por un filtro para remover este compuesto precipitado.

## **CAPÍTULO VII**

### **RECOMENDACIONES**

A fin de mejorar tanto el desempeño actual como la viabilidad de las propuestas generadas en este Trabajo Especial de Grado, se realizan las siguientes recomendaciones:

- ⊕ Revisar si la cantidad de compuesto fosfatado utilizado para la elaboración de los almidones modificados es la necesaria, aunque este se utiliza en exceso se recomienda verificar si se puede reducir parte de este exceso. Para que el efluente de Planta de Almidones Modificados que va hacia la PTER, posea menos contenido de fósforo del actual.
- ⊕ Se recomienda realizar análisis periódicos del proceso de elución (curva de elución de salmuera) de Planta de Agua, a fin de observar el desempeño del intercambio entre la salmuera y la resina, y para mantener la cantidad de cloruros generada bajo inspección.
- ⊕ En la medida de lo posible se sugiere crear drenajes o alcantarillas de fácil acceso en las descargas de cada una de las plantas de la corporación, de manera de facilitar el muestreo en caso de que se presenten futuros problemas.
- ⊕ Se recomienda solicitar cotizaciones a otros proveedores de coagulantes y membranas, a fin de tener más opciones de evaluación.
- ⊕ Si en algún momento se considera reutilizar la sal proveniente de la corriente de rechazo se debe remover en primer lugar el calcio presente, ello se logra

### *Presentación y Discusión de los Resultados*

---

por el tratamiento con químicos, específicamente mediante dosificación de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a fin de convertir el cloruro de calcio en cloruro de sodio (sal) y precipitar el calcio en forma de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Esta solución se debe pasar por un filtro para remover este compuesto precipitado.