



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN PARA**  
**AGUAS EUTROFICADAS PRESENTES EN LA PLANTA DE**  
**POTABILIZACIÓN DR. ALEJO ZULOAGA**

Prof. Olga Martínez  
Tutor Académico

Ing. Abnel Estaba  
Tutor Industrial

Autoras:  
HERNÁNDEZ, María  
C.I.: 18.316.992  
SISCO, María  
C.I.: 17.554.897

Valencia, 08 de junio de 2011

**DEDICATORIA**

**A DIOS TODO PODEROSO** que me permitió alcanzar esta meta tan anhelada en mi vida y que me brindó salud y protección siempre.

**A MIS PADRES** que me han apoyado siempre, me han brindado amor y comprensión en los momentos cuando más lo he necesitado.

**A MIS HERMANOS,** que han creído en mí y que son un ejemplo de perseverancia y un modelo a seguir.

**A MIS FAMILIARES,** que me han apoyado siempre y me han dado ánimos para finalmente alcanzar la meta de graduarme.

**A LA FAMILIA MÁRQUEZ RIVAS,** que me ha recibido en su casa tantas veces y me adoptaron como parte de ella.

**A MIS AMIGOS DE LA UNIVERSIDAD,** que me apoyaron siempre, estudiaron conmigo y con los que compartí muy buenos momentos dentro y fuera de la universidad.

**A TODAS LAS PERSONAS,** que me han brindado su amistad incondicional y desinteresada, contribuyendo a mi formación personal y convirtiéndose en mi familia.

**A MIS AMIGAS DE LA RESIDENCIA,** que me han apoyado en cada momento que lo he necesitado y me han animado para seguir adelante.

**María Laura Hernández**

**DEDICATORIA**

**A DIOS**, por darme salud e iluminarme en los momentos difíciles de mi carrera, y sobre todo por haber cumplido una de mis metas.

**A MIS PADRES ANTONIO SISCO Y MARÍA DE SISCO**, por ser mi pilar, mis amigos y mis maestros en todo momento.

**PAPI**, aunque ya no estés con nosotras, sabes que este logro es por ti. No sabes cuánto te extraño y te amo.

**MAMI**, gracias por estar siempre allí, aunque soy fuerte de carácter, casi siempre has sabido llevarme, también este logro es tuyo, te quiero muchísimo.

**A MIS HERMANAS MARIAN Y MARIOLIS**, por estar allí en todo momento, por guiarme y apoyarme.

**A MÍ A SOBRINA MIRANDA**, por ayudarme en el momento en que su abuelo nos abandonó físicamente.

**A MI CUÑADO HUGO**, por su apoyo en los malos y buenos momentos.

**A MI SEGUNDA MADRE AMÉRICA DE LÓPEZ**, por cuidarme y estar allí desde que era una bebé.

**A MIS TÍOS LUIS Y NILDA**, por su comprensión y cariño brindado.

**A MI PRIMO Y HERMANO LUIS ALEJANDRO**, por su confianza, su cariño, por estar en los momentos buenos y en los difíciles.

**A MI ABUELA JUANA**, que aunque ya no estás físicamente, siempre estarás en mi corazón. Te quiero.

**A MI COMPAÑERA MARÍA LAURA**, por todos esos malos ratos que te hice pasar, espero que me disculpes, gracias por tu apoyo, dedicación y paciencia.

**A MIS TUTORES OLGA MARTÍNEZ Y ABNEL ESTABA**, por su apoyo, dedicación, asesoría y confianza.

**A MIS AMIGOS LIGIA, MARÍA P., MARIEXY, YANSY, MELVIN, ALEXANDRA, SHEILA, ANDREINA, ALBERTO, ROSANA, EVELYN, ROSA, CESAR, CIELO, OSDELI, JOSEFINA, LEONOR, OSCAR Y DEMÁS AMIGOS**; gracias por su apoyo, confianza, cariño, enseñanzas y sobre todo por su amistad, no me quejo de ustedes. Son excelentes personas.

**A MIS PADRINOS ALFREDO SOSA Y TOMÁS COLMENARES**, por estar pendiente de mi, a lo largo de mi vida.

De verdad que les agradezco a todos por estar siempre allí, por sus enseñanzas, confianza, sabiduría, honestidad, apoyo y amistad. Los quiero mucho.

**María Alejandra Sisco**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A HIDROCENTRO C.A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO**, por darnos la oportunidad de desarrollar este trabajo de grado en las instalaciones de la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga.

**A LOS INGENIEROS MARINA DE ESTABA Y ABNEL ESTABA**, por facilitarnos el ingreso a la planta con el fin de obtener nuestro tema de tesis, y lograr desarrollar los análisis necesarios para la investigación. Además fueron y son un apoyo significativo para nosotras, a lo largo de la tesis y en lo personal.

**A LOS INGENIEROS: ROGER, FARINA, CARMEN, BERNABÉ**, por apoyarnos siempre que los necesitábamos y por estar pendiente de nosotras en esos meses de trabajo allí en la planta.

**A LOS OPERADORES, A LAS ANALISTAS Y A LA CONTRATISTA**, por toda su colaboración brindada durante los meses de ensayos.

**A LA LICENCIADA LORENA**, por asesorarnos en un objetivo de la tesis, y sobre todo por estar en su hora de almuerzo ayudándonos.

**A NUESTROS PADRES**, por apoyarnos incondicionalmente en cada paso de nuestras vidas y por todo su amor.

**A NUESTROS AMIGOS DEL GRUPO ECOLÓGICO AMBIENTAL (GEA)**, por enseñarnos a crecer no solo profesionalmente sino también como persona, por todos sus consejos y ayuda en el instante preciso. Por darnos una oportunidad de formar parte de su grupo y por ser nuestra familia. Se les quiere.

**A LA PROF. OLGA MARTÍNEZ** por aceptar ser nuestra tutora, por su disposición y por guiarnos para la culminación de este trabajo especial de grado.

**A TODOS NUESTROS FAMILIARES Y AMIGOS** que de una u otra forma estuvieron a nuestro lado en el desarrollo de este trabajo de investigación y por la ayuda brindada. A todos gracias.

**Las Autoras**

## **RESUMEN**

El crecimiento demográfico e industrial de la región central del país ha acarreado consecuencias intrínsecas referentes a la eutrofización acelerada de la fuente principal de abastecimiento de agua para su posterior potabilización, tal es el caso del embalse Pao Cachinche. Esto a su vez dificulta el abastecimiento de agua potable, debido a la creciente demanda.

El objetivo de esta investigación es generar una propuesta para el mejoramiento de la calidad y aumento de la producción de agua potable, generando las menores modificaciones a la infraestructura civil presente. En tal sentido, fue necesaria la descripción global del proceso de eutrofización, seguida de la evaluación del sistema convencional presente en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, determinando las similitudes de las etapas presentes con valores teóricos típicos del sistema convencional y por último se identificaron varias propuestas, contemplando desde la eliminación de algas en el afluente, inserción de un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), creación de humedales y cosecha de macrófitas, para mejorar la calidad e incrementar la producción de agua potable. Seleccionándose la inserción de un sistema DAF, para reemplazar la etapa de sedimentación del sistema convencional de potabilización, comprobando su factibilidad tanto técnica como económica.

Esta investigación permitió determinar la factibilidad económica de la propuesta seleccionada, siendo el resultado rentable, esto indica que el sistema DAF es la mejor alternativa para la potabilización del agua, cuando el afluente está eutroficado.

*Palabras clave: eutrofización, sistema DAF, factibilidad.*

## **SUMMARY**

Population and industrial growth development of the central region of the country has brought inherent consequences relating to accelerated eutrophication of the main water source for further purification, as is the case of Pao Cachinche. This in turn hinders the potable water supply due to a growing demand.

The objective of this research is to generate a proposal for the improving quality and increasing production of potable water, generating minimal modifications to the civilian infrastructure. In this regard, it required an overall description of the process of eutrophication, followed by the evaluation of the conventional system established in the purification plant Dr. Alejo Zuloaga, determining the similarities of the present stages with the theoretical typical values of the conventional system and finally identified a number of proposals contemplated the elimination of algae in the effluent, insertion of a dissolved air flotation (DAF), creation of wetlands and macrophyte harvest to improve quality and increase production of potable water. Selecting the insertion of a DAF system to replace the sedimentation stage of the conventional water treatment system, proving its technical and economic feasibility.

The investigation determined the economic feasibility of the proposal selected, the result being unprofitable attributable to the high costs involved in the purification of water when the effluent is eutrophic.

Key words: eutrophication, DAF, system, feasibility.

## INTRODUCCIÓN

La eutroficación es un problema que está atacando a los cuerpos de agua a nivel mundial, debido a las altas cargas de nutrientes que se generan antropogénicamente mediante las actividades del hogar, industriales, agrícolas, pecuarias, entre otras.

El impacto ambiental que tiene la eutroficación en los cuerpos de agua, llevan a las plantas de tratamiento de agua potable a búsquedas de alternativas para tratar los tipos de aguas que en la actualidad presentan los embalses.

Por la situación expuesta anteriormente, la **Planta de Potabilización Dr. Alejo Zuloaga** se ha visto en la necesidad de buscar dichas alternativas para el tratamiento de las aguas provenientes del embalse Pao Cachinche y así brindarle a la población mejor calidad y mayor producción de agua.

El presente trabajo de investigación, tiene como objetivo proponer una mejora del proceso de potabilización para aguas eutrofizadas presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga con la finalidad de mejorar la capacidad de producción y su calidad de agua.

Éste trabajo se desarrollará mediante un diagnóstico al tratamiento de agua potable, para así identificar la etapa que genera mayor inconveniente en el proceso. Después se generarán las propuestas para solucionar el problema y seleccionar la(s) mejor(es) alternativa(s) para cumplir con la finalidad de la investigación. Luego se finalizará la investigación, realizando los ensayos pertinentes, para corroborar que la(s) alternativa(s) sea rentable y generen los resultados exigidos para cumplir con las normas sanitarias de Venezuela.

La relevancia de éste trabajo viene dada por el hecho de lograr una adaptación del sistema convencional presente, para el tratamiento de aguas eutrofizadas, generando las menores modificaciones en la infraestructura civil de la planta. De igual manera se incrementa la producción de agua potable, requerida para satisfacer la demanda.

Es importante señalar la reducción de costos a largo plazo, mediante la disminución de productos químicos (coagulantes, desinfectantes, entre otros) para el proceso de potabilización.

El tipo de investigación es de campo con proyecto factible, por tanto, en una primera aproximación es necesaria la recaudación de datos, para posteriormente determinar la propuesta de mejora, realizando también su diseño y posteriormente identificar su factibilidad técnica y económica.

Este trabajo está constituido por cuatro capítulos. El primero de ellos contempla el planteamiento del problema así como también una descripción de la situación actual y deseada, el objetivo general y los objetivos específicos, justificación y limitaciones de la investigación. En el segundo capítulo, se denotan una serie de antecedentes además de los fundamentos teóricos que sirven de soporte a la investigación. El tercer capítulo, describe los procedimientos y métodos realizados para el logro de los objetivos, planteados. Finalmente el cuarto capítulo exhibe las discusiones y resultados obtenidos en el análisis de la alternativa seleccionada. Adicionalmente se presenta una sección contentiva de las conclusiones y recomendaciones más importantes del estudio.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Formulación del problema	10
1.2.1 Situación actual	11
1.2.2 Situación deseada	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Justificación	13
1.5 Limitaciones	14
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes	15
2.2 Fundamentos teóricos	
2.2.1 Calidad del agua	18
2.2.2 Naturaleza del color	20
2.2.3 Proceso de tratamiento del agua	22
2.2.4 Tipos de coagulantes	26
2.2.5 Características de un flóculo	27
2.2.6 Eutroficación	27
2.2.7 Coloides	31
2.2.8 Cianobacterias	33
2.2.9 Flotación	34
2.2.10 Estudio económico	44

**CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de investigación	46
3.2 Etapas de la investigación	47
3.3 Procedimientos de la investigación	48
3.3.1. Describir la condición eutrófica del embalse Pao Cachinche, considerando modelos matemáticos que describan el proceso de eutroficación	48
3.3.2 Describir los procesos convencionales de potabilización utilizados en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga	50
3.3.3 Comparar los parámetros de diseño de la infraestructura presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, con los parámetros típicos nominales usados en estos procesos	51
3.3.4 Proponer las alternativas para la mejora del proceso de potabilización	53
3.3.5 Seleccionar la(s) alternativa(s) para mejorar la calidad del efluente de la planta de potabilización	54
3.3.6 Estudiar la factibilidad técnico-económica de la(s) alternativa(s) seleccionadas	61

**CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS**

4.1 Describir la condición eutrófica del embalse Pao Cachinche, considerando modelos matemáticos que describan el proceso de eutroficación	62
4.2 Describir los procesos convencionales de potabilización utilizados en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga	70
4.3 Comparar los parámetros de diseño de la infraestructura presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, con los parámetros típicos nominales usados en estos procesos	72
4.4 Proponer las alternativas para la mejora del proceso de potabilización	81

4.5 Seleccionar la(s) alternativa(s) para mejorar la calidad del efluente de la planta de potabilización	87
4.6 Estudiar la factibilidad técnico-económica de las propuestas seleccionadas	94
<b>CONCLUSIONES</b>	103
<b>RECOMENDACIONES</b>	106
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	107
Apéndice A. Cálculos típicos	112
Apéndice B. Tablas y figuras bibliográficas	125
Apéndice C. Resultados experimentales	131
Apéndice D. Análisis de flotación	139
<b>ANEXOS</b>	153

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>CAPÍTULO II. Marco teórico</b>	
Tabla 2.1. Clasificación de los compuestos responsables del color en el agua	21
Tabla 2.2. Propiedades de los coagulantes más comunes	26
<b>CAPITULO IV. Discusiones y resultados</b>	
Tabla 4.1. Parámetros para determinar condición eutrófica	69
Tabla 4.2. Ficha técnica de la etapa de coagulación	74
Tabla 4.3. Ficha técnica de la etapa de floculación	75
Tabla 4.4. Ficha técnica de los sedimentadores	76
Tabla 4.5. Ficha técnica de los filtros	77
Tabla 4.6. Parámetros típicos del proceso convencional	79
Tabla 4.7. Matriz de selección	88
Tabla 4.8. Comparación de etapa de sedimentación vs flotación	95
Tabla 4.9. Valores promedios de parámetros físico-sanitarios	96
Tabla 4.10. Cantidad de sustancias químicas anuales y ahorros esperados para la planta de estudio	99
Tabla 4.11. Flujos monetarios desde el año 0 hasta los 5 años de vida del proyecto	99

Tabla 4.12. Presupuesto	100
-------------------------	-----

**Apéndice A**

Tabla A.1. Costo de equipos a utilizar	114
--	-----

Tabla A.2. Cantidad de sustancias químicas anuales y ahorros esperados para la planta de estudio	121
--	-----

Tabla A.3. Flujos monetarios de los 5 años de vida del proyecto	122
---	-----

**Apéndice B**

Tabla B.1. Valores límites de la OCDE para un sistema completo de clasificación trófica	125
---	-----

Tabla B.2. Índice de floculación de Willcomb	126
--	-----

Tabla B.3. Clasificación de las aguas tipo 1	127
--	-----

Tabla B.4. Características del agua subtipo 1 B	128
---	-----

Tabla B.5. Límites recomendados para la turbiedad	128
---	-----

Tabla B.6. Componentes relativos a la calidad organoléptica del agua potable	129
--	-----

Tabla B.7. Componentes inorgánicos del agua potable	130
---	-----

**Apéndice D**

Tabla D.1. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	138
--	-----

Tabla D.2. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	139
--	-----

Tabla D.3. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	140
Tabla D.4. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	141
Tabla D.5. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	142
Tabla D.6. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	143
Tabla D.7. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	144
Tabla D.8. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	145
Tabla D.9. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	146
Tabla D.10. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	147
Tabla D.11. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	148
Tabla D.12. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	149
Tabla D.13. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF	150

Tabla D.14. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF 151

Tabla D.15. Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF 152

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>CAPÍTULO I. Planteamiento del problema</b>	
Figura 1.1. Diagrama de bloques de la planta convencional, Dr. Alejo Zuloaga	6
Figura 1.2. Diagrama de bloques de la planta Degremont, Dr. Alejo Zuloaga	9
<b>CAPÍTULO II. Marco teórico</b>	
Figura 2.1. Ángulo entre la superficie del sólido y la burbuja de gas	35
Figura 2.2. Sistema de flotación por aire disuelto. Presurización parcial del efluente	38
Figura 2.3. Sistema de flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente.	38
Figura 2.4. Sistema de flotación por aire disuelto. Presurización de la recirculación	39
<b>CAPÍTULO IV. Discusión y resultados</b>	
Figura 4.1. Ubicación del punto de captación de la torre toma selectiva	69
Figura 4.2 Diagrama de especificación de puntos para determinación de parámetros de diseño	77
Figura 4.3 Diagrama de flujo de la alternativa seleccionada	92
<b>Apéndice B</b>	
Figura B.1. Comparador del tamaño del floc, según Water Research Institute de Inglaterra	126
<b>Apéndice C</b>	
Figura C.1. Esquema del balance de masa para fósforo (lago completamente mezclado)	132



## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1. Planteamiento del problema**

El sistema de acueductos del estado Carabobo está conformado por dos sistemas de bombeos conocidos como Sistema Regional del Centro I (SRC-I) y Sistema Regional del Centro II (SRC-II).

El SRC-I fue diseñado para suministrar agua potable a las poblaciones ubicadas en el estado Carabobo. Su fuente principal de abastecimiento es el embalse Pao Cachinche de  $145 \times 10^6 \text{ m}^3$ , el agua allí almacenada se envía por gravedad a la estación de bombeo Cachinche, para luego ser impulsada hasta la planta potabilizadora Dr. Alejo Zuloaga, en donde se inicia el proceso de potabilización y, posteriormente, su distribución. Como segunda y tercera fuente auxiliar de abastecimiento se encuentran el embalse Guataparo y el dique toma río Torito.

Por otra parte, el SRC-II suministra agua al estado Aragua y algunas parroquias del estado Carabobo, mediante dos conexiones del antiguo Sistema Regional del Centro I. Su fuente de abastecimiento es el embalse Pao La Balsa, ubicado en Las Galeras del Pao, municipio El Pao de San Juan Bautista, en el estado Cojedes. Para su tratamiento el agua de este embalse, es bombeada a la planta Lucio Baldó Soules, ubicada en Boquerón, Estado Carabobo.

En ésta investigación, se incluyen al Sistema Regional del Centro I y la problemática que se desarrolla en sus procesos potabilizadores para disponer sus aguas aptas para el consumo humano.

El Embalse Pao Cachinche, se encuentra ubicado en la región centro norte (9°53' N – 68°08' W), en el límite entre los estados Carabobo y Cojedes, cerca de la ciudad de Valencia; con aguas afluentes de los ríos Paito y Chirgua, en las cuencas alta y media del río Pao. Éste cuenta con una cota de 353 m.s.n.m., ocupando un área de 16.100.000 m<sup>2</sup> y un volumen de 200.000.000 m<sup>3</sup>, su profundidad media es de 10,6 m.

La planta de potabilización “Dr. Alejo Zuloaga”, construida en 1973, se encuentra ubicada en el sector San Luis, del municipio Valencia, estado Carabobo, y pertenece a la C.A. Hidrológica del Centro; ésta cuenta con una capacidad nominal de 8.500 L/s; divididas en dos instalaciones diferentes respecto a la tecnología utilizada. La planta original funciona con un sistema convencional de potabilización, diseñada con una capacidad nominal de 3.000 L/s, y la llamada planta Degremont, con una capacidad de 5.500 L/s. En la actualidad, la planta opera con el 100 % de su capacidad instalada.

### **1.1. Descripción del problema**

En la superficie de la cuenca alta y media del río Pao se encuentra el embalse Pao Cachinche, donde se han desarrollado múltiples actividades antrópicas con éxito, dejando un cúmulo de pasivos ambientales, incidentes hoy en día, en la calidad de las aguas que fluyen por la cuenca y, en particular, las contenidas en sus embalses construidos para aprovechar el buen rendimiento de ésta, estimado en 3.600 L/s, con propósitos de aprovechamiento para abastecimiento de agua potable para el consumo.

Los pasivos ambientales son referidos a los usos consuntivos del agua presente en la cuenca, sin tomar en cuenta elementos sustentables, tales

como, la calidad de las aguas que se alojan en estos embalses. En la actualidad, la misma es considerada de difícil potabilización utilizando procesos típicos comercializados. Esta situación representa un problema de dimensiones incalculables, dada la importancia demográfica de esta cuenca y considerando el aumento anual de la demanda de agua potable.

En la presente investigación es concerniente la evaluación del efecto de las actividades antropogénicas en los cuerpos de agua, en especial en la cuenca del río Pao, formada por las subcuencas: Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro. En las que se encuentra ubicado el embalse Pao Cachinche y son sus principales aportantes.

La ubicación del embalse en la zona central del país, la hace atractiva para el asentamiento de urbanismos, así como también de industrias. En las inmediaciones de las subcuencas que conforman al río Pao, existe una gran cantidad de emplazamientos urbanos, dentro de los que se mencionan: Tinaquillo, Valencia, San Diego, Tocuyito, industrias ubicadas en los estados Cojedes - Carabobo; entre otras, cuyas aguas servidas, concurren al embalse Pao Cachinche, originando su contaminación.

Éste embalse en la actualidad presenta una gran actividad poluente, debido a la presencia de vertidos contaminantes, ricos en nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, que permiten el crecimiento de algas (fitoplancton y microplancton). Las características del embalse han sido modificadas debido a la proliferación de las algas, pues; las mismas, al morir consumen el oxígeno molecular disuelto, transformando el agua en anóxica.

Con el pasar de los años las aguas del embalse han sido clasificadas de diferentes maneras. En primer lugar, era tipo 1-A (éstas aguas sólo requieren un proceso de desinfección). Seguidamente, se calificó como tipo 1-B (necesitan sólo un tratamiento convencional). En la actualidad se clasificó como tipo 1-C (estas aguas exigen tratamientos especiales). Adicionalmente, en un estudio realizado en junio del 2000, los autores clasificaron al embalse

como hipereutrófico, por la alta concentración de nutrientes, presentes en sus aguas.

Debido a lo expuesto anteriormente, el proceso convencional presente en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga no se encuentra en condiciones para obtener la calidad del efluente requerido; por lo que es necesario evaluar sus procesos físico-químicos para definir alternativas que coadyuven a mitigar los posibles procesos afectados.

Los dos sistemas que conforman la planta son el convencional, y Degremont, ambos poseen varias etapas, para la potabilización del agua, aunque actualmente se han implementado algunos procesos adicionales, para tratar las agua tipo 1-C.

La primera planta es un sistema convencional de potabilización de agua, de tecnología americana (ver figura 1.1). Ésta comprende una serie de etapas para cumplir el tratamiento necesario y así, obtener agua apta para el consumo humano. Se debe especificar que las etapas de color verde, son aquellas que se han adicionado y, se desarrollaran al final. Mientras que, las de color azul, corresponden a las etapas propias del proceso convencional.

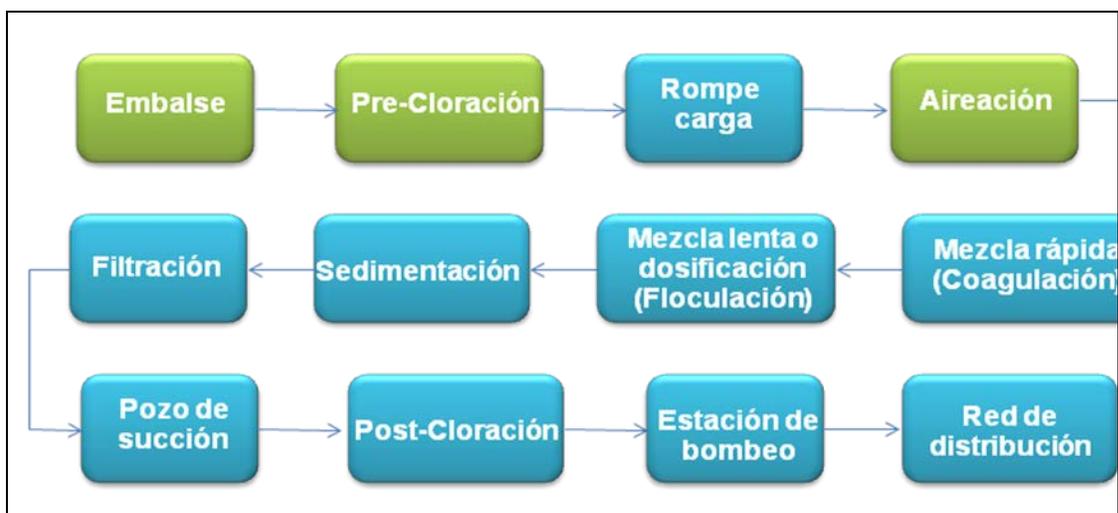


Figura 1.1. Diagrama de bloques de la planta convencional Dr. Alejo Zuloaga.

Las etapas que conforman dicha planta, se describen a continuación:

✓ **Rompe carga:** en ésta estructura se atenúa la velocidad del agua cruda proveniente del embalse; también su objetivo es reducir la presión existente en las líneas de conducción y generar un flujo laminar por diferencia de nivel al resto de las unidades.

✓ **Mezcla rápida o coagulación:** ésta etapa consiste en contrarrestar las fuerzas de repulsión que dan origen a un lento agrupamiento de las partículas coloidales mediante la adición un coagulante el sulfato de aluminio, neutralizando así las cargas coloidales, permitiendo que las partículas se adhieran cuando hacen contacto. Adicionalmente se dosifica el carbón activado para la eliminación de olores y sabores característicos del agua cruda.

✓ **Mezcla lenta o floculación:** consiste en aprovechar las colisiones que se dan entre las partículas desestabilizadas durante la conducción del agua por los canales de estos tanques, formándose “flóculos”. La agitación se da mecánicamente, para incrementar la frecuencia de los choques, mejorando las características de tamaño y densidad de los aglomerados.

✓ **Sedimentación:** es el proceso utilizado para separar el agua clarificada de los flóculos, debido a la mayor densidad, provocando su depósito en el fondo de los tanques, mientras el líquido asciende y se recolecta en la parte superior.

✓ **Filtración:** es el proceso de remoción final de partículas no decantadas, aquí se eliminan las partículas que no alcanzaron a separarse en el sedimentador. Dicha etapa consiste en permear por gravedad el agua

sedimentada, a través de un lecho filtrante compuesto de antracita, arena y grava de diferentes granulometría, de manera tradicional (de arriba hacia abajo), reteniéndose los sólidos por su baja densidad o por ser de geometría irregular no fueron separados del agua.

✓ **Pozo de succión:** almacena transitoriamente el agua potabilizada antes de enviarla a la red de distribución, y también se aplica la post-cloración.

✓ **Post-Cloración:** se aplica con la finalidad de garantizar una concentración de cloro residual, impidiendo la proliferación de organismos patógenos.

✓ **Estación de bombeo:** el agua procesada en ambas plantas se unen para su posterior distribución.

✓ **Red de distribución:** es la última etapa del proceso de abastecimiento, aquí el agua ya tratada en ambas plantas, es distribuida en los municipios de los estados Carabobo y Cojedes.

✓ **Embalse:** como se describió anteriormente, es el embalse Pao Cachinche, en esta etapa se inyecta oxígeno gaseoso, y también una aireación al agua contenida en esta cuenca. Es una etapa adicional, por las condiciones del agua.

✓ **Pre-Cloración:** consiste en aplicar gas cloro a una corriente de agua, formando ácido hipocloroso oxidando los organismos infecciosos presentes en ella (bacterias patógenas, virus, algas, protozoarios). Esta etapa se adicionó al tratamiento con el objeto de oxidar la materia orgánica.

✓ **Aireación:** ésta etapa se adicionó al proceso de tratamiento y, es necesaria para proporcionar oxígeno al agua que se quiere tratar.

Por otra parte, la segunda planta es tecnología europea desarrollada por Degremont C.A. (ver figura 1.2), este proceso de potabilización comprende diferentes etapas de tratamiento (al igual que la figura anterior es importante señalar que las etapas de color verde se incorporaron al proceso y, se desarrollaran al final. Mientras que las etapas de color azul, son las etapas propias de la tecnología Degremont).



Figura 1.2. Diagrama de bloques de la planta Degremont, Dr. Alejo Zuloaga.

La planta de Degremont, consta de las siguientes etapas:

✓ **Obra de llegada:** se realiza el mejoramiento de las condiciones físico-químicas del agua cruda procedentes del embalse, aplicando aireación, estabilización del flujo, desarenación y la dosificación química.

✓ **Decantación:** es un proceso físico-químico que aprovecha el crecimiento de los coágulos a través del contacto con una masa uniforme de

lodo, reteniendo los sólidos o impurezas del agua, en esta etapa se utilizan decantadores acelerados o de contacto de fangos. Dado que, el encuentro de las partículas aumenta con su concentración en el agua, en los decantadores de fango se combina la floculación y la decantación en un aparato único, con este sistema se consiguen precipitados densos, generando un aumento de la velocidad ascensional del agua.

✓ **Mezcla rápida:** es un arreglo de salto hidráulico constituido por tres canaletas Parshall que aprovecha el cambio de sección transversal, para aumentar la velocidad del fluido y, de igual manera obtener una mejor dilución de los agregados químicos. En ésta etapa se agrega sulfato de aluminio, carbón activado y un polímero actuante como ayudante en el proceso de coagulación. Etapa que se adiciona para el mejoramiento del agua a tratar.

Las siguientes etapas, filtración, post-cloración, estación de bombeo, red de distribución, embalse y pre-cloración, cumplen la misma función de la planta convencional.

## **1.2. Formulación del problema**

La planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, trata las aguas provenientes del embalse Pao Cachinche, dichas aguas son potabilizadas en un proceso convencional de tratamiento de aguas, para luego ser suministradas a los municipios Naguanagua, Valencia, Libertador, San Diego y los Guayos. El embalse Pao Cachinche no cuenta con un agua óptima para el proceso utilizado, sino con aguas eutrofizadas; ya que, las aguas tienen alta concentración de nutrientes, que permiten el crecimiento de algas.

Debido a esto, la planta requiere una evaluación del proceso convencional utilizado actualmente para tratar el agua presente en dicho embalse y la generación de posibles alternativas para mitigar los daños presentes.

### **1.2.1. Situación actual**

Las demostradas condiciones del afluente de la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, trae como consecuencia que el proceso convencional de potabilización instalado en la planta no cumpla con sus funciones de manera eficiente. Dado que, no es el adecuado para las aguas eutrofizadas presentes en el embalse Pao Cachinche.

En la etapa de mezcla lenta, las impurezas interactúan con los químicos, y las partículas se desestabilizan, chocan, se juntan y, por gravedad van descendiendo al fondo de tres grandes tanques de sedimentación, formándose de esta manera los “flóculos”.

Actualmente los elementos poluentes no sedimentan en su totalidad, estos flotan a diferentes niveles de profundidad y por ende no pueden ser eliminados. Allí es donde se encuentra el problema de tratar aguas eutrofizadas en un proceso de potabilización convencional.

De continuar esta situación, la calidad del efluente de la planta Dr. Alejo Zuloaga seguirá disminuyendo considerablemente, y habría un gran incremento en los costos de potabilización. En un cuerpo de agua cerrado, el proceso de eutrofización puede terminar por convertir al cuerpo de agua en tierra firme. Esto ocurre porque los nutrientes que ingresan masivamente al sistema generan una gran biomasa de organismos de vida generalmente efímera, al morir se acumulan sobre el fondo y no son totalmente consumidos por organismos degradadores (especialmente bacterias).

### **1.2.2. Situación deseada**

Una vez expuestos los motivos, se observa la necesidad de realizar esta investigación. Se desea proponer la adecuación y uso de procesos no convencionales de potabilización de agua, a fin de mejorar la calidad del efluente de la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, por entes certificados y utilizando la Normativa Ambiental Vigente, para aguas eutrofizadas. Sin la necesidad de modificar la infraestructura civil de la planta.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general:**

Proponer la mejora del proceso de potabilización para aguas eutrofizadas presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga.

#### **1.3.2. Objetivos específicos:**

- ❖ Describir la condición eutrófica del embalse Pao Cachinche utilizando modelos matemáticos que describan el proceso de eutrofización.
- ❖ Describir los procesos convencionales de potabilización utilizados en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga.
- ❖ Comparar los parámetros de diseño de la infraestructura presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, con los parámetros típicos nominales usados en estos procesos.
- ❖ Proponer las alternativas para la mejora del proceso de potabilización.

- ❖ Seleccionar la(s) alternativa(s) para mejorar la calidad del efluente de la planta de potabilización.
- ❖ Evaluar la factibilidad técnico-económica de la(s) alternativa(s) seleccionadas.

#### **1.4. Justificación**

El embalse Pao Cachinche ubicado entre los estados Carabobo y Cojedes, principal fuente de abastecimiento de agua para la ciudad de Valencia, ha sido clasificado como hipereutrófico, a consecuencia de una serie de factores contribuyentes al aporte excesivo de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno, producto de las actividades realizadas alrededor del mismo y a la imposibilidad de una oxidación natural de la materia orgánica por acción del viento, como consecuencia de la topografía circundante, generando impactos potenciales en las propiedades físicas, químicas y biológicas de este cuerpo de agua, ocasionando un desarrollo de fitoplancton, de plantas acuáticas y una marcada estratificación térmica y química. Esta situación ha impactado negativamente al proceso de potabilización en la planta Dr. Alejo Zuloaga, abastecida por este embalse, provocando principalmente, un incremento en el requerimiento de sustancias químicas tales como: cloro, sulfato de aluminio, carbón activado, cal y polímeros, garantes de la calidad del agua a ser distribuida.

De igual manera la investigación tiene importancia desde el punto de vista de la formulación de acciones coadyuvantes al aumento de la calidad de vida de todos los carabobeños, al garantizar el suministro de agua potable, que a su vez disminuiría la aparición de enfermedades hídricas, entre las que se encontrarían la Diarrea, Cólicos, Hepatitis y Dermatitis, entre otras.

En vista de esto, la población debe desarrollar consciencia en lo referente a la calidad de agua del efluente de la planta de potabilización Dr. Alejo

Zuloaga. En tal sentido, éste trabajo de investigación podrá contribuir a la difusión de la problemática planteada, siendo la Universidad de Carabobo, un pilar fundamental para un logro de tal envergadura.

### **1.5. Limitaciones**

La presente investigación evidencia como limitaciones, la observación de datos estadísticos, de parámetros físico-químicos y organolépticos, concernientes a la calidad del afluente y efluente provenientes de la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, así como también el tiempo necesario para realizar el estudio experimental.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

En ésta sección se presentarán las bases teóricas que ayudarán a la comprensión de cada uno de los capítulos a desarrollar más adelante.

#### **2.1 Antecedentes**

En ésta sección se presentarán soportes teóricos que respaldan la investigación partiendo de trabajos especiales de grado, tesis doctorales, investigaciones, documentos científicos nacionales e internacionales, entre otros que sostienen cierta reciprocidad con el problema planteado y descrito con anterioridad.

Hernández y Toro. Realizaron su trabajo de grado en una actualización de los procedimientos para la caracterización físico-química de aguas y aguas residuales en el Laboratorio de Calidad Ambiental. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Carabobo. Venezuela. 2007. La investigación se realizó con la firme intención de expandir sus horizontes para que el mismo sea un lugar académico de excelencia, para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil y demás miembros del Alma Mater; para ello se valieron de una revisión bibliográfica y la comparación entre los procedimientos usados

en el manual de laboratorio y los propuestos en el dicha actualización, acordes con las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable (Ministerio de Sanidad y Asistencia Social, publicado en Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 Extraordinario de fecha 13 de febrero de 1998) y las Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos (Decreto 883 del 11 de Octubre de 1995 publicado en Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021 Extraordinario de fecha 18 de diciembre de 1995); los cuales arrojaron cambios relevantes, logrando así un sistema de gestión ambiental y la modernización del Laboratorio de Calidad Ambiental.

González, Matos, Ortaz y Peñaherrera. Desarrollaron un trabajo de fitoplancton de un embalse tropical hipereutrófico (Pao Cachinche, Venezuela): abundancia, biomasa y producción primaria. Universidad Central de Venezuela. Venezuela. 2004. Realizaron estudios de las condiciones físicas y químicas del embalse Pao Cachinche, caracterizándose por la presencia de una estratificación térmica estable, por la presencia de condiciones permanentes de hipoxia y anoxia y por las altas concentraciones de nutrientes en sus aguas.

Chalar y De León. Estudiaron la abundancia y diversidad del fitoplancton en el embalse Salto Grande. Ciclo estacional y distribución espacial. Argentina-Uruguay. 2003. El objetivo fue la relación con el ciclo estacional y los parámetros físicos y químicos del embalse de Salto Grande, caracterizándose por una abundancia variada y mostrando una diversidad con un patrón inverso.

Casanova, Medina, Olivet, Rojas y Sarmiento. Investigaron sobre los trihalometanos (THM) en el agua potable del estado Carabobo. Departamento de Ingeniería Sanitaria, Universidad de Carabobo. Venezuela.

2003. El sistema de acueductos del estado Carabobo está conformado por dos sistemas de bombeos conocidos como Sistema Regional del Centro I (SRC-1) y Sistema Regional del Centro II (SRC-II) que permiten la distribución de agua potable a la población. El SRC-I está formado por la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga y el embalse Pao Cachinche; mientras que el SRC-II está formado por la planta Lucio Baldo Soules y el embalse Pao La Balsa. Como conclusión se determinó que en la zona en estudio existe un riesgo de efectos adversos para la salud por la presencia de THM en agua de consumo humano especialmente en la Red Baja y Red San Diego del SRC-I.

Rodríguez, Ruíz y Vertíz. Estudiaron los procesos de eutroficación en siete lagunas urbanas de Villahermosa. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, DACB. Tabasco, México. 1992-1994. El estudio se desarrollo por medio de un programa de monitoreo físico-químico, en el cual establecieron sus principales rasgos de eutroficación artificial. Los parámetros ambientales que permitieron caracterizar los niveles de eutroficación fueron el fósforo total, los ortofosfatos y el nitrógeno amoniacal y total. La ciudad de Villahermosa cuenta con más de 300,000 habitantes, lo cual ha determinado que en sus lagunas urbanas existan niveles de alerta por eutroficación, como en el caso de las lagunas De las Ilusiones y El Espejo, en las cuales se observaron los niveles más elevados de nutrientes. En ambos vasos lacustres el fósforo total rebasó los 4.1 mg/L, que caracteriza a cuerpos de agua eutróficos e hipertróficos. El origen por contacto se identificó como el predominante en las siete lagunas estudiadas, lo cual determinó una morfología dendrítica y escasa mezcla hidráulica en los vasos lacustres. Esta situación impide los recambios de agua y favorece la persistencia de sustancias conservativas y no conservativas en la fase acuática. Se estableció una propuesta para el control de los procesos de eutroficación, la

misma que se baso en la eliminación de los aportes municipales, mediante un drenaje perimetral que impediría el vertido de aguas residuales a los cuerpos lagunares y en procedimientos de biomanipulación de los afloramientos algales.

Martino y Salas. Desarrollaron las metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales de América Latina y el Caribe. 1981-1990. El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), centro especializado de la Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS), llevaron a cabo, desde 1981, un programa regional para el desarrollo de metodologías simplificadas de eutroficación. Aparentemente, la mayoría de los lagos/embalses de la región están limitados por fósforo. Un sistema de clasificación de estado trófico de lagos cálidos tropicales y un modelo simplificado de fósforo total se ha desarrollado con datos recopilados en la región, y han sido verificados contra embalses africanos. Los modelos preliminares de clorofila "a" y de nitrógeno total aún requieren de mayor desarrollo.

## **2.2 Fundamentos Teórico**

### **2.2.1 CALIDAD DEL AGUA**

Dado que las características que definen al agua son: organolépticas, físicas, químicas, biológicas y bacteriológicas, las normas de calidad del agua potable (Gaceta Oficial N° 36.395, 1998), fijan los límites máximos deseables y los límites máximos permisibles de los diferentes parámetros que conforman las cinco características mencionadas.

Desde el punto de vista físico, el agua debe tener una turbiedad y color mínimo, debe ser inodora e insípida. Los contaminantes químicos corrientes

son metales pesados como hierro, manganeso, plomo, mercurio, arsénico, cobre, cinc, compuestos nitrogenados tales como amoníaco, nitrito y nitrato, carbonato de calcio y magnesio, aniones como cloruro, fluoruro, sulfato y silicatos y las mencionadas, sustancias orgánicas. Aparte de estas sustancias, existen otros contaminantes de carácter antropogénico tales como cianuros, fenoles, cromo y detergentes (Cárdenas, 2000).

En cuanto al aspecto bacteriológico la presencia de bacteria coliformes en el agua indican que hay microorganismos que pueden causar enfermedades, conocidos como microorganismos patógenos. Las bacterias coliformes son un grupo de microorganismos que se encuentran normalmente en la zona intestinal de los seres humanos y de otros animales de sangre caliente, y en el agua superficial. Cuando estos organismos se detectan en agua potable esto sugiere que la contaminación procede de una fuente superficial.

Según Colmenares (2002), los parámetros más importantes a considerar para asegurar la calidad del agua son los siguientes:

❖ **Color:** refleja la presencia de materia en estado de solución que proviene de la descomposición y extracción acuosa de la vegetación; así como también la existencia de sustancias orgánicas coloreadas (ácidos húmicos, metales como el hierro y el manganeso entre otros), proporcionando una idea de la calidad del agua. Se consigue la decoloración por coagulación, por absorción con carbón activado y por oxidación. Se mide con un colorímetro, teniendo un máximo permisible 15 U.C. Pt-Co en el agua tratada.

❖ **Turbiedad:** la medición de este parámetro permite tener una idea del contenido de materia en suspensión. Se manifiesta por la reducción de transparencia y brillantes del agua (dispersión y absorción de la luz por la

presencia de material en suspensión), eliminándose por medio de coagulación y clarificándose por sedimentación seguida de filtración. El agua tratada debe tener una turbiedad máxima de 5 NTU; esto debido a que la turbiedad disminuye el grado de efectividad de la desinfección con cloro pudiéndose enmascarar microorganismos potencialmente peligrosos así como también por razones estéticas.

❖ **pH:** el pH de una solución es el logaritmo negativo de la actividad de iones hidrógeno. En una solución diluida, la actividad de los iones hidrógeno es aproximadamente igual a la concentración de iones hidrógeno. Aunque este parámetro no tiene significado higiénico, es un dato muy importante en la determinación de la agresividad del agua (corrosión), y es fundamental en el control del proceso de Coagulación-Floculación ya que el pH ácido aumenta la solubilidad de los precipitados. El agua tratada debe estar en un rango de 6,5 a 8,5 de acuerdo a gaceta oficial de 1998 de potabilización del agua.

❖ **Alcalinidad:** es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos y se debe principalmente a la presencia de sales y ácidos débiles y fuertes. Se necesita cierta concentración de alcalinidad para promover el proceso de coagulación con sales de aluminio, de no haber suficiente alcalinidad, habrá que agregarle en forma de cal u otra sustancia alcalinizante. Aunado a esto, el agua debe contener una mínima concentración de alcalinidad para evitar problemas de corrosión.

### **2.2.2 NATURALEZA DEL COLOR**

La aparición del color en el agua puede deberse a:

- a. La extracción producida por el agua de sustancias provenientes de maderas.
- b. La solución de productos de descomposición de las maderas.
- c. La solución de materia orgánica del suelo.
- d. Una combinación de estos procesos.

Cualquiera que sea su origen, el conjunto de compuestos responsables de color, recibe el nombre de *sustancias húmicas*. Si bien la estructura molecular de dichas sustancias no es bien conocida, se sabe que básicamente contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en porcentajes variables, y que muestran propiedades ácidas con pesos moleculares que van desde 200 hasta más de 50.000. Se clasifican en cuatro fracciones: *ácido fúlvico*, *ácido húmico*, *ácido himatomelánico* y *carbón húmico*. Sus propiedades se presentan en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Clasificación de los compuestos responsables del color en el agua**

Sustancia	Proporción en el agua (%)	Solubilidad	Peso Molecular	Composición (%)		
				C	H	N
Ácido fúlvico	58 – 86	Soluble en álcali. No precipita en ácidos		54,87 – 59,32	5,56 – 6,47	0,57 – 2,41
Ácido húmico	3,8 – 16,2	Soluble en álcali y precipita con HCl. Precipita en alcohol.	< 50.000	39 - 51	4,52 – 4,80	11,86 – 2,36
Ácido himatomelánico	10,2 – 32,2	Soluble en álcali y precipita con HCl. Precipita en alcohol	800	-		
Carbón húmico		Insoluble en álcali		-		

Fuente: Packhan, (1964)

### **2.2.3 PROCESO DE TRATAMIENTO DEL AGUA**

A pesar de la definición química del agua como sustancia constituida exclusivamente por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, en la naturaleza no se encuentra nunca en ese grado de pureza sino que está siempre impurificada, debido al conjunto de propiedades, que hacen que el agua sea un excelente disolvente de sales y gases. Esta situación aunada a otros factores, exige la aplicación de tratamientos que permiten eliminar estas impurezas del agua, en especial si está destinada al consumo humano. Estos tratamientos son (Romero, 1999):

#### **❖ COAGULACIÓN**

En esta etapa se realiza la dispersión del coagulante en toda la masa de agua a tratar. Esta dispersión debe ser lo más homogénea posible, con el objeto de desestabilizar a todas las partículas presentes en el agua, y optimizar el proceso de coagulación que se lleva a cabo en esta unidad. La coagulación es el proceso más importante de una planta de filtración rápida; de este proceso depende la eficiencia de todo el sistema. No importa que los demás procesos sean sumamente eficientes; si la coagulación es mala, el tratamiento es malo.

La eficiencia de la coagulación depende de la dosificación y de la mezcla rápida. En la unidad de mezcla, la aplicación del coagulante debe ser constante y debe distribuirse uniformemente en toda la sección de aplicación, donde debe existir una fuerte turbulencia para la mezcla del coagulante y la masa de agua se dé en forma instantánea.

La mezcla rápida puede realizarse aprovechando la turbulencia provocada por dispositivos hidráulicos o mecánicos (Capena, 1992).

✓ **Unidades hidráulicas**

Dentro de este tipo de mezcladores se pueden citar, entre los más utilizados por su simplicidad y eficiencia, los siguientes: canales con cambio de pendiente, canaletas Parshall, vertederos rectangulares y triangulares, difusores o inyectores.

✓ **Unidades mecánicas**

La mezcla rápida mecanizada es más eficiente cuando se emplean agitadores tipo turbina.

❖ **FLOCULACIÓN**

En esta unidad se proporciona a la masa de agua una agitación lenta que debe promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que salgan de ella. La energía que produce la agitación del agua puede ser de origen hidráulico o mecánico.

✓ **Unidades hidráulicas**

Entre las unidades de este tipo se pueden citar: las unidades de flujo horizontal o vertical, floculadores tipo Alabama o Cox, floculadores de medios porosos, floculadores de mallas o telas.

✓ **Unidades mecánicas**

En estas unidades el flujo de agua se hace circular por tanques provistos de agitadores accionados mediante energía eléctrica y convenientemente compartimentalizados para evitar la formación de espacios muertos y cortocircuitos. Estas unidades pueden variar dependiendo de la posición del eje y del tipo de agitador utilizado. En el primer caso, se tienen unidades

horizontales y verticales, y en el segundo flocladores de paletas y de turbinas (Capena, 1992).

### ❖ **SEDIMENTACIÓN**

Es la operación que tiene por finalidad remover las partículas salidas de una suspensión mediante la fuerza de gravedad.

En tratamiento de aguas, existen dos formas de sedimentación.

#### ✓ **Sedimentación simple**

Generalmente es un tratamiento primario para reducir la carga de sólidos sedimentables antes de la coagulación; en esos casos se le conoce como presedimentación.

#### ✓ **Sedimentación después de coagulación y floculación o ablandamiento.**

Se usa para remover los sólidos sedimentables que han sido producidos por el tratamiento químico, como en el caso de remoción de color y turbiedad o en el ablandamiento con cal.

#### ✓ **Tipos de Sedimentadores**

- **Sedimentador tipo 1:** se refiere a la remoción de partículas discretas no floculentas en una suspensión diluida.
- **Sedimentador tipo 2:** se refiere a la sedimentación de suspensiones diluidas de partículas floculentas, en las cuales es necesario considerar las propiedades floculentas de la suspensión junto con las características de asentamiento de las partículas.

- **Sedimentador zonal:** describe la sedimentación másica y se refiere al proceso de sedimentación en suspensiones de concentración intermedia de material floculento, en las cuales se presenta un asentamiento interferido debido a la cercanía entre partículas.
- **Compresión:** ocurre cuando la concentración aumenta a un valor en que las partículas están en contacto físicos unas con otras y el peso de ellas es sostenido parcialmente por la masa compactada (Capena, 1992).

### ❖ FILTRACIÓN

Los filtros son las unidades más complejas de una planta de tratamiento de agua. Su correcta concepción depende de la interrelación entre las características de la suspensión afluyente y las características del medio filtrante, para que predominen los mecanismos de filtración apropiados que darán como resultado la máxima eficiencia posible mediante la aplicación de este proceso (Capena, 1992).

Sus características son las siguientes:

- ✓ **Sistemas de lavado y limpieza:** consiste, convencionalmente, en hacer pasar agua ascensionalmente a través del lecho filtrante, a una velocidad tal que los granos del medio filtrante se muevan a través del flujo ascensional, se froten unos contra otros y se limpien de los depósitos de mugre formados sobre ellos (Romero, 1999).

Los tipos de sistemas son: lavado con agua en sentido ascendente, lavado con agua en sentido descendente y lavado auxiliar superficial o subsuperficial.

- ✓ **Lavado con aire y agua** (Capena, 1992).
- ✓ **Sistema de drenaje:** su función es promover una distribución uniforme del agua de lavado; además sirve para recoger el agua filtrada.

Existen diferentes tipos de drenajes: fondo falso con boquillas, fondo Wheeler, tuberías perforadas, bloques Leopold (Romero, 1999).

- ✓ **Vigas prefabricadas** (Capena, 1992).
- ✓ **Recolección de agua de lavado:** se hace a través de un canal principal (frontal, lateral o central), en el cual descargan las canaletas recolectoras (Capena, 1992).
- ✓ **Tasas de filtración:** depende de varios factores como: tipo de suspensión afluente, (agua sedimentada, coagulada, prefloculada, con o sin uso de polímero auxiliar, color verdadero, turbidez, número de microorganismos, etc.), granulometría y espesor del medio filtrante, métodos de operación de los filtros, eficiencia del lavado, uso del agua filtrada, entre otros (Capena, 1992).

#### 2.2.4 TIPOS DE COAGULANTES

Los coagulantes metálicos (el alumbre y las sales de hierro), han sido los más empleados en la clarificación del agua. Añadidos al agua, forman especies cargadas positivamente en el intervalo de pH de 6 a 7. Esta reacción de hidrólisis produce aluminio gelatinoso insoluble o hidróxido férrico. Aún cuando inicialmente no haya sólidos suspendidos en el agua, los coagulantes metálicos forman flóculos que enredan a los coloides desestabilizados. En la tabla 2.2, se pueden observar las propiedades de algunos coagulantes.

**Tabla 2.2. Propiedades de los coagulantes más comunes**

Nombre común	Fórmula	Peso equivalente	pH al 1 %	Disponibilidad
Alumbre	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	100	3,4	Terrón – 17 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ Líquido – 8,5 % $\text{Al}_2\text{O}_3$

**Tabla 2.2. Propiedades de los coagulantes más comunes. (Continuación)**

Nombre común	Fórmula	Peso equivalente	pH al 1 %	Disponibilidad
Cal	$\text{Ca(OH)}_2$	40	12	Terrón – como CaO Polvo – 93-95 % Lodo – 15-20 %
Cloruro férrico	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	91	3-4	Terrón – 20 % Fe Líquido -20 % Fe
Sulfato férrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	51,5	3-4	Granular -18,5 % Fe
Caparrosa verde	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	139	3-4	Granular -20 % Fe
Aluminato de sodio	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$	100	11-12	Escama -46 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ Líquido -2,6 % $\text{Al}_2\text{O}_3$

Fuente: Kemmer, (2000)

### 2.2.5 CARACTERÍSTICAS CUALITATIVAS DE UN FLÓCULO

❖ **Tamaño del floc producido:** puede expresarse su tamaño en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra (ver figura B-1) o según el índice de Willcomb (ver tabla B-2). Esta determinación es bastante subjetiva y depende del criterio del observador.

❖ **Tiempo inicial de formación del floc:** es el tiempo que tarda en aparecer el inicio de formación del floc. No suele ser fácil, pues el floc recién formado suele ser incoloro. Por otra parte el floc que se forma primero no necesariamente es el mejor.

### 2.2.6 EUTROFICACIÓN

En lagos y embalse, la eutroficación consiste en el enriquecimiento de nutrientes de planta, principalmente fósforo y nitrógeno, que ingresan como

solutos y están ligados a partículas orgánicas e inorgánicas. El crecimiento abundante de plantas acuáticas a menudo deteriora la calidad del agua.

La eutroficación de las aguas continentales es uno de los problemas ambientales más comunes y ejerce impactos ecológicos, sanitarios y económicos significativos y negativos en un recurso primario finito: agua. El agua pura y dulce es esencial para muchos organismos y para las sociedades humanas, cuya existencia se ve amenazada cuando su calidad se deteriora.

Los lagos y embalses pueden clasificarse, en general, en ultraoligotróficos, oligotróficos, mesotróficos, eutróficos o hipereutróficos según la concentración de nutrientes en el cuerpo de agua y/o según las manifestaciones ecológicas de la carga de nutrientes. Cuando las aguas poseen en promedio una cantidad de fósforo total equivalente al 10 % y un nivel de clorofila de 6 %, se dice que su estado es ultraoligotrófico. Los lagos y embalses oligotróficos se caracterizan por bajos aportes de nutrientes y de productividad primaria, alta transparencia y biota diversa. El estado mesotrófico se refiere a aquellos lagos que reciben moderadas cantidades de nutrientes provenientes de su cuenca. El fitoplancton y otros organismos acuáticos no son muy abundantes. Las aguas eutróficas tienen altos aportes de nutrientes y productividad primaria, baja transparencia y gran biomasa de pocas especies con mayor proporción de cianobacterias. Los lagos y embalses hipereutróficos representan la última etapa del proceso de eutroficación donde las aguas reciben nutrientes de fuentes difusas o no puntuales incontrolables, que producen el crecimiento de algas de manera exponencial (Redfield, 1955).

## ❖ CAUSAS

El proceso de eutrofización de un embalse puede ocurrir como un fenómeno enteramente natural, hasta el punto de que se le ha dado en llamar por algunos, como un proceso de “envejecimiento” del embalse. Un cuerpo de agua puede llegar a ser eutrófico, es decir, rico en nutrientes y con alta productividad, en base a aportes de nutrientes enteramente naturales.

Estos aportes naturales pueden ser externos, materia de origen vegetal, animal o mineral, rica en nutrientes, arrastrada por los ríos tributarios y drenajes naturales; y/o internos, como sería el reciclaje rápido de nutrientes desde los sedimentos, lo cual puede ocurrir al cabo de muchos años en forma natural cuando la productividad de las aguas ha conducido a la acumulación de sedimentos orgánicos ricos en nutrientes.

Para que un lago cumpla lo que podría llamarse ciclo de vida normal mediante un proceso de eutrofización o envejecimiento enteramente natural, se requieren usualmente cientos, puede que hasta miles de años. Pero ocurre que los nutrientes contenidos en los desechos provenientes de las actividades humanas ocasionan una aceleración de ese proceso de envejecimiento. Es decir, el problema comienza al acelerarse el proceso, la rata de eutrofización, por efecto de adiciones de nutrientes provenientes de las actividades del hombre. Por ello se ha dado en llamar “eutrofización cultural” esta aceleración del proceso, este enriquecimiento adicional con nutrientes provenientes de actividades humanas, a diferencia de “eutrofización natural”.

Cuando se habla de nutrientes de plantas, tienen un interés muy especial el nitrógeno (N) y el fósforo (P), más que todo porque son los que pueden hacerse limitantes para los productores primarios. Hay otros factores nutricionales, sin embargo, que pueden ser de gran importancia en una

situación dada, tales como los compuestos de azufre, el CO<sub>2</sub> o microelementos como hierro, manganeso, etc. (Parra, 1977).

### ❖ INDICADORES

Uno de los indicadores de que está ocurriendo un proceso acelerado de eutroficación en un cuerpo de agua, es el florecimiento de algas de diverso tipo. Los nutrientes que entran al agua son fijados y utilizados en el nivel de producción primaria (y, por supuesto, en la cadena alimentaria), a través de reacciones biológicas en las que es usada la energía solar (fotosíntesis) y, al aumentar las concentraciones de nutrientes, hay más proliferación de productores primarios, siendo los más comunes las algas verde-azules, formando natas en la superficie del agua. Esta superproducción de algas da lugar a que el sistema disponga de más materia orgánica en la biomasa de los productos primarios, de la que pueden consumir los consumidores del ecosistema. El exceso va a dar al sedimento donde sufre descomposición biológica, desencadenando diversas alteraciones en el ecosistema, incluyendo la regeneración de nutrientes hacia las aguas para contribuir aún más a la aceleración de todo el proceso de eutroficación (Porcella, 1975; Lonholdt, 1976).

Puesto en otras palabras, se altera el balance entre fotosíntesis y respiración, pasando de una diversidad de organismos fotosintéticos y respiratorios a un ecosistema reactor de sólo unas pocas especies que aparecen en números excesivos. La capacidad de los organismos predadores es sobrepasada.

La transparencia de las aguas disminuye y su color cambia. El contenido de oxígeno disuelto (OD) de las aguas sufre pronunciadas oscilaciones entre el día y la noche y eventualmente hay disminución general en las concentraciones de OD en las capas hipolimnéticas y se producen

interferencias y desbalances en las interrelaciones normales existentes entre los eslabones y entre los diferentes niveles tróficos de la cadena alimentaria, con los consiguientes cambios cualitativos y cuantitativos en la fauna acuática – béntica, plantónica, peces - (Vollenweider, 1971; Porcella, 1975; Lonholdt, 1976).

#### ❖ EFECTOS

- ✓ Floraciones de algas.
- ✓ Toxinas algales.
- ✓ Crecimiento de plantas acuáticas.
- ✓ Anoxia.
- ✓ Cambios en la especie.
- ✓ Aumento del reciclaje interno de nutrientes.
- ✓ Concentraciones elevadas de nitrato.
- ✓ Mayor producción ictícola.
- ✓ Interacciones nutriente-acidificación.
- ✓ Interacciones nutriente-contaminantes.

#### 2.2.7 COLOIDES

Son partículas con dimensiones menores de 1  $\mu\text{m}$ . El término coloide significa originalmente “gelatinoso” y se debe a las dispersiones de proteínas, al comprobar que no se comportan como verdaderas soluciones (Arboleda, 2000).

Los coloides se pueden clasificar en (Arboleda, 2000):

❖ **Coloides moleculares:** están constituidas por sustancias polímeras, formadas por largas cadenas orgánicas, con pesos moleculares muy grandes (15000 – 100000) y tamaños entre  $10^2$  y  $5 \times 10^2$  m $\mu$  de longitud

por 0,2 y 1  $\mu\text{m}$  de grosor, por ejemplo: la gelatina, proteínas, almidón, entre otros, dispersados molecularmente.

❖ **Coloides de asociación o micelares:** son aquellos formados por asociación de moléculas más pequeñas de minerales (ejemplo: oro) o compuestos orgánico (ejemplo: jabones, detergentes), que espontáneamente se aglutinan en presencia de un dispersante en partículas de tamaño coloidal.

❖ **Coloides liofílicos (hidrofílicos):** están constituidos por dispersiones moleculares de sustancias poliméricas o sustancias aglutinadas en tamaño coloidal, que tienen una fuerte atracción por el solvente, y reaccionan químicamente con el agua (Ejemplo: jabones y materia orgánica).

❖ **Coloides liofóbicos:** están formados por sustancias insolubles en el dispersante (ejemplo: arcillas y metales) consideradas inestables, por tanto, son el tipo de dispersiones que más interesan en el tratamiento del agua potable.

❖ **Coloides dioturnos** (término propuesto por Mysels 1959, que significa larga duración), son aquellos que no se modifican o se aglutinan durante mucho tiempo comparado con el período de observación.

❖ **Coloides caducos:** son aquellos transitorios que se aglutinan o cambian rápidamente.

❖ **Coloides orgánicos:** representados por las proteínas y las grasas.

❖ **Coloides inorgánicos:** representados por metales (oro) y arcillas minerales.

### **2.2.8 CIANOBACTERIAS**

Las cianobacterias (cyanobacteria, "azul") son un filo del reino bacteria (único dominio del mismo nombre) que comprende las bacterias capaces de realizar fotosíntesis oxigénica y, en algún sentido, a sus descendientes por endosimbiosis, los plastos. Son los únicos procariotas que llevan a cabo ese tipo de fotosíntesis, por ello también se les denomina oxifotobacterias (oxyphotobacteria). Dichas cianobacterias son en general organismos fotosintetizadores, pero algunas viven heterotróficamente, como descomponedoras, o con un metabolismo mixto (Limona, 1985).

Las cianobacterias comparten con algunas otras bacterias la habilidad de tomar el  $N_2$  del aire, donde es el gas más abundante, y reducirlo a amonio ( $NH_4^+$ ), una forma de nitrógeno que todas las células pueden aprovechar. Los autótrofos que no pueden fijar el  $N_2$ , tienen que tomar nitrato ( $NO_3^-$ ), que es una sustancia escasa; este es el caso de las plantas. La enzima que realiza la fijación del nitrógeno es la nitrogenasa, que es inhibida por el oxígeno, con lo cual se hace incompatible con la fotosíntesis y, por tanto, en muchas cianobacterias los dos procesos se separan en el tiempo, realizándose la fotosíntesis durante las horas de luz y la fijación de nitrógeno solamente por la noche. Algunas especies han solucionado el problema mediante los heterocistes, unas células más grandes y con una pared engrosada con celulosa y que se encargan de la fijación del nitrógeno; en los heterocistes no hay fotosistema II, de modo que no hay desprendimiento de oxígeno y la nitrogenasa puede actuar sin problemas (Jimeno, 2009).

Las cianobacterias colonizan numerosos ecosistemas terrestres y acuáticos. Sin embargo, en ambientes acuáticos es donde especialmente se agregan, dando lugar a formaciones típicas conocidas como floraciones o blooms.

Estas proliferaciones en masa ocurren en aguas eutróficas ricas en nutrientes (particularmente fosfatos, nitratos y amoníaco) bajo temperaturas medianamente altas (15 a 30 °C) y donde el pH oscila entre 6 y 9. Con todo, las floraciones cianobacterianas necesitan aguas poco removidas y sin vientos para poder desarrollarse. Dichos blooms, resultan muy antiestéticos e indeseables en aguas de recreo ya que cambian el aspecto del agua y causan turbidez.

### **2.2.9 FLOTACIÓN**

Es un proceso de clarificación primaria que se emplea principalmente para el tratamiento de aguas de depósito ricas en nutrientes que pueden contener espesas floraciones de algas; para aguas de baja turbidez, baja alcalinidad y aguas coloreadas (Gregory, 2002).

Se utiliza el sistema de flotación cuando los sólidos presentes en las aguas, sedimentan deficientemente o no llegan a hacerlo debido a su bajo peso específico. Se entiende por flotación como el impulso ascendente de sustancias no disueltas provocado por burbujas de aire que se adhieren a la superficie de las sustancias suspendidas.

En la flotación interviene la diferencia entre la masa volumétrica de los sólidos o flóculos y la del líquido en que se encuentran en suspensión. Sin embargo, contrariamente a lo que ocurre en la decantación, este proceso de separación sólido-líquido únicamente se aplica a partículas que tienen una masa volumétrica real (flotación natural) o aparente (flotación provocada) inferior a la del líquido que la contiene.

En la flotación provocada, se aprovecha la capacidad que tienen ciertas partículas sólidas o líquidas para unirse a burbujas de gas (generalmente, aire) y formar conjuntos partícula-gas menos densos que el líquido que constituye la fase dispersa.

La resultante de las fuerzas (gravedad, empuje de Arquímedes, fuerza de resistencia) conduce a un desplazamiento ascendente de los conjuntos partícula– gas que se concentran en la superficie libre del líquido.

Para que sea factible la flotación de partículas sólidas o líquidas más densas que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido. Este contacto entre un sólido y un líquido se determina mediante la medida del ángulo formado por la superficie del sólido y la burbuja de gas (figura 2.1).

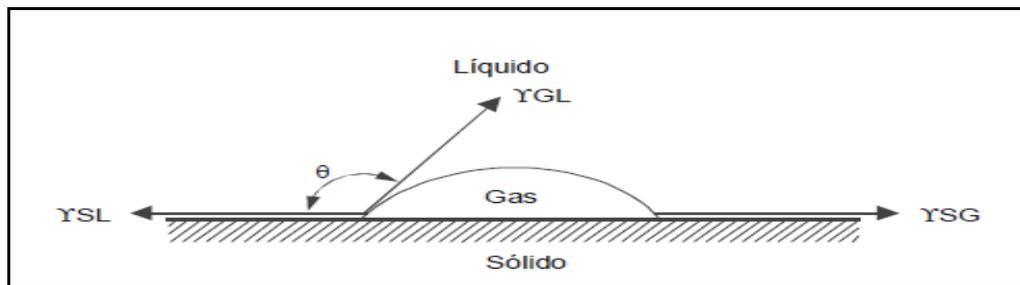


Figura 2.1. Ángulo entre la superficie del sólido y la burbuja de gas.

Fuente: Degremont, (1979)

Si  $\theta = 0$ , el contacto entre el sólido y el líquido se realiza de forma perfecta; es imposible la adherencia sólido-gas.

Si  $\theta = 180^\circ$ , el contacto entre el sólido y el líquido es nulo; es óptimo el contacto sólido-gas.

Se trata de un caso límite que nunca se da en la práctica, puesto que ningún líquido da un ángulo  $\theta$  mayor de  $110^\circ$  (caso del mercurio).

El ángulo  $\theta$  se puede aumentar mediante el uso de sustancias tensoactivas que forman una película hidrófoba alrededor de las partículas. Tales sustancias poseen en sus moléculas una parte no polar (hidrófoba) que es atraída por las burbujas de aire en ascensión y otra polar (hidrófila), que es

atraída por la fase dispersa. El empleo de sustancias espumantes también ha sido recomendado para formar una mezcla más estable de burbujas y partículas: tales sustancias tienen, además, la propiedad de reducir el tamaño de las bolas de aire, aumentando la superficie específica de las mismas, para proporcionar mayor capacidad de absorción y tiempo de contacto, ya que bolas de aire pequeñas poseen menores velocidades ascensionales.

Los mecanismos de contacto entre las bolas de aire y las partículas pueden resultar de las siguientes acciones:

a) Colisión entre la bola y la partícula, debido a turbulencia o a atracción entre ambas.

b) Aprisionamiento de las bolas contra los flóculos o contacto entre los flóculos que están sedimentando y las bolas de aire en ascensión.

c) Crecimiento de las bolas de aire entre los flóculos. Cuando se tienen partículas hidrofílicas, los mecanismos *b* y *c* parecen ser los responsables de la eficiencia de la flotación, en tanto que el mecanismo *a* parece predominar en la obtención de una ligazón más estable entre las bolas de aire y las partículas, las cuales requieren un cierto grado de hidrofobia.

## ❖ SISTEMAS DE FLOTACIÓN

Cualquier sistema de flotación debe presentar las siguientes características:

- ✓ Generación de bolas de tamaño apropiado en relación con las partículas que se desea remover.
- ✓ Adherencia eficiente entre las bolas de aire y las partículas en suspensión.
- ✓ Separación adecuada del material flotante.

La flotación puede ser realizada por aire disperso, por bolas generadas a través del proceso electrolítico y por aire disuelto, cuyas características principales son presentadas a continuación:

- **Flotación por aire disperso**

En estos sistemas usualmente se emplean rotores que promueven, simultáneamente, dispersión, aereación y agitación de la suspensión, con producción de bolas de aire que tienen cerca de un  $\mu\text{m}$  de diámetro. Es posible, también, el uso de un medio poroso para difundir el aire, aunque las bolas resultan con un diámetro mayor ( $\sim 50 \mu\text{m}$ ). La flotación por aire disperso comúnmente es utilizada en la industria minera.

- **Flotación electrolítica**

La oxidación anódica del ion cloruro de una suspensión con pH alrededor de 7,5 con producción de ion hipoclorito y oxígeno ha sido investigada como unidad de generación de las bolas en la flotación de suspensiones en las que fueron usados cloruro férrico como coagulante primario y polímero orgánico como auxiliar de floculación.

- **Flotación por aire disuelto**

La flotación por aire disuelto ha sido uno de los procesos más estudiados en el tratamiento de las aguas residuales. Actualmente, también ha sido muy investigado en el tratamiento de aguas de abastecimiento.

Hay tres tipos básicos de sistemas de flotación:

1. Con presurización parcial del afluente (figura 2.2);
2. Con presurización total del afluente (figura 2.3);
3. Con presurización de la recirculación (figura 2.4).

Entre los tipos de flotación mostrados en las figuras 2.2 a la 2.4, aquella con presurización de la recirculación es la más aconsejable en el tratamiento de las aguas, pues los flóculos podrían romperse en la bomba (Capena, 1992).

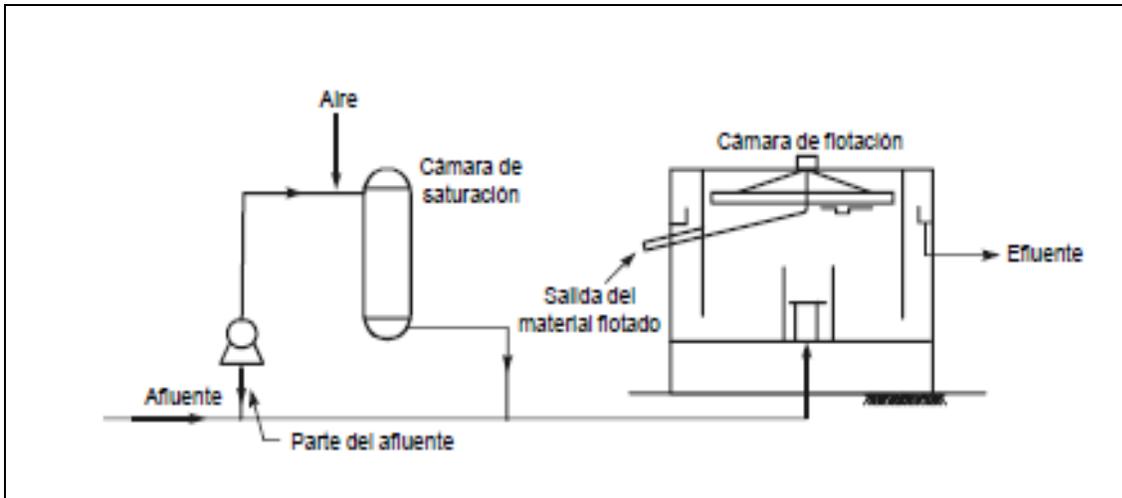


Figura 2.2. Sistema de flotación por aire disuelto. Presurización parcial del efluente.

Fuente: Capena, (1992)

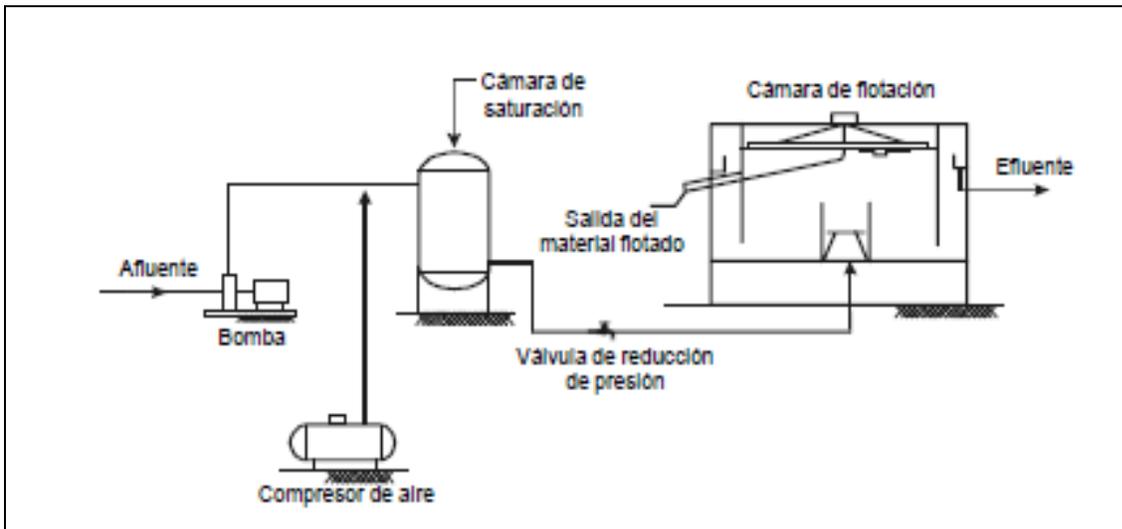


Figura 2.3. Sistema de flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente.

Fuente: Capena, (1992)

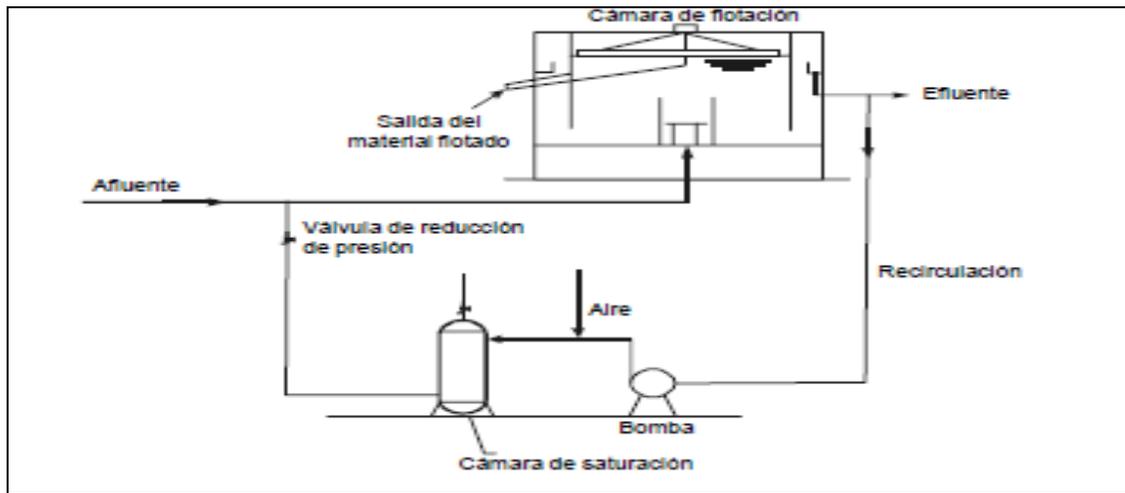


Figura 2.4. Sistema de flotación por aire disuelto. Presurización de la recirculación.

Fuente: Capena, (1992)

#### ❖ Descripción del proceso FAD:

El proceso de flotación por aire disuelto consta de las siguientes etapas:

✓ Mezcla rápida: es una etapa de mezcla de alta intensidad usada para dispersar el (los) coagulante(s) al iniciar el proceso de agregación de partículas. En el caso de sales metálicas hidrolizantes, el objetivo es dispersar rápidamente las sales de modo que ocurra el contacto entre los productos más simples de hidrólisis y las partículas, antes de que se haya formado el precipitado de hidróxido (Gregory, 2002).

✓ Floculación: en esta etapa se debe producir lenta agitación en el agua para permitir el crecimiento del floc. Este crecimiento es inducido por el contacto entre partículas de diámetro mayor de  $1 \mu$  creado por el gradiente de velocidad. Para el proceso FAD en particular, se requiere producir un floc pequeño (10 a  $30 \mu\text{m}$ ) y muy compacto que se adhiera fácilmente a las burbujas de aire, para lo cual es necesario que esté debidamente

desestabilizado, con potenciales cercanos a cero. El tiempo de retención puede ser más corto, del orden de 5 a 20 minutos. El gradiente de velocidad debe ser más alto que el de la floculación para sedimentación convencional, comúnmente de  $70 \text{ s}^{-1}$  para cualquier tipo de agua, a fin de producir un floc pequeño y duro (Arboleda, 2000).

✓ Inyección de aire: se debe extraer entre el 5 y 30 % del flujo tratado, presionándolo y sobresaturándolo con aire, para luego soltarlo dentro del tanque de flotación, a fin de que la súbita descompresión libere una gran cantidad de burbujas, de 1000 a 10.000 unidades por litro, entre  $10 \mu\text{m}$  y  $130 \mu\text{m}$  de diámetro. Como la concentración de partículas presentes en el agua es de 10-100 unidades por litro, se requiere alto número de partículas para poder atraparlas (Arboleda, 2000).

✓ Tanque de flotación: es una cámara circular o rectangular de baja altura en cuya superficie se acumula y compacta el material flotante, el cual es descargado a un canal o depósito de donde pasa al desagüe. El agua clarificada se toma por el fondo con un sistema de múltiples perforados (Arboleda, 2000).

La eficiencia de la remoción de partículas por flotación depende de:

- La concentración de partículas presentes en el agua.
- La profundidad del tanque de flotación.
- El coeficiente de adherencia que gobierne la unión entre la burbuja y la partícula.
- El volumen de aire en relación con el volumen de agua por tratar.
- El diámetro de la burbuja.

El diseñador tiene poco control sobre el tamaño de la burbuja, pero en cambio puede controlar el volumen de aire producido o su concentración en el agua, debido a que el número de burbujas es directamente proporcional a la presión, temperatura y rata de recirculación que se adopte, entendiéndose por rata de recirculación  $R$  la relación entre el flujo  $Q_r$  que se extrae del efluente para saturarlo con aire y mezclarlo con el flujo  $Q_p$  de la planta.

Burbujas muy pequeñas de 10  $\mu\text{m}$  se adhieren con más facilidad al floc, pero tienen una menor velocidad de ascenso, del orden de 4,3 m/d; en cambio, burbujas más grandes de 100  $\mu\text{m}$  suben más rápidamente, del orden de 432 m/d, pero no se adhieren muy bien a las partículas. Para lograrlo, la presión en el saturador debe estar entre 2 y 6  $\text{kgf/cm}^2$  y las ratas de recirculación deben estar entre 7 y 30 %. Generalmente, presiones superiores a 3,5  $\text{kgf/cm}^2$  son suficientes para desarrollar gran cantidad de burbujas.

Según Edzwarld y Malley (1991), valores de 5  $\text{kgf/cm}^2$  y recirculaciones de 8 % que producen concentraciones de hasta 4.600 unidades por litro, a 20 °C, son suficientes para la mayoría de las aguas. Aguas que sólo contengan algas pueden tratarse con 2.900 unidades por litro y recirculaciones del orden del 5 %.

## ❖ DISEÑO DE LAS UNIDADES DE FLOTACIÓN

### ✓ Saturador

El saturador es el corazón del proceso de flotación. Allí es donde se prepara el flujo de saturado de aire y, por eso, de su funcionamiento depende en buena parte el éxito del tratamiento.

Consiste en un tanque hermético a presión que puede o no estar parcialmente lleno de un lecho de celdillas (packed bed), por lo general plásticas, de propileno, que aumentan el área de contacto y facilitan así la transferencia de la fase gaseosa a la fase líquida. Éstas celdillas tienen

forma de anillos de 2,5 cm de diámetro u otras formas geométricas, y la profundidad de su lecho influye en el porcentaje de saturación que se logre, que puede estar entre 85 y 100 % para alturas entre 0,4 y 1,3 m. La carga hidráulica suele hacerse de 300 a 2000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d para presiones entre 4 y 5 kgf/cm<sup>2</sup>.

✓ Sistema de inyección en el tanque de flotación

Existe una variedad de sistemas de inyección del aire dentro de la cámara de flotación, que van desde simples compuertas hasta boquillas patentadas. Cualquiera que sea el sistema de inyección, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Debe presurizar en forma súbita el agua saturada de aire dentro de la cámara de flotación.
- Producir buena mezcla del caudal de recirculación con la masa de agua por tratar, a fin de hacer colisionar las burbujas con el floc sin romperlo; por eso, en instalaciones grandes se requiere una serie de orificios o boquillas.
- Evitar la erosión o cavitación del sistema de inyección, debido a la alta velocidad del flujo.

✓ Tanque o cámara de flotación

En aguas potables, por lo general, sólo se usa tanques rectangulares para poder colocar a la cabeza de ellos los floculadores, facilitando así el transporte del floc entre una unidad y otra, sin romperlo.

Su profundidad suele hacerse de 1,5 m, y su carga hidráulica, entre 200 y 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d, dependiendo del tamaño de las burbujas y la calidad y peso específico del floc producido. El tiempo de retención debe ser entre 5 y 15 minutos.

A la entrada del tanque de flotación debe dejarse una pantalla inclinada 60° para dirigir la corriente de agua saturada de burbujas hacia la superficie.

El material que se acumula en la superficie debe removerse a todo lo ancho del tanque por medio de un vertedero longitudinal. Esta operación puede hacerse en forma intermitente o continua. Para la remoción intermitente, se baja la cresta del vertedero o se cierra la salida para subir el nivel del agua en el tanque de flotación y obligar a desbordar el material que nada en la superficie hacia la canal de rebose. Esto sólo se puede hacer en instalaciones relativamente pequeñas, por el desperdicio de agua que produce la dilución de lodos con el alto volumen de agua utilizada para extraerlos, pero tiene, en cambio, la ventaja de disminuir la mecanización del sistema.

Para la remoción continua se usan diferentes mecanismos de arrastre superficial (raspadores o puentes) que viajan a lo largo del tanque y van empujando los flotantes dentro del canal de recolección. Si se regula bien la velocidad de estos equipos, se evita la rotura del material acumulado, lo que crea serios problemas, y, de este modo, se logra una extracción uniforme del flotante en óptimas condiciones (Arboleda, 2000).

#### ❖ LEY DE HENRY

La cantidad de aire que puede estar disuelta en agua está determinada por la ley de Henry, la cual establece que, para gases no ionizantes de baja solubilidad, el volumen disuelto en el agua varía con la presión absoluta. La cantidad de gas que teóricamente se liberará de una solución cuando la presión es reducida a la atmosférica es:

$$G_R = G_A \cdot \left( \frac{P_A}{14.7} - 1 \right)$$

donde:

$G_R$ : gas liberado, mg/L

$G_A$ : solubilidad del gas a la presión atmosférica, mg/L

$P_A$ : presión absoluta en el tanque de saturación, psia

Los valores obtenidos deberán ser corregidos por la eficiencia de la absorción del gas en el recipiente de saturación, la cual está influida por los tiempos de mezclado y de retención. La eficiencia fluctúa entre el 40 y el 60 %, de modo que la cantidad de gas liberado deberá ser alrededor de la mitad de la calculada por la fórmula anterior (Kemmer, 2000).

### **2.2.10 ESTUDIO ECONÓMICO**

Un estudio económico es aquel cuyo objetivo es determinar la factibilidad económica de los proyectos de manera de poder seleccionar la mejor alternativa de inversión. En consecuencia, este estudio constituye solamente una parte de los aspectos económico-financieros asociados con los proyectos tecnológicos.

#### **❖ Valor actual (VA)**

El valor actual expresa la rentabilidad de un proyecto de inversión en forma de una cantidad de dinero (Bs) en el presente ( $t=0$ ), que es equivalente a los flujos monetarios netos del proyecto a una determinada tasa mínima de rendimiento. En otras palabras, el valor actual representa el beneficio o pérdida equivalente en el punto cero de la escala de tiempo.

En virtud de que el valor actual de un proyecto es función de los flujos monetarios netos y, a la vez, estos últimos dependen de los costos e ingresos asociados, entonces:

$$VA(i) \approx 0$$

Lo que quiere decir que si:

$VA(i) > 0$  O los ingresos del proyecto superan a los costos, incluyendo la tasa mínima de rendimiento, en una cantidad de dinero equivalente a la magnitud del valor actual. En este caso, el proyecto genera un beneficio superior al mínimo exigido.

$VA(i) = 0$  O los ingresos y los costos del proyecto, incluyendo la tasa mínima de rendimiento son iguales, por lo que, el proyecto genera un beneficio igual al mínimo exigido.

$VA(i) < 0$  O los costos del proyecto, incluyendo la tasa mínima de rendimiento son superiores a los ingresos en una cantidad de dinero equivalente a la magnitud del valor actual. En este caso, el proyecto reporta una pérdida.

#### ❖ **Equivalente anual**

El equivalente anual es un modelo de características muy similares al valor actual por cuanto expresa la rentabilidad de un proyecto en forma de una serie anual uniforme (Bs/año) que es equivalente a los flujos monetarios netos del proyecto a una determinada tasa mínima de rendimiento. En consecuencia, el equivalente anual representa el beneficio o la pérdida equivalente en forma de una serie anual uniforme.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Este capítulo muestra el conjunto de métodos, técnicas e instrumentos que permitieron obtener la información básica para el cumplimiento de los objetivos de la investigación. De igual manera, se hace referencia a las técnicas y estrategias utilizadas para recolectar la información, así como también, los mecanismos utilizados para el manejo, análisis y presentación de los datos obtenidos en el estudio.

#### **3.1 Tipo de investigación**

El tipo de investigación desarrollado es de campo con proyecto factible, por tanto, en una primera aproximación es necesaria la recaudación de datos, para posteriormente determinar la(s) propuesta(s) de mejora e identificar su factibilidad técnica y económica.

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación se establecieron varias etapas que constituyeron las sinergias permitiendo el desarrollo y finalización exitosa de dicha investigación.

Según la Universidad Pedagógica Experimental Libertador, (2008) se entiende por investigación de campo, el análisis sistemático de problemas en la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender

su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos, o predecir su ocurrencia, haciendo uso de métodos característicos de cualquiera de los paradigmas o enfoques de investigación conocidos o en desarrollo.

Según Hurtado de Barrera, (2007) la investigación proyectiva intenta proponer soluciones a una situación determinada a partir de un proceso previo de indagación. Implica explorar, describir, explicar y proponer alternativas de cambio, más no necesariamente ejecutar la propuesta. Dentro de esta categoría entran los “proyectos factibles”. Todas las investigaciones que conllevan el diseño o creación de algo, con base en un proceso investigativo, también entran en esta categoría.

### **3.2 Etapas de la investigación**

En primer lugar se estableció una etapa de exploración del ámbito de la investigación, como lo es: ubicación geográfica y emplazamientos de las instalaciones, infraestructura instalada y su capacidad operativa o nominal, para describir de forma teórica algunos parámetros relacionados con las características del afluente de la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga; dentro de las que se seleccionaron: pH, nitrógeno amoniacal, fósforo, fitoplancton; entre otros, referidas al embalse Pao Cachinche. De igual manera, la fase exploratoria comprendió las características presentes en la planta en estudio y la descripción respectiva de los dos escenarios; tanto el afluente (Pao Cachinche) como el proceso de potabilización que se realiza considerando cada una de sus etapas.

La segunda etapa consistió en la comparación de las características determinadas con parámetros típicos nominales y mediante el análisis de los mismos, estableciendo la existencia de congruencias y/o incongruencias, que

coadyuven al logro de los objetivos para desarrollar una síntesis de la investigación.

Una vez establecidas las congruencias y/o incongruencias en los puntos de interés, se procedió a predecir posibles soluciones o alternativas para el mejoramiento del proceso de potabilización; estableciendo o identificando la mejor propuesta, considerando aspectos como la factibilidad económica; el tiempo necesario para su implementación y, finalmente, la última etapa a considerar estuvo basada en la implementación futura de la propuesta, para generar modificaciones a la infraestructura civil lo más leves posibles en el proceso y de esta manera confirmar la utilidad de la alternativa seleccionada; mediante una evaluación global de todo el proceso.

### **3.3 Procedimientos de la investigación**

Según los objetivos planteados, para la investigación en estudio, se seguirán las siguientes actividades por objetivo:

**3.3.1 Describir la condición eutrófica del embalse Pao Cachinche considerando modelos matemáticos que describan el proceso de eutroficación.**

**❖ Descripción de la ubicación geográfica de la cuenca del embalse Pao Cachinche, sus ríos tributarios y las afectaciones que han sufrido los mismos.**

En primer lugar se utilizó un GPS para determinar la ubicación de la cuenca del embalse Pao Cachinche. Seguidamente se realizó un recorrido por el embalse y sus adyacencias, para describir sus características y las de sus ríos tributarios. De igual manera se dieron a conocer los emplazamientos

cercanos a la cuenca, para así tener una idea del posible impacto que generan al embalse.

**❖ Revisión bibliográfica del proceso de eutroficación.**

Mediante una revisión bibliográfica se le dio un enfoque holístico al problema de la eutroficación para lograr una mejor comprensión del tema. Luego se realizó un análisis de los aspectos ambientales, sociales y culturales de la eutroficación y se describieron planes de acción para prevenir y/o remediar la eutroficación de lagos y embalses.

De igual manera se realizó la descripción de las causas, clasificación, efectos e indicadores de la eutroficación. Por último, se consideró la importancia del adecuado manejo de los recursos hídricos para garantizar la sustentabilidad de las comunidades.

**❖ Diagnóstico de la condición eutrófica del embalse a partir de una comparación de parámetros de la cuenca.**

A partir de los datos suministrados por la hidrológica se conoció el punto de muestreo ubicado en la cuenca del embalse, representado por la Torre Toma Selectiva.

Se creó una tabla comparativa donde se plasmaron los tipos de indicadores de la eutroficación (físico-químicos; y biológicos), los parámetros considerados y sus respectivos valores, a partir de estudios precedentes y los suministrados por la Gerencia de Captación, Tratamiento y Mantenimiento de la C.A. Hidrológica del Centro, para realizar una comparación y determinar el grado de eutroficación del embalse, utilizando criterios existentes, recopilados de fuentes bibliográficas.

❖ **Descripción de los modelos matemáticos utilizados para identificar la condición limnológica de lagos y embalses.**

Con base en el estudio de metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales del año 1990, se identificaron los modelos matemáticos propuestos por Henry Salas y Paloma Martinó para el análisis de la condición eutrófica.

**3.3.2 Describir los procesos convencionales de potabilización utilizados en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga.**

❖ **Revisión de la información bibliográfica concerniente al proceso en estudio.**

Considerando referencias bibliográficas se recopiló una gama de información referente a las etapas que constituyen un proceso convencional de potabilización de agua, permitiendo profundizar más en todas las propiedades a ser evaluadas en el agua y su influencia sobre el proceso de potabilización.

❖ **Reconocimiento de las etapas que conforman la planta de potabilización, a través de una visita y entrevistas con los ingenieros, técnicos y operadores de la planta.**

Se realizó un recorrido por todas las instalaciones de la planta, identificando los distintos procesos para el tratamiento de agua potable como son: Mezcla Rápida, Mezcla Lenta, Sedimentación y Filtración.

También se efectuaron entrevistas con los ingenieros de procesos, técnicos y operadores de la planta, con la finalidad de aclarar cualquier duda

concerniente al proceso, así como también para obtener información proveniente de la experiencia de dichas personas en torno al mismo.

De igual manera, durante la entrevista, se realizaron una serie de preguntas permitiendo completar la identificación de las etapas, sus dimensiones, las dosificaciones de sustancias químicas y variables de importancia para el desarrollo del proceso.

### **3.3.3 Comparar los parámetros de diseño de la infraestructura presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, con los parámetros típicos nominales usados en estos procesos.**

#### **❖ Descripción de los puntos para la determinación de los parámetros de diseño a evaluar en las etapas del proceso convencional.**

Los puntos para la determinación de los parámetros a evaluar fueron definidos tomando como criterio su efecto en la calidad del agua, además representan los principales indicadores de los resultados obtenidos en esta investigación. Para ello se definieron diagramas con la simbología respectiva de los procesos presentes en el caso estudio, con el objeto de discriminar los puntos que se consideraron pertinentes para la determinación de parámetros operativos

#### **❖ Descripción y actualización de parámetros del proceso convencional.**

Se procedió a revisar el manual de la planta, para realizar fichas técnicas de cada uno de los equipos del proceso de potabilización en la planta.

**❖ Recopilación de información teórica y legal de parámetros típicos usados en el proceso en estudio.**

Se realizó una revisión de las Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos (Gaceta N° 5.021) presente en la planta, Manual de Tratamiento de Aguas para Consumo Humano (CEPIS), Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable (Decreto N° 36.395). También comprendió las revisiones bibliográficas siguientes: Manual de Calidad y Tratamiento de Agua. Potabilización del Agua; Teoría y Práctica de la Purificación del Agua; permitiendo establecer las características del agua antes, durante y después del proceso de potabilización.

**❖ Determinación de los parámetros nominales de las etapas que integran el proceso de potabilización de agua.**

Se realizó una tabla especificando los valores de los parámetros en las diferentes etapas, así como también los valores bibliográficos utilizados en estos procesos.

**❖ Comparación de los resultados obtenidos con los parámetros establecidos en los decretos y leyes.**

De acuerdo a lo establecido en los decretos y leyes relacionados con agua potable, se realizó la comparación de los resultados de los parámetros obtenidos, contando con la colaboración de personal calificado de la planta.

### **3.3.4 Proponer la(s) alternativa(s) para la mejora del proceso de potabilización.**

#### **❖ Identificación de alternativas posibles para el tratamiento del agua.**

En función del proceso de potabilización presente actualmente en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, considerando el criterio de generar el menor impacto posible en la infraestructura, mediante la colaboración de expertos en el área y con apoyo en la bibliografía pertinente, se establecieron las alternativas más adecuadas para mejorar el proceso de potabilización.

#### **❖ Análisis de cada alternativa planteada.**

Las alternativas para mejorar el proceso de potabilización se analizaron para establecer sus ventajas y desventajas, considerando las características que definen la calidad del agua y tomando en cuenta su impacto en el proceso, costos y en la infraestructura presente.

#### **❖ Comprobación de la disponibilidad de los equipos necesarios para el tratamiento del afluente.**

Según la tecnología existente y la infraestructura de la planta se determinaron los equipos necesarios para una mejor potabilización del afluente con características eutróficas, considerando factores como: el costo, el espacio físico disponible, así como también, las condiciones de operación de los equipos. Todo esto para garantizar una alta eficiencia del proceso y rentabilidad del proyecto.

### **3.3.5 Seleccionar la(s) alternativa(s) para mejorar la calidad del efluente de la planta de potabilización.**

#### **❖ Selección de alternativa utilizando una matriz de ponderación para evaluarla.**

De acuerdo a los análisis realizados para cada alternativa en las actividades anteriores, y a diversos factores tales como: espacios físicos, costos, beneficios económicos y ambientales, entre otros; se elige una tecnología que evidencie su idoneidad para el proceso, todo ello a través de una matriz de selección, donde se otorgaron ponderaciones jerárquicas a los diferentes criterios de evaluación de las alternativas, así como también se asignan valores a cada alternativa según el criterio y, finalmente, se realiza una valoración para estimar cual de las alternativas posee mayor puntuación, es decir, cual demostró ser más idónea. Dicha matriz tuvo la siguiente información:

**Ecológico (20 %):** se tomará en cuenta este criterio, porque se trata de un recurso importante (el agua potable), por eso el aspecto sustentable y la diversidad biológica forman parte de este criterio. La ponderación a evaluar tendrá la siguiente puntuación:

10 puntos: el que se adapte mejor al aspecto ecológico

1 punto: el que menor adaptación logre.

**Continuidad de abastecimiento (10 %):** este aspecto tiene un interés moderado para la empresa, ya que el continuo abastecimiento es una de sus metas. La ponderación a evaluar tendrá la siguiente puntuación:

10 puntos: el que genere un continuo abastecimiento, sin problema alguno

1 punto: el que genere muchos inconvenientes.

**Costos (30 %):** este es el criterio más relevante para la empresa, porque deben considerarse los menores gastos posibles. En este aspecto se consideran costos de materiales, mano de obra, traslados. La ponderación a evaluar tendrá la siguiente ponderación:

10 puntos: el que demande menor costo posible

1 punto: el que demande el mayor costo.

**Tiempo de ejecución (10 %):** este criterio es importante, ya que se necesita implementar la alternativa lo antes posible, debido al cambio repentino del agua a tratar. La ponderación a evaluar tendrá la siguiente ponderación:

10 puntos: el que demande menor tiempo de ejecución posible

1 punto: el que demande el mayor tiempo.

**Tiempo de capacitación del personal (10 %):** se necesita capacitar al personal en el menor tiempo posible, para que la alternativa se desarrolle al terminar todo el proceso anterior. La ponderación a evaluar tendrá la siguiente ponderación:

10 puntos: el que genere menor tiempo de capacitación

1 punto: el que genere el mayor tiempo.

**Espacio físico a utilizar (10 %):** por ser el penúltimo criterio, no significa que es el menos importante, pues se quiere utilizar el menor espacio posible,

porque no pueden realizarse muchas modificaciones en sus instalaciones. La ponderación a evaluar tendrá la siguiente ponderación:

10 puntos: el que demande menor espacio físico

1 punto: el que demande el mayor espacio.

**Operabilidad (10 %):** este criterio tiene importancia, ya que es necesario tener en cuenta la facilidad de operación del sistema a utilizar. La ponderación a evaluar tendrá la siguiente ponderación:

10 puntos: el proceso que tenga mayor facilidad de operabilidad

1 punto: el proceso con menor facilidad de operabilidad.

**❖ Características de cada uno de los equipos previamente seleccionados, estableciendo su distribución en el área disponible para ellos.**

Por medio de revisión bibliográfica y participación del personal calificado del área de tratamiento se seleccionó el uso de un proceso de flotación. Como equipo principal a utilizar, un saturador de agua con aire, una bomba centrífuga, un compresor y la tubería que permitirá la conexión entre la etapa de sedimentación y la filtración. Para ello se tomaron en cuenta las condiciones de operación, el espacio físico disponible.

**❖ Evaluación de la alternativa seleccionada a nivel de laboratorio.**

Una vez seleccionada la alternativa, se realizaron ensayos a nivel de laboratorio para comprobar la efectividad de la propuesta en el mejoramiento

del proceso de potabilización. Para la realización de dichos ensayos, se siguieron las siguientes pautas:

Se captaron muestras de agua cruda directamente del laboratorio de la planta (existen dispensadores de agua cruda y tratada en él). Las muestras para análisis físico-químicos se recolectaron en vasos de precipitados cuadrados de 2 L, se situaron todos en el equipo de rpm controlados para realizar las pruebas de jarros. Se agitó a 80 rpm, por 1 minuto, para aplicarle la dosificación de coagulante, siguiendo la siguiente secuencia ordenada: sulfato de aluminio (concentración variable), polímero catiónico, policloruro de aluminio y cloro (estos tres últimos, en concentraciones constantes), luego de la adición de todos ellos, se disminuyeron a 10 rpm y esperando el tiempo de retención promedio, establecido estadísticamente en 15 minutos para la formación del floc en esta planta. Transcurrido ese tiempo, se procedió al análisis del tamaño del floc, mediante el índice de Willcomb con un medidor apto para el ensayo, diseñado por Water Research Institute de Inglaterra; se detuvo el equipo, para elevar las paletas cuidadosamente (para evitar romper el floc), se extrajo el 10 % del volumen de los jarros (200 mL), para posteriormente agregar igual cantidad de agua saturada y dejar que ocurra la flotación por 30 minutos. Después de finalizado ese tiempo se tomaron muestras de 200 mL, mediante válvulas inferiores presentes en los jarros, introduciendo lo captado en unos recipientes de vidrio, posteriormente procediendo a realizar los análisis físico-químicos.

El equipo de saturación empleado estaba constituido por un tanque de 50 cm de longitud y 15 cm de diámetro, en el 80 % de su interior se encontraban anillos Raschig de polietileno, poseía dos válvulas de entrada, una para el agua y la otra para el aire, de igual manera presentaba una válvula de salida para el agua saturada. En la parte superior se encontraba un manómetro cuyo rango era (0 – 6) kgf/cm<sup>2</sup>. El equipo se alimentaba a partir de un compresor de 1,5 hp y a través de un flujo de agua tratada de 38 L/s.

Los métodos de análisis dependieron de los equipos, materiales y reactivos existentes en el laboratorio siguiendo los métodos normalizados (Standard Methods), para su posterior comparación con los datos obtenidos a través del tratamiento convencional.

❖ **Análisis de las etapas de sedimentación.**

✓ **Tamaño del flóculo**

Se determinó mediante la comparación del flóculo presente en el jarro y los tamaños de la figura desarrollada por el Water Research Institute de Inglaterra (ver figura B.1) correspondiente al índice de Willcomb.

✓ **Tiempo de sedimentación**

Se determinó como el tiempo que tarda el floc en depositarse totalmente o gran parte de él. Comparándolo luego con los valores de la tabla B.2 (Ver apéndice B).

✓ **Análisis físico-químicos**

Los análisis físico-químicos forman parte importante de esta investigación en tal sentido, se contempla identificar el tipo de análisis necesario para obtener una validación en el laboratorio de la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga. Estos análisis son: color, turbidez, pH, aluminio, hierro, cloro libre y total.

- **Color**

Su determinación se efectuó por comparación visual de muestras con una serie de patrones de solución platino-cobalto. La comparación se hace con discos especiales de cristal de color previamente calibrados, utilizando el aqua- tester.

- **Turbidez**

El método de análisis para la determinación de este parámetro fue el nefelométrico. Consiste en la comparación de la intensidad de la luz diseminada por la muestra en ciertas condiciones, basado en el principio de dispersión de intensidad de luz, a mayor intensidad, mayor es la turbidez. Se utilizó el turbidímetro presente en el laboratorio.

- **pH**

El método de análisis de este parámetro fue el potenciométrico, se basa en la determinación de la actividad de los iones hidrógeno, utilizando un electrodo indicador de vidrio y un electrodo de referencia, utilizando un potenciómetro.

- **Alcalinidad**

Se tomaron 50,0 mL de la muestra en una fiola, se añadieron 4 gotas de tiosulfato de sodio 0,1 N y 3 gotas del indicador mixto. Luego se tituló con ácido sulfúrico 0,0200 N hasta obtener el viraje de azul a rosado.

▪ **Aluminio**

Se realiza a través del método de eriocromo cianina R. El primer paso fue tomar una alícuota de 2,50 mL de la muestra (se debió hacer por duplicado, ya que uno es el blanco y el otro es la muestra a analizar) y se añadió a un balón aforado de 50,0 mL, se añadieron 22,5 mL de agua destilada, el volumen correspondiente de ácido sulfúrico 0,0200 N (1 mL adicional del utilizado para la determinación de la alcalinidad), 1 mL de ácido ascórbico, 1 mL de ácido etilendiaminotetraacético 0,01 M, 10 mL de acetato de sodio y 5 mL de eriocromo cianina R. Posteriormente, se aforó, se dejó reposar por 10 minutos, transcurrido el tiempo, se transvasaron las soluciones del balón a las celdas y se procedió a la lectura de la absorbancia a 535 nm, utilizando el espectrofotómetro. Finalmente, a partir de una ecuación proveniente de una curva de calibración se calculó el valor del aluminio presente en la muestra.

▪ **Hierro**

Se determinó por el método de fenantrolina. Este método se basó en tomar 50,0 mL de la muestra, colocarlos en una fiola, luego se añadieron las siguientes soluciones: 2,00 mL de ácido clorhídrico y 1,00 mL de hidroxilamina. Posteriormente se colocó en la plancha de calentamiento para digerir la muestra hasta unos 15 mL aproximadamente. Una vez enfriada la muestra se trasvasó a un balón de 50,0 mL, se añadieron 10,0 mL de acetato de amonio y 4,0 mL de fenantrolina, se aforó y se dejó reposar por 10 minutos. Transcurrido el tiempo, se transvasaron las soluciones del balón a las celdas y se procedió a la lectura de la absorbancia a 510 nm, utilizando el espectrofotómetro. Finalmente, a partir de una ecuación proveniente de una curva de calibración se estimó el valor del hierro presente en la muestra.

### **3.3.6 Estudiar la factibilidad técnico-económica de la(s) alternativa(s) seleccionadas.**

#### **❖ Determinación de costos de los equipos.**

Se realizó una licitación con distintos constructores para la adquisición y montaje de los equipos necesarios para la instalación de la nueva etapa del proceso. Posteriormente utilizando procedimientos explícitos en la ley que contiene estas pautas, se estableció la mejor opción.

#### **❖ Evaluación de la inversión inicial.**

Se utilizaron porcentajes y modelos matemáticos, para calcular los diferentes costos de capital fijo y capital de trabajo, estos dependieron del costo total de los equipos principales para el sistema DAF que se empleará en la planta.

#### **❖ Evaluación de los costos operacionales.**

Después de determinar el capital fijo del sistema DAF, se procedió a utilizar modelos matemáticos para obtener los costos operacionales, cabe destacar que algunos de estos costos son cubiertos por la empresa.

#### **❖ Consideración de la relación costo-beneficio del proceso.**

Con la colaboración del personal de la empresa, se calculó el costo actual de la potabilización de agua eutroficada, a partir de los modelos matemáticos adecuados, se determinó el ahorro anual, el valor actual por cada año, además del equivalente anual, (Ver apéndice A) y se estimó el beneficio económico de la alternativa seleccionada.

## **CAPÍTULO IV**

### **DISCUSIONES Y RESULTADOS**

En esta sección se muestra un análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo de grado.

#### **4.1 Describir la condición eutrófica del embalse Pao Cachinche considerando modelos matemáticos que describan el proceso de potabilización**

En el primer trimestre del año, se realizó la visita al embalse Pao Cachinche. Se utilizó un GPS como instrumento, para determinar la siguiente ubicación del embalse: la cuenca se encuentra situada, fisiográficamente, sobre el flanco Sur de la Cordillera de la Costa en la Región Centro Norte de Venezuela, entre los estados Carabobo y Cojedes, a una altitud de 353 msnm. En esta cuenca existen tres embalses construidos, el embalse Cachinche ubicado después de la confluencia de los ríos Paito y Chirgua, el embalse Guataparo ubicado en la cuenca alta del río Paito, y por último La Balsa ubicado en las galeras del río Pao, en el sitio Paso La Balsa, cuyos tributarios son el río Pao, Pacaragua y Caimán Grande.

Los tributarios se encuentran altamente impactados, pues, en ellos son vertidas aguas residuales domésticas y agroindustriales como el caso del río

Paito; mientras que en los ríos Chirgua y convergencia (representada por los ríos: Pirapira, Paya y San Pedro), son descargadas las aguas provenientes de granjas avícolas y porcinas.

Durante el recorrido se pudo notar la presencia de espuma blanca y olor cloacal, a lo largo de todo el río Paíto. Al llegar el embalse se pudo observar que gran parte del espejo de agua se encontraba cubierto por algunas plantas acuáticas, tales como: lirio de agua, repollo de agua y lena, en menor proporción. Sin embargo; no estaban presentes en las cercanías de la torre toma selectiva (punto de captación del agua que representa el afluente de la Planta de Potabilización Dr. Alejo Zuloaga), producto del sistema de aireación instalado en dicho punto.

Actualmente, se opera un sistema de aireación, combinado con inyección de oxígeno puro que eventualmente se usa, según las condiciones del agua captada en el embalse, con el objetivo de mejorar las condiciones de oxidación-reducción del agua, permitiendo la combinación de sustancias disueltas en el agua cruda, mediante el barrido de las sustancias volátiles, causada por la mezcla turbulenta del agua con el aire y por el proceso de oxidación de los metales (hierro y manganeso, principalmente) y gases, como el CO<sub>2</sub>. Además, entre otras funciones crea por ascenso, burbujas que provocan corrientes convectivas que rompen la columna de estratificación química y condición de reposo, necesaria para formar el buen metabolismo celular de reproducción de microplancton y también permite la eliminación de olores y sabores en el agua.

La eutroficación de lagos y embalses consiste en el enriquecimiento con nutrientes; principalmente fósforo y nitrógeno, que ingresan como solutos y están ligados a partículas orgánicas e inorgánicas.

La eutroficación de las aguas es uno de los problemas ambientales más comunes y, en los últimos años, se ha visto incrementada por a la creciente población humana y el desarrollo agrícola, industrial y urbano.

Existen ciertas condiciones ambientales (factores físicos y químicos) tanto en los lagos y embalses como en sus cuencas, que contribuyen a la eutroficación, dentro de las cuales se encuentran:

- ❖ **Tamaño y profundidad:** los lagos poco profundos poseen condiciones que favorecen el reciclaje de nutrientes (carga interna de nutrientes), esto aunado a altos niveles de luz, pueden producir altos niveles de fitoplancton y de biomasa de macrófitas.

- ❖ **Tiempo de residencia hidráulica:** cuando este es prolongado se facilita el crecimiento de plancton y acumulación de biomasa.

- ❖ **Mezcla:** depende de los intercambios de energía con la atmósfera; caudales entrantes y descargas. La mezcla influye en la redistribución de nutrientes, facilitando la eutroficación cuando ocurre acumulación de los mismos.

- ❖ **Factores químicos:** se relacionan con las interacciones que pueden ocurrir por los excesivos aportes de fósforo en los ciclos químicos de elementos como: carbono, azufre, hierro y nitrógeno, produciéndose un incremento de dióxido de carbono; reducción de la relación N:P, favoreciéndose el crecimiento de cianobacterias que fijan el nitrógeno, de igual manera disminuye la cantidad de oxígeno disuelto y favorece la generación de metano y sulfuro, la producción de amoníaco y la liberación de los sedimentos ferrosos.

La adquisición de agua limpia y la higiene constituyen un factor cultural que afecta el uso del agua en diferentes sociedades. De igual manera la forma de ingerir alimentos, a menudo estrechamente vinculada con la higiene personal y la disposición de desechos humanos, es otro importante factor cultural que influye en el uso del agua.

El desarrollo socio-económico de un país depende de los ingresos de la población y de la disponibilidad del agua. El agua ya se está convirtiendo en

un factor que limita seriamente el desarrollo de países con poblaciones de bajos ingresos y limitado acceso al agua (Melack, 2001).

Los lagos y embalses pueden clasificarse, en general, en ultraoligotróficos, oligotróficos, mesotróficos, eutróficos o hipereutróficos según la concentración de nutrientes en el cuerpo de agua y/o según las manifestaciones ecológicas de la carga de nutrientes. Cuando las aguas poseen en promedio una cantidad de fósforo total equivalente al 10 % y un nivel de clorofila de 6 %, se dice que su estado es ultraoligotrófico. Los lagos y embalses oligotróficos se caracterizan por bajos aportes de nutrientes y de productividad primaria, alta transparencia y biota diversa. El estado mesotrófico se refiere a aquellos lagos que reciben moderadas cantidades de nutrientes provenientes de su cuenca. El fitoplancton y otros organismos acuáticos no son muy abundantes. Las aguas eutróficas tienen altos aportes de nutrientes y productividad primaria, baja transparencia y gran biomasa de pocas especies con mayor proporción de cianobacterias. Los lagos y embalses hipereutróficos representan la última etapa del proceso de eutroficación donde las aguas reciben nutrientes de fuentes difusas o no puntuales incontrolables, que producen el crecimiento de algas de manera exponencial (Redfield, 1955).

La eutroficación incluye efectos en el agua como por ejemplo: conglomerados de algas y toxinas derivadas de floraciones de algas, infestaciones masivas de ciertas plantas acuáticas, agua turbia, olores desagradables y mal sabor en el agua, agotamiento del oxígeno disuelto y contaminación (Melack, 2001).

Al igual que en otros lagos y embalses del mundo, la eutroficación del embalse Pao Cachinche es cultural; o entiéndase antropogénica, es decir, derivada por las actividades diversas realizadas por los habitantes emplazados en la cuenca alta y media del río Pao. Y esto está unido intrínsecamente con la publicación en medios audiovisuales e impresos, de

los problemas en el suministro efectivo del agua potable, para las poblaciones de los estados Aragua, Cojedes y Carabobo.

A continuación se presentan algunos planes de acción a considerar para prevenir y/o remediar el problema de la eutroficación:

❖ **Tecnología ambiental:** este tipo de técnica intenta, por medio del uso de tecnología de tratamiento del agua, eliminar o reducir los componentes indeseables en las aguas servidas que entran al cuerpo de agua. Se usa principalmente para resolver los problemas de fuentes puntuales (González *et al*, 2000).

❖ **Ecotecnología:** este tipo de técnica intenta modificar el ecosistema o su entorno para acelerar el proceso de restauración o reducir las concentraciones de los componentes indeseables en el lago o en sus afluentes. Se usa principalmente para resolver los problemas de fuentes no puntuales (González *et al*, 2000).

❖ Los programas de control deben contemplar un manejo integral de ordenamiento de la cuenca que incluya fuentes puntuales y dispersas. Sin embargo, en la selección de las estrategias se deben evaluar los costos de control puntual frente al disperso y la factibilidad que se cumplan mejores prácticas de manejo agrícola y ganadero propuestas en la zona en particular (Martínó y Salas, 1990).

❖ Cualquier medida de control debe prever el desarrollo demográfico y económico futuro en la cuenca al establecer donde se efectuará el control de las fuentes para mejorar la calidad. (Martínó y Salas, 1990)

Finalmente y considerando que cada ecosistema acuático es único es necesario abordar el problema de la eutroficación con una perspectiva de

mediano y largo plazo, que integre regulaciones, organizaciones institucionales, participación pública y la participación y el apoyo de los responsables de la toma de decisiones. Esto sólo se puede lograr mediante la educación adecuada de los administradores, de los responsables de la toma de decisiones y del público en general, con actividades a nivel local que cuenten con apoyo político y administrativo.

Dado que los tributarios del embalse reciben cargas poluentes de origen antrópico, además de nutrientes considerados como fuentes puntuales, por ejemplo, vertidos de aguas residuales domésticas y agroindustriales, fue necesaria la identificación de parámetros de calidad de aguas relacionadas que permitieran la determinación del grado de eutroficación del embalse.

En primer lugar, se determinó el punto de muestreo de la Torre Toma Selectiva. (Ver figura 4.1)



Figura 4.1 Ubicación del punto de captación de la Torre Toma Selectiva.

Fuente: Hidrocentro, (2011)

Seguidamente se conoció la frecuencia de muestreo en el embalse (éste se realiza mensualmente), de igual manera, se establecieron los análisis practicados en dicho embalse. Dentro de los parámetros que se determinaron *in situ* se encuentran: oxígeno disuelto, temperatura, pH,

conductividad y transparencia, en cuanto a los análisis efectuados en el laboratorio se mencionan: fitoplancton, clorofila, fósforo total, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, dureza total, alcalinidad y fosfatos.

En la tabla 4.1, se presentan los parámetros obtenidos en un estudio limnológico realizado en el embalse Pao Cachinche en el año 2000 y los datos suministrados por la Gerencia de Captación, Tratamiento y Mantenimiento de la C.A. Hidrológica del Centro.

El estudio limnológico, que tuvo lugar en junio del año 2000; desarrollado por el Instituto de Biología Experimental de la Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias; durante un tiempo comprendido desde septiembre de 1997 hasta febrero de 1999; se realizó por la alta concentración de organismos fitoplanctónicos presentes en el embalse Pao Cachinche.

Para la determinación del grado de eutroficación se compararon los datos de la tabla 4.1 con los valores de la tabla B.1 (ver apéndice B), de acuerdo a este criterio para concentraciones de: fósforo total  $> 0,1$  mg/L; clorofila a  $> 0,075$  mg/L y transparencia  $< 1,5$  m, la categoría trófica es Hipereutrófico. De ésta manera se mantiene el nivel determinado en el estudio limnológico del año 2000.

Posteriormente se procedió a una valoración de los modelos matemáticos, que rigen el proceso de eutroficación. En tal sentido; fue necesario hacer referencia al estudio limnológico donde se encuentran los modelos por Henry Salas y Paloma Martínó.

El Ing. Henry Salas (Asesor en Evaluación de Impacto Ambiental y Salud CEPIS) y Paloma Martínó (Oficial Profesional Asociado del CEPIS (1988-90)), después de extensas revisiones de modelos matemáticos (en aquel tiempo) llegaron a la conclusión que los modelos de lagos templados, no eran aplicables a los lagos tropicales, por lo que decidieron formar el Programa Regional para el Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales.

**TABLA 4.1**  
**PARÁMETROS PARA DETERMINAR CONDICIÓN EUTRÓFICA**

Parámetros	Unidad	Referencia del año 2000 (Trabajo Limnológico)	Valores promedios actuales
Alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	74,240	7,501
Clorofila a	µg/L	34,160	56,310
Conductividad	µS/cm	205,000	476,708
Dureza total	mgCaCO <sub>3</sub> /L	0,072	132,676
Fosfatos	mg/L	0,255	1,733
Fósforo total	mg/L	0,481	0,763
Nitratos	mg/L	0,005	13,449
Nitritos	mg/L	0,003	0,315
Nitrógeno amoniacal	mg/L	1,705	3,245
Nitrógeno total	mg/L	3,584	3,666
Oxígeno disuelto	mg/L	6,000	3,780
pH	-	6,550	7,500
Relación N:P	-	11,790	4,800
Temperatura	°C	25,500	25,000
Transparencia	m	0,970	0,860

Martinó y Salas (1990), han hecho un esfuerzo considerable en los últimos 10-20 años para desarrollar análisis empíricos y teóricos de eutroficación de lagos que pudieran ser fácilmente aplicables. Debido a que muchos de los problemas de los lagos se han debido al fitoplancton, la mayoría de los esfuerzos hasta la fecha se han centrado en la eutroficación del lago por fitoplancton incorporando varias presuposiciones básicas en el análisis. Los modelos simplificados de fitoplancton han probado ser útiles para una primera estimación de los efectos potenciales de una reducción en la carga de nutrientes. Dicho modelos se encuentran en el Apéndice C.

Es importante mencionar que modelos descritos anteriormente no fueron utilizados en el presente trabajo de investigación, debido a que se necesita una data mínima de parámetros de al menos los últimos 18 meses. De igual manera es un trabajo realizado por biólogos.

#### **4.2 Describir los procesos convencionales de potabilización utilizados en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga**

Los estudios de tratamiento de agua de George Fuller y sus asociados en Louisville en los años ochenta del siglo XX establecieron que un pretratamiento efectivo, incluyendo clarificación, era necesario para un filtrado efectivo de aguas turbias olorosas tales como las del río Ohaio. En las décadas siguientes a los trabajos de Fuller, un tren de tratamiento consistente en alimentación química, mezcla rápida, floculación, sedimentación y filtraje llegó a considerarse como el tratamiento convencional. La desinfección se incluye en el tratamiento convencional, con el punto o puntos de adición del desinfectante variando según las diferentes plantas de tratamiento. Un tren de tratamiento convencional es apropiado para aguas de origen o fuente de agua que son turbias a veces o siempre, con una turbidez excediendo de 20 a 50 NTU durante un largo período de tiempo (Longsdon *et al*, 2002).

El proceso de potabilización de la planta convencional (tecnología americana) bajo estudio, consta de las siguientes etapas:

❖ **Rompe carga:** es un tanque de concreto con unas dimensiones de 7,5 m por 7,5 m; en esta etapa del proceso se manejan dos afluentes, uno proveniente del embalse Pao Cachinche (que es el que se utiliza constantemente), con un caudal promedio de 3.200 L/s y un diámetro de

tubería de 60" y el proveniente del río Torito, utilizado como reserva, cuenta con un caudal promedio de 200 L/s y su diámetro de tubería es de 40"; actualmente se oxigena el agua en el rompe carga.

De igual manera, mediante la realización de ensayos en la planta, se determinó la necesidad de dosificar carbón activado en esta etapa. La dosificación aproximada de carbón activado es de 0,8 ppm.

A la salida del rompe carga, se encuentra un tubo Venturi, permitiendo medir el caudal manejado por la planta. El vacío producido en la garganta del Venturi, se aprovecha para inyectarle la cantidad de coagulante que demanda la planta (aproximadamente, 80 ppm de sulfato de aluminio líquido).

❖ **Mezcla rápida:** es un tanque de concreto con unas dimensiones de 9,60 m por 3,20 m, también posee unas pantallas rompe cargas de concreto transversales, formando la mezcla rápida de los aditivos químicos siguientes: 0,03 ppm de un polímero catiónico y 5 ppm de cal, mediante la creación de turbulencia. Es importante mencionar que las dosificaciones del polímero y la cal son eventuales, de acuerdo con las características del afluente.

En este canal, las sustancias químicas añadidas comienzan a actuar, formando así los coágulos. De aquí el efluente es dividido a tres floculadores. Se pudo observar una espuma presente a la entrada del canal de coagulación. Dicho canal posee unas dimensiones de 20 m por 1,5 m.

❖ **Mezcla lenta:** en esta etapa se aglomeran las partículas, para aumentar su peso molecular; ésta presenta unas paletas de eje horizontal que giran de unos 10 a 5 rpm. En los tres floculadores se observó la presencia de un sobrenadante. Cada floculador cuenta con unas medidas de 20 m por 18,20 m.

❖ **Sedimentación:** esta etapa consta de las siguientes dimensiones 65 m de largo, 20 m de ancho y 3,7 m de altura. En su parte superior posee un vertedero, diseñado para la salida de agua clarificada, pero en la actualidad en esta etapa se observa la presencia de pequeños flóculos suspendidos, evidenciando la formación de un flóculo que no sedimenta en su totalidad. El agua antes de llegar a los filtros, es monitoreada y clorada. En esta etapa, se observó un barre lodos; cuya función es limpiar el fondo de los sedimentadores mediante unas paletas de arrastre.

❖ **Filtración:** consta de 10 filtros, con lechos filtrantes de densidad variable distribuidos en dos ramales, el lecho filtrante es de tipo multicapa, dichas capas son: antracita, arena y grava. Al momento de lavar los filtros, sólo se utiliza agua filtrada por el fondo, proveniente de un tanque de 33 m<sup>3</sup>, el agua del lavado se desecha como aguas grises, a una laguna de oxidación. Una vez filtrada el agua, se procede a la post-cloración, para luego mezclarse con el agua tratada en la planta Degremont y finalmente ser distribuida a la población.

### **4.3 Comparar los parámetros de diseño de la infraestructura presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga, con los parámetros típicos nominales usados en estos procesos**

A través de un diagrama con la simbología correspondiente de las etapas presentes en el proceso de potabilización bajo estudio, se establecieron los puntos para la determinación de parámetros de diseño, presentándose en la figura 4.2.

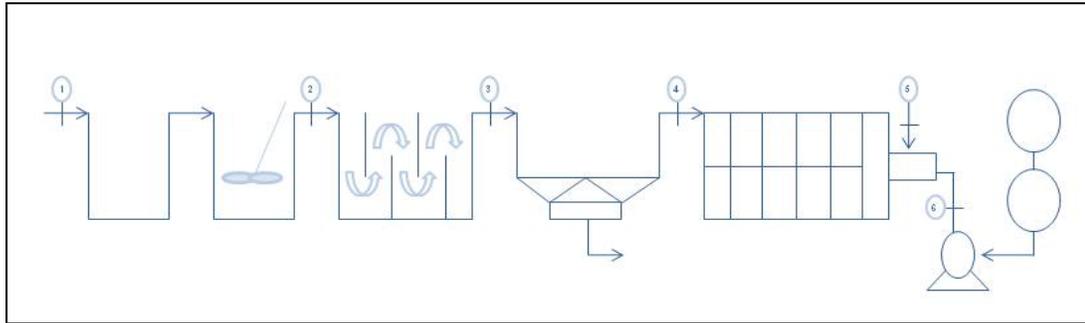


Figura 4.2 Diagrama de especificación de puntos para determinación de parámetros de diseño

Con la ayuda de los empleados de la planta se realizaron fichas técnicas, donde se reflejan las características de los equipos y etapas presentes en la planta de potabilización bajo estudio. (Ver tablas 4.2 – 4.5).

Con el propósito de realizar la comparación de los parámetros de diseño presentes en la planta, se realizó una recopilación de los parámetros típicos utilizados en procesos convencionales, estipulados en normas y bibliografía relacionada.

Considerando previamente la clasificación del afluente como Tipo 1 B, según datos suministrados por la hidrológica del centro.

En tal sentido, se debe hacer referencia a los artículos 3 y 4 de las Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos Gaceta N° 5.021 en los cuales se expresan los procesos que se deben realizar para la potabilización de aguas subtipo 1 B y las características correspondientes a aguas de este subtipo. (Ver tablas B.3 y B.4)

Para la aplicación de la coagulación el agua fuente debe cumplir con el siguiente criterio: alcalinidad mayor a 60 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  (Letterman, 2002).

TABLA 4.2

Ficha técnica de la etapa de coagulación

	<p><b>HIDROCENTRO</b>  <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b>  <b>PLANTA DE TRATAMIENTO DR. ALEJO ZULOAGA</b></p>	
<p><b>Ficha Técnica de:</b> Coagulación</p>		
<p><b>Tipo:</b> Rectangular, agitación hidráulica</p>		
<p><b>Función:</b> Asegurar la dispersión instantánea del coagulante en toda la masa de agua que se va a tratar. Esta dispersión debe ser lo más homogénea posible, con el objeto de desestabilizar todas las partículas presentes en el agua y optimizar el proceso de coagulación.</p>		
<p><b>Ubicación:</b> Área de poca extensión, ocupa el ámbito inicial del proceso</p>		
<p><b>Dimensiones:</b> Largo 9,60 (m), ancho 3,20 (m) y altura del agua 3,50 (m)</p>	<p><b>Potencia mecánica utilizada:</b> 10,47 kg/m.s<sup>3</sup></p>	
<p><b>Tiempo de antigüedad:</b> 1973</p>	<p><b>Tiempo de retención:</b> 0,028 (seg)</p>	
<p><b>Capacidad:</b> 108,00 (m<sup>3</sup>)</p>	<p><b>Cantidad:</b> 1 (unidad)</p>	
<p><b>Velocidad horizontal:</b> 0,268 (m/s)</p>	<p><b>Gradiente de velocidad:</b> 108,3 (seg<sup>-1</sup>).</p>	
<p><b>Tasa de producción:</b> 21.333,33 (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día)</p>	<p><b>Rango de operación:</b> 0,3 – 3,5 (m<sup>3</sup>/s)</p>	
<p><b>Nota:</b> cuando se diseño, tenía agitadores hidráulicos, pero se eliminaron hace X años, porque estaban mal diseñados.</p>		
		

**Tabla 4.3**  
**Ficha técnica de los floculadores**

	<b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b> <b>PLANTA DE TRATAMIENTO DR. ALEJO ZULOAGA</b>	
<b>Ficha Técnica de:</b> Floculador		
<b>Tipo:</b> Rectangular, agitación hidráulica más mecánica (combinada), rompimiento de líneas definidas de corrientes.		
<b>Función:</b> proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta aplicando velocidades decrecientes, para promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que la suspensión de agua y flóculos salga de la unidad.		
<b>Ubicación:</b> Área anterior de los sedimentadores.		
<b>Dimensiones:</b> Largo 20,00 (m), ancho 18,20 (m) y altura del agua 3,20 (m)	<b>Potencia mecánica utilizada:</b> 34,11 kg/m.s <sup>3</sup>	
<b>Tiempo de antigüedad:</b> 1973	<b>Tiempo de retención:</b> 19,2 minutos	
<b>Capacidad:</b> 1.165,00 (m <sup>3</sup> )	<b>Cantidad:</b> 3 (unidades)	
<b>Velocidad horizontal:</b> 0,017 (m/s)	<b>Gradiente de velocidad:</b> Unidad. 1: 44,70 (s <sup>-1</sup> ), Unidad 2: 32,41 (s <sup>-1</sup> ) y Unidad 3: 32,41 (s <sup>-1</sup> )	
<b>Tasa de operación:</b> 199,38 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día)	<b>Rango de operación:</b> 0,3 – 3 (m <sup>3</sup> /s)	
<b>Nota:</b> Esta desarrollado con la misma continuidad de la obra civil estructural de los sedimentadores, siendo contiguos y solo se usan cortinas separadoras de madera, tanto en los baffles de conducción del curso del flujo como en la entrega del flujo al sedimentador, con una mezcla lenta que favorece la formación de precipitados luminosos.		
		

**Tabla 4.4**  
**Ficha técnica de los sedimentadores**

	<p><b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b> <b>PLANTA DE TRATAMIENTO DR. ALEJO ZULOAGA</b></p>	
<p><b>Ficha Técnica de:</b> Sedimentador</p>		
<p><b>Tipo:</b> rectangular de flujo horizontal</p>		
<p><b>Función:</b> remueve partículas que salen de una suspensión mediante la fuerza de gravedad.</p>		
<p><b>Ubicación:</b> representa el área más extensa de la infraestructura y ocupa el ámbito medio de ella.</p>		
<p><b>Dimensiones:</b> Largo 65,00 (m), ancho 20,00 (m) y profundidad 3,15 (m)</p>	<p><b>Potencia mecánica utilizada:</b> N/A</p>	
<p><b>Tiempo de antigüedad:</b> 1973</p>	<p><b>Tiempo de retención:</b> 67,8 minutos</p>	
<p><b>Capacidad:</b> 4.095,00 (m<sup>3</sup>)</p>	<p><b>Cantidad:</b> 3 (unidades)</p>	
<p><b>Velocidad horizontal:</b> 0,017 (m/s)</p>	<p><b>Gradiente de velocidad:</b> menor a 5s<sup>-1</sup></p>	
<p><b>Tasa de producción:</b> 199,38 (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día)</p>	<p><b>Rango de operación:</b> hasta 1,5 (m<sup>3</sup>/s)</p>	
		

**Tabla 4.5**  
**Ficha técnica de los filtros**

	<p><b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b> <b>PLANTA DE TRATAMIENTO DR. ALEJO ZULOAGA</b></p>	
<p><b>Ficha Técnica de:</b> Filtros</p>		
<p><b>Tipo:</b> Filtro de lecho filtrante de densidad variable.</p>		
<p><b>Función:</b> Su correcta concepción depende de la interrelación que exista entre las características de la suspensión afluente y los rasgos del medio filtrante, para que predominen los mecanismos de filtración apropiados que darán como resultado la máxima eficiencia posible.</p>		
<p><b>Ubicación:</b> representa una estructura de gran dimensión y ocupa el ámbito del proceso</p>		
<p><b>Dimensiones:</b> Largo 11,7 (m), ancho 11,6 (m) y altura del agua 2,30 (m)</p>	<p><b>Tipo:</b> Cuadrado, fondo Leopold</p>	
<p><b>Tiempo de antigüedad:</b> última remodelación junio 2010</p>	<p><b>Carrera de filtración:</b> 24 horas</p>	
<p><b>Capacidad:</b> 282,00 (m<sup>3</sup>)</p>	<p><b>Cantidad:</b> 10 (unidades)</p>	
<p><b>Tipo de lecho filtrante:</b> Densidad Variable</p>	<p><b>Granulometría de lecho filtrante:</b> (0,3 – 0,5) mm</p>	
<p><b>Tasa de producción:</b> 2133,33 (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día)</p>	<p><b>Rango de operación:</b> (0,244 – 1) m<sup>3</sup>/s</p>	
		

Considerando mezcladores mecánicos con agitadores de turbina, se recomienda lo siguiente: la intensidad de agitación, medida a través del gradiente de velocidad, puede variar de 500 a 2.000  $s^{-1}$  y el tiempo de retención puede variar de 1 a 10 segundos (Capena, 1992).

Los gradientes de velocidad que optimizan el proceso de floculación normalmente varían entre 70 y 20  $s^{-1}$  (Letterman, 2002).

El tiempo de retención en los floculadores puede variar de 10 a 30 minutos, dependiendo del tipo de unidad (Capena, 1992).

Se debe mantener el pH entre 6,0 y 6,5 durante la coagulación y floculación; pues, es un valor próximo al mínimo para la solubilidad del aluminio (Letterman *et al*, 2002).

La carga superficial o tasa de sedimentación superficial para sedimentadores convencionales oscila entre 20 y 60 m/d (USEPA, 1975).

Por lo general la profundidad en los sedimentadores es mayor de 3 metros. En tanques convencionales, después de una coagulación-floculación, el tiempo de retención por lo general es de 2 a 4 horas, éste es suficiente para luego pasar a una etapa de filtración (Romero, 1999).

Para tanques de sedimentación la velocidad debe mantenerse entre 0,25 y 1,5 cm/s (ASCE, 2011).

Se recomienda controlar la turbiedad en forma estricta y evaluarla en las diferentes fases del tratamiento, considerando los límites de calidad sugeridos que se indican en la tabla B.5.

Una vez recopilados los valores de los parámetros de diseño correspondientes a las etapas del proceso convencional de potabilización en las normas y bibliografía, con ayuda del personal de la planta se realizó una tabla comparativa de los valores típicos y promedios (Ver tabla 4.6). De acuerdo a la comparación realizada, se encontró que existen pocas desviaciones, con respecto a los parámetros típicos teóricos de un sistema de potabilización convencional.

Hoja de tabla 4.6

Hoja de tabla 4.6

Las pocas desviaciones encontradas se deben principalmente a las características variables del afluente y a ciertas remodelaciones que se ejecutan en la planta bajo estudio. Aun cuando, las mismas no generan un impacto negativo severo en el proceso, deben ajustarse para mejorar tanto la calidad como la producción de agua potable.

#### **4.4 Proponer la(s) alternativa(s) para la mejora del proceso de potabilización**

Debido a las actividades antropogénicas desarrolladas por los seres humanos desde hace décadas, el embalse ha experimentado cambios estacionales, caracterizándose durante ciertos períodos del año como agua tipo 1 C, originando modificaciones en el tratamiento convencional, y en otros períodos como aguas tipo 1 B, donde el tratamiento convencional parece regularizarse. Esto induce a plantear alternativas, con ayudas bibliográficas para tratar de adaptar el proceso de potabilización y el afluente a este tipo de transiciones:

##### **Alternativa 1: eliminación de las algas en el afluente**

Construyendo una infraestructura de flotación antes de la obra de llegada, con el objetivo de obtener la separación de las microalgas, incluyendo la materia orgánica del agua a tratar, a través de un tratamiento convencional, cuyas etapas son: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

**Alternativa 2: insertar el sistema de flotación por aire disuelto (DAF)**

Éste se aplicará en la etapa de sedimentación del proceso convencional, para eliminar de esta manera toda la materia orgánica presente en el agua, mejorando su calidad y contribuyendo a un aumento de la eficiencia en la siguiente etapa del proceso: carrera de filtración. El sistema estará en operación solo cuando sea requerido.

**Alternativa 3: creación de ecotonos**

También llamados humedales, consistiendo en una variante constructiva donde se desarrolla una infraestructura gradual de biotas acuáticas en decrecimiento del tipo de nutriente presente en el embalse, para de este modo acelerar el proceso de aparición de especies superiores en la etapa final, de allí su nombre; es decir, se crean tonos de diversidad biológica acuática con los niveles tróficos. Son de gran extensión, donde ocurre la interacción de las macrófitas con los nutrientes presentes en el agua, creándose una disminución de estos últimos y mejorando las características y calidad del afluente, por consumo ecológico de nutrientes.

**Alternativa 4: emplazamiento de estructuras cosechadoras de macrófitas en el embalse**

Son áreas definidas dentro del embalse, con construcción de límites, para encerrar macrófitas, con el propósito de que crezcan y en su etapa declinante después de un crecimiento profuso, absorbiendo abundantes nutrientes presentes en el seno del embalse, cosecharlas. Es un proceso de vanguardia, de reciente aplicación, que está dando buenos resultados.

Una vez definidas las alternativas se procedió a analizar sus ventajas y desventajas, mencionadas a continuación:

## **ALTERNATIVAS 1 Y 2 SISTEMA DE FLOTACIÓN**

### ➤ **Ventajas:**

- ✓ Los conglomerados flóculos-microburbujas formados poseen una densidad sensiblemente inferior a la del agua.
- ✓ Las velocidades ascensionales son superiores a 10 m/h.
- ✓ El sobrenadante, se acumula y concentra, luego es retirado de la superficie por procesos mecánicos o hidráulicos.
- ✓ El proceso puede producirse mediante recirculación y presurización de una fracción del agua filtrada.
- ✓ Mejor calidad de agua clarificada (turbiedad < 3 NTU).
- ✓ Posibilidad de economía de coagulantes de hasta 30 %.
- ✓ Incrementa la remoción de materia orgánica particulada (incluyendo algas).
- ✓ Proporciona una mejor remoción de color.
- ✓ Promueve una reducción del tiempo de retención, lo que se traduce a un aumento del caudal de producción.

### ➤ **Desventajas:**

- ✓ La presión de operación debe estar de 4 a 6 kgf/cm<sup>2</sup> (56,89 a 85,34 psi). Esto induce a costos adicionales de energía eléctrica.
- ✓ Área de emplazamiento del sistema.
- ✓ Costos de adecuación de infraestructura.
- ✓ Costos de operación adicionales en los procesos mecánicos o hidráulicos.

### **ALTERNATIVA 3: CREACIÓN DE ECOTONOS**

➤ **Ventajas:**

✓ Desde el punto de vista hídrico y ecológico, los humedales constituyen una excelente fuente de agua para uso doméstico, industrial y agrícola, además de actuar en algunos casos como reguladores naturales del ciclo hídrico del agua, controlando su flujo, evitando inundaciones y permitiendo la recarga de los acuíferos.

✓ Desde el punto de vista social y cultural, los humedales constituyen un excelente recurso para la recreación y el turismo, no solo por la gran diversidad de sus ambientes, si no, más bien por la extraordinaria importancia paisajística, asociada en muchos casos a la diversidad de culturas y pueblos que dependen de ellos para subsistir.

✓ Ecológicamente, los humedales también brindan una serie de importantes beneficios, pues sirven de refugio a animales que utilizan sus ambientes como nichos, para refugiarse, reproducirse o alimentarse. De igual forma, se ha documentado su relevancia en el mantenimiento del microclima y su contribución en la captación y emisión de carbono.

✓ La función principal del humedal, aparte de ser un gran ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos, radica en el hecho de fungir como filtradores naturales de agua, esto se debe a que son plantas hidrófitas, poseen tejidos especializados, para almacenar y liberar agua, y de esta forma generan un proceso de depuración natural.

➤ **Desventajas:**

- ✓ Tiempo de implementación.
- ✓ Costos de instalación y capacitación del personal.
- ✓ Compiten en el uso de la tierra.

✓ Se debe contar con una amplia data del embalse para determinar las posibles especies a cultivar en el mismo.

❖ **ALTERNATIVA 4: COSECHA DE MACRÓFITAS**

➤ **Ventajas:**

- ✓ Se generan soluciones *in situ*.
- ✓ Ecológicamente generan soluciones con la misma actividad productora del embalse.
  - ✓ Se pueden obtener retorno de capitales de inversión con el aprovechamiento del nivel proteico de las macrófitas y son utilizadas para la producción de alimento para animales.
  - ✓ Se evita la de sedimentación, de biomasa orgánica generada por macrófitas muertas que promueven los niveles anóxicos en el hipolimnion del embalse.

➤ **Desventajas:**

- ✓ Tiempo de implementación.
- ✓ Construcción de infraestructuras con materiales ajenos a la misma naturaleza del embalse.
  - ✓ Se necesita mucho tiempo para capacitar al personal de operación.
  - ✓ Costos excesivos de los materiales de construcción, ya que requieren mayor estabilidad de flotación.

Cada una de las alternativas planteadas posee un conjunto de equipos diferentes, descritos a continuación:

➤ Alternativa 1:

Se debe construir un tanque aéreo además de un equipo de saturación de agua con aire, que posea elementos aumentadores de área de contacto entre el agua y el aire, de igual manera, las tuberías de conducción y aplicación de dicha agua y por último, se necesitará un compresor, una bomba centrífuga. En el tanque aéreo se producirá la mezcla del agua saturada de aire con el agua fuente, de esta manera, será eliminada toda la materia orgánica y sólidos suspendidos presentes, mediante la flotación de todos los sólidos suspendidos. Por último, se debe implementar un sistema de recolección de sobrenadantes y su tubería de drenaje hasta las fosas.

➤ Alternativa 2:

Esta alternativa requiere de la adquisición de un equipo de saturación (saturador), constituido por un tanque cilíndrico de diseño presurizado para alojar agua con presiones entre 70-100 psi, para su alimentación es necesaria una bomba y un compresor, para la generación y formación de microburbujas. De acuerdo con esta alternativa, todas las demás instalaciones de la planta no serán modificadas, sólo se harán los cambios pertinentes a la instalación del saturador.

➤ Alternativa 3:

Para la construcción de humedales es necesario, la creación de una gran laguna de almacenamiento, cuya función es servir de sedimentador primario, estabilizador y amortiguador de grandes caudales de llegada, debe incluir suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost. El efluente

de esta laguna será drenado a una segunda laguna, para comprobar la eficiencia del tratamiento.

La profundidad recomendada es 0,6 m, porque favorece la transferencia de oxígeno de la atmósfera al agua, la cantidad de rizomas y raíces en contacto con el agua y, en consecuencia, aumenta la eficacia del sistema (Bayona, 2000).

➤ Alternativa 4:

Al igual que los humedales, para cosechar las macrófitas, se necesita de una laguna, luego se realiza la selección de las especies a cultivar, siendo imprescindible contar con datos del agua del embalse. La recolección de las macrófitas puede ser manual o mecanizada.

#### **4.5 Seleccionar la(s) alternativa(s) para mejorar la calidad del efluente de la planta de potabilización**

Se realizó una matriz de selección, considerando los criterios ecológicos, continuidad de abastecimiento, costos, tiempo de ejecución, tiempo de capacitación del personal, espacio físico y operabilidad. (Ver tabla 4.7)

Al realizar el análisis de cada alternativa, se determinó que la alternativa 2, “inserción del sistema de flotación por aire disuelto (DAF)” obtuvo mayor puntuación después de totalizar la matriz de ponderación. Esto se debe a:

Para el criterio ecológico, el sistema de flotación tiene mejor aspecto sustentable. Desde el punto de vista de la mitigación de los efectos de la degradación ambiental, esta es válida o efectiva cuando la ejecución es en el menor tiempo posible. El tiempo de implementación se tomará en cuenta más adelante.

Hoja de matriz de selección!!!

El continuo abastecimiento de agua se ve favorecido con la ejecución de las alternativas 1 y 2, el sistema de flotación tiene mejor ponderación, porque si ocurre alguna avería de los equipos, puede corregirse con mayor prontitud, mientras que las otras alternativas es un poco complicado porque estos sistemas tienen equipos más grandes a la hora de utilizarlo (como grúas para traslado de la rejas, pantallas, entre otros).

Respecto a los costos, la alternativa 2 tiene más rentabilidad, porque se usaría el sedimentador como tanque y solo se le adicionaría el sistema de saturación, mientras que la alternativa 1 genera muchos más gastos, porque se debe construir el tanque, como también las alternativas 3 y 4, que los gastos referentes a ellos son elevados, ya que se trabajaría directo en el embalse y el traslado, la mano de obra, sale mucho más costoso.

El tiempo de ejecución, tiene un papel importante a la hora de tomar en cuenta una alternativa, debido a la proximidad de la época de sequía, por lo que se necesita la alternativa que ayude a mejorar la calidad del agua; el sistema DAF (alternativa 2) tendría una implementación rápida; además lograría efectos directos sobre el embalse, que está afectado por las diferentes actividades antropogénicas. Respecto a las otras alternativas, se demorarían meses en realizar todo el trabajo necesario para la implementación.

El tiempo de capacitación del personal en un sistema de flotación, es menor al que se tendría que utilizar en las alternativas 3 y 4, ya que los operadores de la planta, serían los encargados de trabajar en la nueva etapa instalada en el sedimentador, mientras que en las alternativas antes expuestas, debe capacitarse a un personal que trabaje en el embalse.

Respecto al menor espacio físico que se utilizaría lo tiene la alternativa 2, porque el sedimentador funcionaría como el tanque de flotación y el espacio a utilizar, sería donde se emplazará el sistema de saturación, mientras que

las otras alternativas si requieren de mayor espacio disponible, para su realización.

Para el criterio de operabilidad, las alternativas 1 y 2, tienen mejor evaluación, por ser sencillo su funcionamiento, mientras que para los ecotonos y el crecimiento de macrófitas, sería más complicado instaurar su operabilidad.

Es de hacer notar que ninguna de estas alternativas, desde el punto de vista de construcción e implementación, son excluyentes, solo que, el criterio de continuidad del servicio y desarrollo oportuno, cobran un papel preponderante. Lo anterior determina, que con la existencia de propósitos y recursos pueden desarrollarse o, bien paralelamente a la escogida o, en otras épocas contiguas.

La alternativa seleccionada está constituida principalmente por:

- Generador de agua saturada (saturador): tendrá un diseño presurizado entre (70-100) psi. El interior del equipo posee, unidades de transferencia de masa (aumentadores de área de contacto), permitiendo transferir el aire al agua y formar las microburbujas, se sabe por diseños experimentales que la cantidad de aire a transferir está dada entre un 7 a 13 % del volumen total del agua saturada a utilizar y, el porcentaje de agua saturada, es de un 10 % del agua total clarificada, se estima que por sedimentador, se utilizaran 100 L/s de agua saturada, para producir 1.000 L/s (capacidad nominal de cada sedimentador). De igual manera se tienen las tuberías de conducción y succión para generar agua saturada y la correspondiente para llevar el agua saturada hasta el sedimentador.
- Bomba centrífuga: modelo 8 HC, con motor eléctrico vertical de 75 Hp.

- Compresor: será de 15 Hp con un flujo másico no menor de 15,7 CFM, deberá ser trifásico preferiblemente con tensión nominal de 440 V, tipo HB (para régimen de funcionamiento severo), con hasta 96 arranques diarios.
- Recolector de lodo: estará formado por una pantalla perpendicular al flujo del sedimentador, con una sección de canal lo suficientemente amplia para permitir el flujo hacia los extremos del sedimentador, donde esta canal terminaría en dos fosas circulares donde van alojadas dos bombas de manejo de flujos, tanto sólidos como líquidos, para absorber al sobrenadante. Se estima también el uso de bombas eléctricas, en voltajes de 440 V. El material de construcción de la pantalla perpendicular será en fibra de vidrio, dado el alto nivel corrosivo del cloro, la misma se extenderá desde el borde inferior que está dentro del líquido hasta unos 30 cm del piso, para que el agua clarificada pase por debajo de manera tal, que no tenga obstrucción antes de ascender a los vertederos.
- Los tendidos eléctricos, se harán mediante las normas que están incluidas en el código eléctrico nacional.

La alternativa seleccionada, se resume en la figura 4.3.

Figura 4.3  
Diagrama de la alternativa seleccionada

Se realizaron ensayos a nivel de laboratorio utilizando el equipo de revoluciones controladas para la evaluación de la inserción del sistema de flotación por aire disuelto en la planta potabilizadora bajo estudio. (Ver tablas D.1 – D.15).

A partir de los primeros ensayos se determinó el tiempo de retención requerido para la flotación, obteniéndose buenos resultados tanto a los 5 como a los 30 minutos. Sin embargo, para este último los resultados obtenidos fueron mejores, representados en menores valores de color, turbiedad y aluminio, principalmente.

En los ensayos se utilizaron dos tipos de coagulantes presentes en el laboratorio, correspondientes al sulfato de aluminio líquido (SAL) y el policloruro de aluminio (PAC), dilucidando que éste último generaba la menor cantidad residual de aluminio, aunque es importante destacar que es más costoso que el SAL. En este sentido, se realizaron ensayos combinados el SAL y el PAC. Sus resultados fueron mejores, con respecto a los valores obtenidos cuando los coagulantes actuaron por separado.

Una vez obtenido el resultado anterior, se realizaron ensayos variando las revoluciones de la etapa de floculación, inicialmente en 10 rpm, hasta 25 y 30 rpm. En este caso, en el laboratorio de la planta no se contaba con los ambos coagulantes, sino solo SAL. A pesar de esto, se continuaron los análisis, arrojando mejores resultados a los obtenidos en la oportunidad que se ensayo con 10 rpm. A partir de las variaciones realizadas, se determinó que a 25 rpm, los valores de los parámetros físico-químicos disminuyeron, cumpliendo con el objetivo de mejorar la calidad del efluente.

Es importante mencionar que una de las limitantes, al realizar la evaluación con el ensayo de jarras, solo se simula el proceso hasta la etapa de flotación. Sin embargo, posterior a esta etapa se encuentra la etapa de filtración, lográndose una remoción de 75 % de los parámetros físico-químicos estudiados.

Finalmente, a manera demostrativa, se plasmó en una tabla comparativa, los valores de parámetros obtenidos aplicando el sistema convencional y mediante la inserción del sistema DAF al proceso convencional, siendo evidente la ventaja de utilizar el sistema DAF, reflejado en porcentajes (Ver tabla 4.8).

De manera similar se analizaron los valores promedios de los parámetros químico-sanitarios de los ensayos de jarros realizados, aplicando el sistema DAF y el agua cruda, evidenciándose la eficiencia de aplicar la alternativa seleccionada, los porcentajes de disminución son mayores del 50 %, a excepción del nitrógeno amoniacal, cuya disminución fue de un 15 % (Ver tabla 4.9).

#### **4.6 Estudiar la factibilidad técnico-económica de la(s) alternativa(s) seleccionadas**

Se debe hacer una acotación en este objetivo y, es que el problema que presenta ésta planta (o todas las plantas de potabilización de Venezuela), no cumplen con una factibilidad técnico-económica, sino con una relación costo-beneficio, ya que los gastos que se generan en la planta son cantidades grandes, pero como la investigación estaba casi concluida, se realizó dicha factibilidad, arrojando los siguientes resultados.

Para que la factibilidad técnica suceda, deben existir aspectos técnicos que puedan ser aplicados a la propuesta como alternativa seleccionada.

Si bien sabemos que el flóculo de la planta Dr. Alejo Zuloaga no sedimenta, y además, técnicamente ocurre un proceso inverso llamado flotación. Éste proceso invierte la sedimentación, flotando las partículas aglomeradas en el floc y no sedimentadas por ser de menor peso molecular.

El principio básico se llama flotación, no es más que agua saturada a presión constante, obtenida con la generación de microburbujas, fluyendo en estado

metaestable, (casi en equilibrio) son idóneas para permanecer en el seno del líquido, con velocidad discreta de ascenso, adhiriéndose al floc y flotando ambos logran clarificar el agua floculada. Es un proceso demostrado, y en la práctica es aplicado. Se usa para provocar desplazamientos ascendentes de conjuntos de partículas, proclives a la adherencia de microburbujas no diluibles por saturación en el seno del agua.

**Tabla 4.8**

**Comparación de etapa de sedimentación vs flotación**

PARÁMETRO	FLOTACIÓN			SEDIMENTACIÓN	DIFERENCIA (%)
	Valor mínimo	Valor promedio	Valor máximo	Valor promedio	
Color (Pt-Co)	5,000	17,220	30,000	24,300	29
Turbiedad (NTU)	1,290	2,870	2,720	4,210	32
pH	5,930	6,550	6,930	6,810	4
Aluminio residual (ppm)	0,130	0,478	1,217	0,635	25
Tamaño de floc	C	D	F	D	-
Tiempo de aparición	1,000	1,500	2,000	1,000	50

Fuente: Hidrocentro, (2011)

**Tabla 4.9**  
**Valores promedios de parámetros químico-sanitarios**

<b>Parámetro físico-químicos</b>	<b>Valores promedios agua cruda</b>	<b>Valor promedio agua tratada</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
Nitrógeno amoniacal	1,552	0,264	82,987
Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	0,960	0,779	18,871
Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	2,511	1,069	57,431
Fósforo (mg/L)	0,433	0,081	81,285
Plancton (USA)	-	336,167	

El proceso ha sido aplicado extensamente en la minería, y más recientemente con la aparición de procesos eutróficos en lagos y cuerpos de aguas, intervenidos antrópicamente, cuya característica esencial es la proliferación de algas por altas concentraciones de nutrientes, sobre todo nitrógeno y fósforo.

Esta aplicación es común observarla en Suramérica, en las cuencas del río Paraná, Uruguay y río de La Plata.

El CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), lo recomienda para tratar aguas con baja turbiedad, aguas con colores orgánicos, es decir, de considerable concentración de ácido fúlvico y húmico, y sobre todo para aquellas aguas que tienen una muy alta concentración de células vegetales, de microalgas (mg/L).

Recientemente esta tecnología se hace imprescindible para el tratamiento de aguas eutrofizadas y, en ese sentido, empresas especializadas han emprendido desarrollos de plantas prototipos. Su comercialización parece

ser más inminente a medida que la expansión demográfica invade ambientes cercanos a los grandes embalses o depósitos de aguas.

En resumen, el proceso está definido desde el punto de vista conceptual, dada la condición natural de ascenso de toda burbuja en el seno de un líquido de densidad mucho mayor que la de él, y las propiedades capilaridad y tensión superficial propias en la adhesión de las microburbujas del flóculo. Desde el punto de vista tecnológico se puede demostrar su creciente aplicación, en la clarificación de agua con altísimo contenido de microalgas.

La empresa SEINCO (empresa uruguaya), construye este tipo de sistema (flotación), ya que en su país, los lagos y embalses tienen alto contenido de nutrientes.

La aplicación de una bomba y un compresor dentro de un recipiente hermético, no es otra cosa más que la aplicación de la Ley de Henry, que ha mayor presión se encuentra mayor concentración de gas disuelto en el agua y que el transporte del agua saturada hasta el lecho de un agua a clarificar es un medio común por tuberías, el proceso es de fácil aplicación, y la dificultad sería más bien a la recolección del sobrenadante, ya que es por medios mecánicos.

El sistema de flotación, para ser técnicamente factible, debe ser operable, se le debe aplicar mantenimiento preventivo y correctivo, para tener un proceso de mejor clarificación del agua en estudio.

La factibilidad económica evalúa el beneficio que se obtiene con una inversión; esta inversión será confirmada, mediante cálculos de valor actual, equivalente actual y tasa interna de retorno, donde los valores deben ser positivos, para que el proyecto de inversión sea rentable.

En las inversiones públicas debe existir un propósito; este propósito lo manifiestan las personas involucradas en el hecho, personas que saben que existen necesidades no cubiertas por factores externos, en este caso la antropogenia y delante de este factor que no puede ser manejado por la

infraestructura actual de la planta, existe el propósito de utilizar la misma infraestructura, insertando un sistema de flotación.

La evaluación de costos se desarrolló mediante precios suministrados por proveedores y ecuaciones desarrolladas por la Ingeniero Giugni (2005), los costos de equipos, costos operacionales y los modelos de rentabilidad del sistema DAF se encuentran en el apéndice A.

La inversión inicial del proyecto consta de dos capitales, capital fijo y capital de trabajo; en el capital fijo se calculó los costos de equipos principales suministrados por un proveedor (ver presupuesto en la tabla 4.25), los costos de tuberías, estudios y proyecto, supervisión y mantenimiento, arranque, pruebas y contingencia, instrumentación y control, acondicionamiento del terreno y costos eléctrico, se calcularon por medio de porcentajes que dependieron de la importancia de dichos costos, estos porcentajes fueron respecto al costo de los equipos principales, por ser los costos más elevados de todo el proyecto. El capital de trabajo, al igual que los costos anteriores, también fue un porcentaje de los costos total de equipos. Los costos operacionales se desarrollaron mediante costos de manufactura ya sean directos o indirectos, los primeros abarcaron la parte de materiales, mano de obra, entre otros, muchos de estos costos los cubre la planta, ya que el sistema DAF formaría parte del proceso convencional del tratamiento que se realiza actualmente en la planta; mientras que los indirectos fueron seguros médicos, gastos generales, mantenimientos y otros. A la hora de calcularlos, se realizaron mediante porcentajes, pero más específicos (Ver apéndice A). Respecto a los modelos de rentabilidad, el proyecto de inversión dio positivo, indicando que el sistema DAF es rentable desde el punto de vista de los tres modelos utilizados.

La propuesta del sistema DAF, es una alternativa que mejora el proceso de potabilización, puede lograr una mayor producción de agua potable, y

además con él se obtienen ahorros de unos 30 % en dosificación de los coagulantes utilizados actualmente en la planta.

Dichos ahorros fueron calculados con las cisternas anuales que se necesitan y el 30 % que se ahorraría con el sistema DAF en la etapa del proceso, dejando los siguientes resultados:

**Tabla 4.10**

**Cantidad de sustancias químicas anuales y ahorros esperados para la planta de estudio**

<b>Cantidad de cisternas de SAL (año)</b>	<b>Costos anuales (Bs/año)</b>	<b>Ahorro del 30 % cisternas de SAL (años)</b>	<b>Ahorro 30 % (Bs/año)</b>
546	21.840.000,00	164	6.560.000,00

Los flujos monetarios netos que dieron rentable al proyecto desde el año 0, hasta los 5 años de vida del proyecto, se tabulan a continuación:

**Tabla 4.11**

**Flujos monetarios desde el año 0 hasta los 5 años de vida del proyecto**

<b>Año</b>	<b>Precio cisterna (Bs)</b>	<b>Monto anual en cisternas (Bs/año)</b>	<b>Ahorro del 30 % (Bs/año)</b>	<b>Costos operacionales (Bs)</b>	<b>Flujos monetarios netos (Bs)</b>
0	40.000,00	21.840.000,00	6.560.000,00	558.747,00	2.706.303,00
1	46.000,00	25.116.000,00	7.544.000,00	726.371,10	6.817.628,90
2	52.900,00	28.883.400,00	8.675.600,00	944.282,43	7.731.317,57
3	60.800,00	33.196.800,00	9.971.200,00	1.227.567,16	8.743.632,84
4	70.000,00	38.220.000,00	11.480.000,00	1.595.837,31	9.884.162,69
5	80.500,00	43.953.000,00	13.202.000,00	2.074.588,50	11.127.411,50

Tabla 4.12 Presupuesto

OBRA :		SISTEMA DE PRE-TRATAMIENTO DE AGUA POR SATURACION DE AIRE			FECHA : 21-03-11	
UBICACIÓN:		PLANTA DE TRATAMIENTO ALEJO ZULOAGA, MUNICIPIO LIBERTADOR, ESTADO CARABOBO.			HOJA N°: 01	
N°	COD.	DESCRIPCIÓN	UND.	CANT.	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
		<b>CONFECCIÓN E INSTALACIÓN DE TANQUE DE SATURACIÓN:</b>				
1	S/C	Confección de tanque de saturación	UND	1,00	30.000,00	30.000,00
2	S/C	Elementos aumentadores del área de contacto entre el agua y el aire en rollos de 50 m ø 1/2"	ROLLO	110,00	100,00	11.000,00
3	S/C	Colocación e instalación de accesorios de tanque de saturación	UND	1,00	3.500,00	3.500,00
		<b>CONFECCIÓN E INSTALACIÓN DE SISTEMA DE TUBERÍAS DE AGUA SATURADA</b>				
4	S/C	Suministro de brida local de PVC Ø 250 mm PN16	PZA	9,00	436,14	3.925,26
5	S/C	Suministro de espiga borde batido PEAD Ø 250 mm	PZA	6,00	652,12	3.912,72
6	S/C	Tapón junta automática por brida ciega Ø 250 mm	PZA	3,00	1.414,32	4.242,96
7	S/C	Suministro de válvula vástago ascendente PN 16 Ø 250 mm	PZA	3,00	5.372,00	16.116,00
8	S/C	Suministro de junta Dresser universal para acero-PVC Ø 250mm	PZA	4,00	1.292,57	5.170,28
9	S/C	Suministro de junta Dresser universal para PVC Ø 250mm	PZA	3,00	1.293,57	3.880,71
10	S/C	Instalación de tubería y soldaduras por termofusión	UND	3,00	20.552,72	61.658,15
11	S/C	Suministro de codo 90° PEAD N5 de Ø 250 mm	PZA	18,00	1.762,90	31.732,20
12	S/C	Suministro de Tee de PEAD N5 Ø 250x250x250 mm	PZA	2,00	2.264,63	4.529,26

Tabla 4.12 Presupuesto (Continuación)

OBRA :	SISTEMA DE PRE-TRATAMIENTO DE AGUA POR SATURACION DE AIRE					FECHA : 21-03-11	
	UBICACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO ALEJO ZULOAGA, MUNICIPIO LIBERTADOR, ESTADO CARABOBO.					HOJA N°: 02	
N°	COD.	DESCRIPCIÓN	UND.	CANT.	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL	
13	S/C	Transporte en obra y colocación de tubería de PEAD N5 Ø 250 mm (10")	M	252,00	15,32	3.860,64	
14	S/C	Suministro de tubería de acero Ø 250 mm L= 6 metros	UND	6,00	2.150,00	12.900,00	
15	S/C	Suministro de codo 90° acero bridado PN 16 Ø 250 mm	PZA	15,00	2.268,00	34.020,00	
16	S/C	Suministro de unión Tee de acero Ø 200x200x200 mm bridada PN 16	PZA	1,00	2.576,00	2.576,00	
17	S/C	Suministro de válvula mariposa tipo Waffer K1 PN 16 Ø 200 mm	PZA	1,00	5.420,00	5.420,00	
18	S/C	Suministro de válvula mariposa tipo Waffer K1 PN 10 Ø 250 mm	PZA	1,00	4.610,00	4.610,00	
19	S/C	Suministro de set de pernos G2 DN 7/8 x 3" para brida Ø 250 mm PN 16	UND	36,00	56,92	2.049,12	
20	S/C	Suministro de set de pernos G2 DN 3/4 x 3" para brida Ø 200 mm PN 10	UND	3,00	46,92	140,76	
21	S/C	Suministro de brida con cuello para soldar PN 16 Ø 250 mm	PZA	37,00	430,00	15.910,00	
22	S/C	Suministro de brida con cuello para soldar PN 10 Ø 200 mm	PZA	1,00	380,00	380,00	
23	S/C	Suministro de set de espárragos con tuercas G2 DN 7/8 x 41/2"	UND	2,00	69,54	139,08	
24	S/C	Suministro de set de espárragos con tuercas G2 DN 3/4 x 4"	UND	2,00	59,64	119,28	
25	S/C	Confección, instalación de accesorios y acondicionamiento de tubería de descarga equipos de bombeo y sistema de saturación de agua	UND	1,00	19.999,05	19.999,05	

Tabla 4.12 Presupuesto (Continuación)

<b>OBRA :</b>	<b>SISTEMA DE PRE-TRATAMIENTO DE AGUA POR SATURACION DE AIRE</b>				<b>FECHA : 21-03-11</b>	
<b>UBICACIÓN:</b>	<b>PLANTA DE TRATAMIENTO ALEJO ZULOAGA, MUNICIPIO LIBERTADOR, ESTADO CARABOBO.</b>				<b>HOJA N°: 03</b>	
<b>N°</b>	<b>COD.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UND.</b>	<b>CANT.</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
		<b>EQUIPAMIENTO Y ELECTRIFICACIÓN</b>				
26	S/C	Suministro y colocación de tablero de control para motor de 75 hp, con variador de frecuencia trifásico, para el control de la velocidad	UND	2,00	90,00	180,00
27	S/C	Suministro y colocación de compresor de aire de 15 hp de doble cabezal de 16 C.F.M.	UND	1,00	113.000,00	113.000,00
28	S/C	Suministro y colocación de tablero de control para motor de 15 hp, con sistema de protección integral	UND	1,00	16.000,00	16.000,00
29	S/C	Suministro de bomba centrifuga para 100 L/s Y 108 M.C.A.	UND	3,00	180.000,00	540.000,00
30	796-21	Construcción de bancada revestida en concreto con dos tubos 2" para baja tensión, incluye excavación y relleno	M	15,00	172,72	2.590,80
31	S/C	Suministro de cable de cobre, trenzado, revestido, TTU calibre # 4 AWG	M	45,00	52,50	2.362,50
32	798-03	Instalación de cable de cobre, trenzado, revestido, TTU calibre # 4 AWG; desde el transformador hasta el tablero incluye colocación de conectores	M	45,00	17,48	786,60
		<b>OBRA COMPLEMENTARIA</b>				
33	S/C	Construcción de pantallas de fibra y canales para captación de sobrenadante	UND	1,00	714.000,00	714.000,00
34	S/C	Construcción , suministro de pantalla (fibra de vidrio) deflectora de agua saturada	UND	2,00	110,00	220,00
<b>SUB-TOTAL BsF.</b>					<b>1.670.931,38</b>	
<b>I.V.A. (12 %)</b>					<b>200.511,77</b>	
<b>TOTAL</b>					<b>1.871.443,14</b>	

**TABLA 4.6**  
**PARÁMETROS TÍPICOS DE PROCESO CONVENCIONAL**

Proceso	Parámetros	Unidad	Valores Típicos	Valor Promedio Proceso (anual)	Observaciones
Rompe carga	Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mayor a 60	114,840	Dentro de rango
	Color	UCV(Pt-Co)	menor de 150	60,000	Dentro de rango
	pH	-	6,0 - 8,5	7,110	Dentro de rango
	Oxígeno disuelto	mg/L	mayor a 4	3,780	Fuera de rango, atribuible a la presencia de algas en el embalse
	Turbidez	NTU	menor de 250	8,400	Dentro de rango
Coagulación	Gradiente de velocidad	s <sup>-1</sup>	500 – 2000	108,300	Fuera de rango, debido a la ausencia de agitadores mecánicos, etapa en rehabilitación
	pH	-	6,0 – 6,5	6,810	Fuera de rango, debido a la presencia de fitoplancton, de características alcalinas.
	Tiempo de retención	s	1 – 10	0,028	Fuera de rango debido a la ausencia de turbinas agitadoras en la etapa anterior.
Floculación	Gradiente de velocidad	s <sup>-1</sup>	20 – 70	36,500	Dentro de rango
	Tiempo de retención	Minutos	10 – 30	19,200	Dentro de rango
	pH	-	6,0 – 6,5	6,390	Dentro de rango

**TABLA 4.6 (CONTINUACIÓN)**  
**PARÁMETROS TÍPICOS DE PROCESO CONVENCIONAL**

Proceso	Parámetros	Unidad	Valor Típico	Valor Promedio Proceso (anual)	Observaciones
<b>Sedimentación</b>	Tiempo de retención	h	2,00 – 4,00	1,13	Fuera de rango
	Turbidez	NTU	5 (recomendable) 15-20 (máx. aceptable)	4	Dentro de rango
	Profundidad	m	> 3,00	3,15	Si cumple
	Velocidad horizontal	m/s	0,003 – 0,015	0,017	Fuera de rango, atribuido a la ausencia de paletas rompedoras de líneas de corrientes de flujo desarrollado.
<b>Filtración</b>	Aluminio	mg/L	máx. 0,2	Dato no suministrado	-
	Carrera de filtración	h	> 15 < 40	24	Si cumple
	Color	UCV (Pt-Co)	5 – 15	Dato no suministrado	-
	Hierro	mg/L	0,3	Dato no suministrado	-
	Turbidez	NTU	1 (recomendable) 5 (máx. permisible)	Dato no suministrado	-
<b>Desinfección</b>	Cloro residual	mg/L	1	Dato no suministrado	-

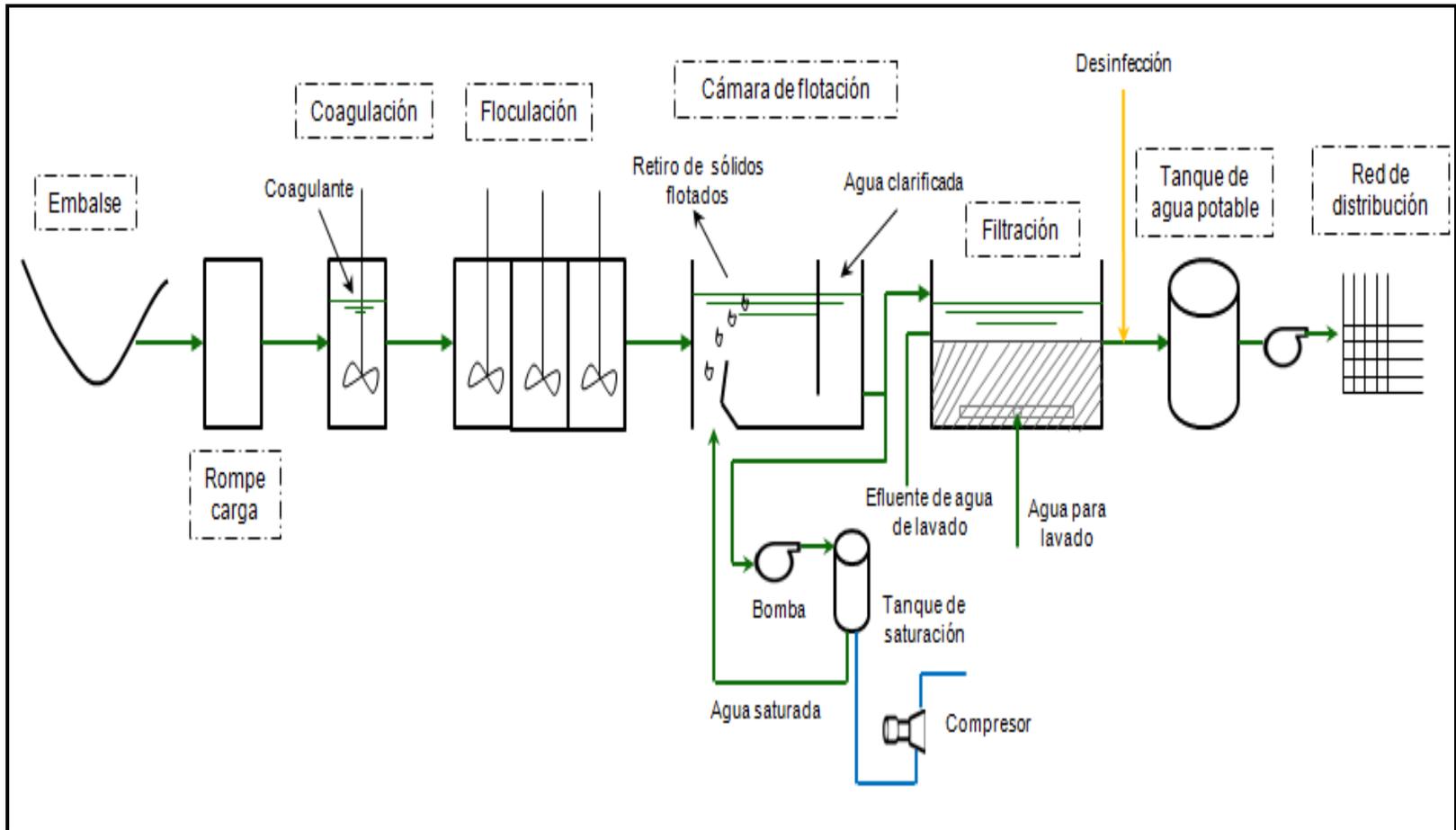




Tabla 4.7

Matriz de selección

Criterios	Peso (%)	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3			Alternativa 4		
		Escala	Sub total	Total									
<b>Ecológico</b>	<b>20</b>												
✓ Aspecto sustentable	40	9	3,60	16,8	9	3,60	16,8	7	2,80	17,6	7	2,80	17,6
✓ Diversidad biológica	60	8	4,80		8	4,80		10	6,00		10	6,00	
<b>Continuidad de abastecimiento</b>	<b>10</b>	8	8,00	8,0	8	8,00	8,0	5	5,00	5,0	4	4,00	4,0
<b>Costos</b>	<b>30</b>												
✓ Materiales	40	3	1,20	10,5	9	3,60	23,0	4	1,60	9,9	6	2,40	13,4
✓ Mano de obra	35	3	1,05		8	2,80		2	7,00		3	1,05	
✓ Traslado	25	5	1,25		5	1,25		4	10,00		4	1,00	
<b>Tiempo de ejecución</b>	<b>10</b>	4	4,00	4,0	9	9,00	5,0	5	5,00	5,0	4	4,00	4,0
<b>Tiempo de capacitación personal</b>	<b>10</b>	9	9,00	9,0	9	9,00	9,0	5	5,00	5,0	5	5,00	5,0
<b>Espacio físico a utilizar</b>	<b>10</b>	2	2,00	2,0	10	10,0	10,0	4	4,00	4,0	6	6,00	6,0
<b>Operabilidad</b>	<b>10</b>	10	10,00	10,0	10	10,00	10,0	8	8,00	8,0	8	8,00	8,0
<b>Total</b>	<b>100</b>	-	-	<b>60,3</b>	-	-	<b>81,8</b>	-	-	<b>54,5</b>	-	-	<b>58,0</b>



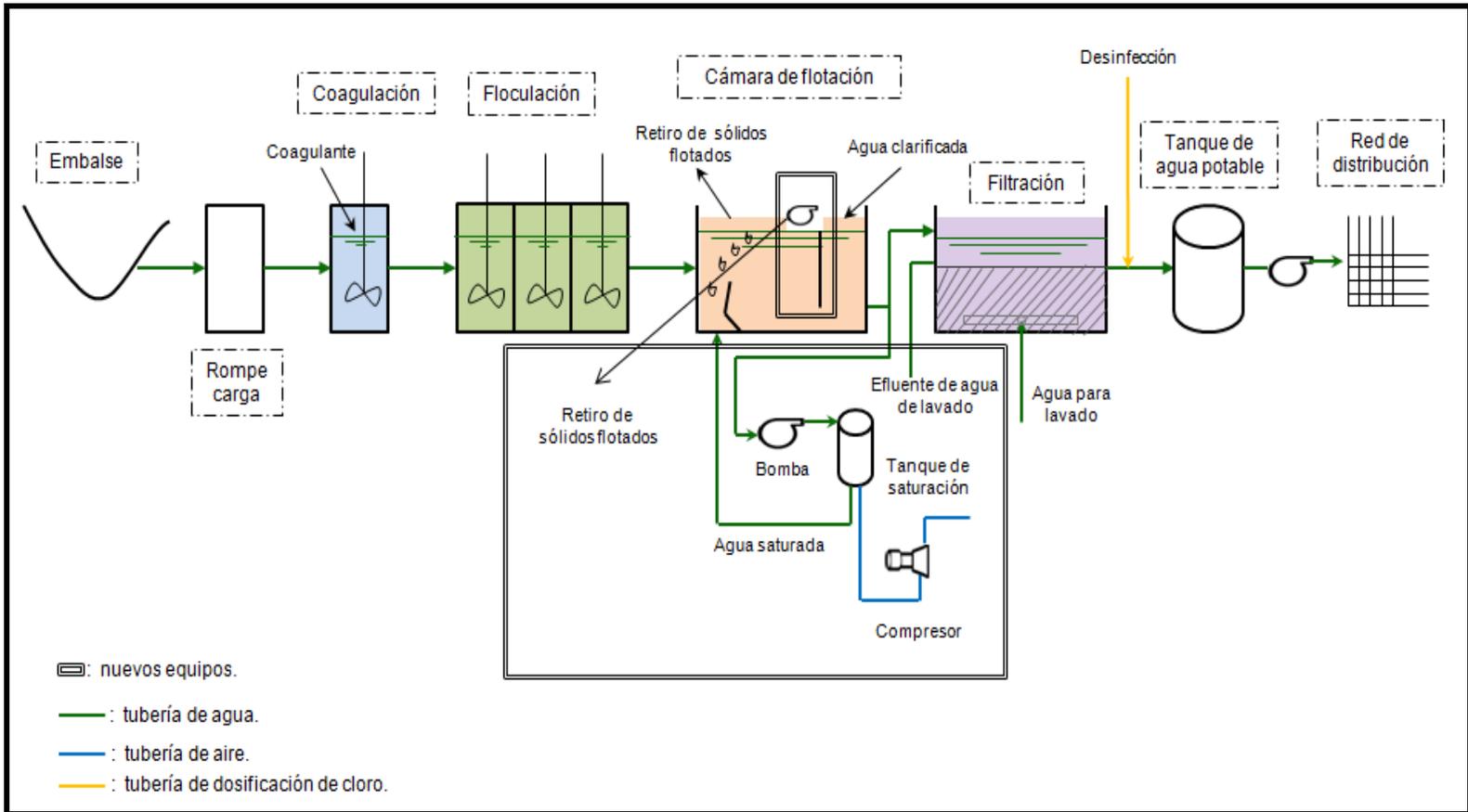


Figura 4.3. Diagrama de flujo de la alternativa seleccionada.

## **CONCLUSIONES**

- ❖ El embalse Pao Cachinche posee una gran cantidad de descargas agroindustriales y domésticas en su cauce, ocasionando la presencia de nutrientes, nitrógeno y fósforo principalmente.
- ❖ El nivel trófico del embalse Pao Cachinche es hipereutrófico.
- ❖ La condición del afluente de la planta posee características que hacen necesaria la implementación de un cambio en las etapas del proceso.
- ❖ Los modelos matemáticos recomendados para la determinación del grado de eutroficación de un lago o embalse tropical, son los propuestos por Henry Salas y Paloma Martínó. Sin embargo, para poder desarrollarlos se necesitan datos de al menos unos dieciocho meses.
- ❖ Teóricamente los sistemas convencionales de potabilización están constituidos por las siguientes etapas: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, tal como se encuentran en la planta potabilizadora bajo estudio.
- ❖ De acuerdo a los parámetros típicos nominales teóricos del sistema convencional y los presentes en planta, no existen muchas discrepancias entre ambos.
- ❖ A partir de la matriz de selección, se identificó la alternativa de introducir un sistema DAF, dentro del proceso convencional existente en la planta.
- ❖ Se realizó la comprobación exitosa de la utilidad de la alternativa seleccionada, a través de ensayos de jarros.

- ❖ Los valores de los parámetros siguientes: color, turbiedad, pH y aluminio residual obtenidos en los ensayos de jarros, fueron menores a los obtenidos al realizar el proceso convencional de potabilización, cumpliendo con los valores exigidos en la norma sanitaria de calidad de agua potable.
- ❖ Se obtuvieron mejores resultados con un tiempo de residencia de 30 minutos en la etapa de flotación, representados en menores valores de color, turbiedad y aluminio, principalmente.
- ❖ El rango óptimo de dosificación de coagulante fue de (70-90) ppm.
- ❖ Se comprobó la eficiencia del proceso de potabilización al usar los coagulantes presentes en planta, tanto el sulfato de aluminio líquido, como policloruro de aluminio.
- ❖ Los niveles de aluminio residual fueron menores en los ensayos de jarros donde se utilizó el policloruro de aluminio como coagulante.
- ❖ De acuerdo a los ensayos realizados los mejores valores de los parámetros físico-químicos, se obtuvieron al operar las pruebas de jarros a 25 rpm, durante la etapa de floculación.
- ❖ Los costos de la inversión inicial son elevados, pero la empresa cuenta con un presupuesto que se va a emplear en la alternativa seleccionada.
- ❖ Los modelos de rentabilidad utilizados, arrojaron valores positivos, es decir, confirmaron que el sistema DAF es un proyecto rentable; esto indica que actualmente es la mejor alternativa para la potabilización del agua, cuando el afluente está eutroficado.

- ❖ Con la inserción del sistema DAF en el proceso, se espera un ahorro para la planta de unos 30 % en los coagulantes utilizados, y una mayor producción de agua potable.

## **Recomendaciones**

- ❖ Instalar el sistema DAF evaluado en el presente trabajo, para así aumentar la calidad y la producción del efluente.
- ❖ Realizar un plan de recuperación del embalse, trabajando en conjunto con las autoridades y las comunidades cercanas a Pao Cachinche.
- ❖ Implementar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo de todos los equipos instalados en planta, para evitar el descenso en el suministro de agua.
- ❖ Establecer un plan de seguimiento del funcionamiento de los nuevos equipos a instalar, para así garantizar su vida útil.
- ❖ Instruir a los operadores de la planta en cuanto al manejo, mantenimiento y funcionamiento de un filtro de carbón.
- ❖ Establecer nuevos ensayos en tiempo de invierno, para de esta manera verificar si es necesario el uso del sistema DAF en este período y no sólo en verano, como fue comprobado.
- ❖ Utilizar una mezcla de coagulantes, entre el sulfato de aluminio líquido y el policloruro de aluminio, para así disminuir la cantidad de cloro residual presente en el efluente.
- ❖ Ejecutar pruebas con diferentes coagulantes, para aumentar la calidad del efluente y garantizar el suministro de agua potable.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBOLEDA, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tercera edición. Tomo I. McGraw-Hill. Colombia.

ASCE, AWWA, CSSE. (2011). *Water treatment plant design*. Sexta Edición. McGraw Hill. Estados Unidos.

BAYONA, J. (2010). *Humedales artificiales, una opción para tratar aguas residuales de poblaciones pequeñas*. [publicación en línea]. Fecha de consulta: 07 de Febrero de 2010. Disponible en: <http://www.dicat.csis.es/rdcsic/rdqu19esp.htm>

CÁRDENAS, Y. (2000). Tratamiento del agua. Coagulación y floculación. Instituto SEDAPAL. [publicación en línea]. Fecha de consulta: 17 de marzo 2010. Disponible en: <http://www.sedapal.com.pe/bvs/coagulacion-floculacion.pdf>.

CAPENA, L. (1992). *Manual V: criterios de diseño. Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano*. Publicado por Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Perú.

CARLSON, R. (1997). *A trophic state index for lakes*. *Limnology. Oceanography*. Páginas: 22, 361-369.

CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). (2004). *Manuales para el tratamiento de agua para consumo humano*. Perú.

COLMENARES, G. (2002). *Curso básico de control de procesos, calidad y potabilización de aguas*. Hidrocentro C.A. Venezuela.

DEGREMONT. (1979). *Manual técnico del agua*. Cuarta edición. Publicado por Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). España.

GONZÁLEZ, E., MATOS, M., ORTAZ, M., PEÑAHERRERA, C. (2000). *Caracterización limnológica del embalse Pao Cachinche (estados Carabobo y Cojedes)*. Trabajo de la Universidad Central de Venezuela, facultad de Biología, propuesto por la Hidrológica del Centro C.A. Venezuela.

GREGORY R., EDZWALD J., ZABEL T. (2002). *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria. Sedimentación y flotación*. España.

GIUGNI, L., ETTEDGUI, C., GONZÁLEZ, I., GUERRA, V. (2005). *Evaluación de proyectos de inversión*. Cuarta edición, Editado por la Universidad de Carabobo. Venezuela.

HURTADO, J. (2007). *El proyecto de investigación, comprensión holística de la metodología y la investigación*. Sexta edición. Editado por ediciones Quirón. Venezuela.

JIMENO, A., BALLESTEROS, M. (2009). *Biología 2*. Primera edición. Grupo Promotor Santillana. España.

KEMMER, F., MCCALLION, J. (2000). Manual del agua: su tratamiento, naturaleza y aplicaciones. Nalco, Chemical Company, tomo I. McGraw-Hill. México.

LETTERMAN R., AMIRTHARAJAH A., O'MELIA C., (2002) *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministro de agua comunitaria. Coagulación y floculación*. McGraw Hill. España.

LLIMONA, X. (1985). *Plantas inferior. Historia Natural dels Països Catalans, 4*. Enciclopedia Catalana, S. A. España.

LONGSDON G., HESS A., HORSLEY M., FULLER, G. (2002). *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria*. Guía para selección de procesos de tratamiento de agua. España.

LONHOLDT, J. (1976). *Nutrient engineering*. Capítulo L 14 de publicación Coastal pollution control- WHO training course. Dinamarca.

MARTINO, P., SALAS, J. (1981-1990). *Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. América Latina y el Caribe*. Programa regional de CEPIS/HPE/OPS.

MELACK, J., MATSUI, K., AZEVEDO, S., BARICA, J., GREESINGER, B. (2001). *Planificación y manejo de lagos y embalses: Una visión integral de la eutroficación*. Serie de publicaciones técnicas (PNUMA). Osaka/Shiga.

*Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos*. (1995). Gaceta N° 5021. Venezuela.

*Normas sanitarias de calidad del agua potable*. (1998). Gaceta N° 36395. Venezuela.

PACKHAM, R. (1964). *Studies of organic color in natural water*. Pro. Soc. Water treat.

PARRA, G. (1977). *Estudio integral sobre la contaminación del lago de Maracaibo y sus afluentes. Parte I: Estrecho de Maracaibo y Bahía El Tablazo*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, DISCA, Venezuela.

PORCELLA, D., BISHOP, A. (1975). *Comprehensive management of phosphorous water pollution*. Ann Arbor Science. Estados Unidos.

REDFIELD, A., KETCHEM B., BUMPUS D. (1955) *The hydrography of lake Maracaibo, Venezuela*. Woods hole oceanographic institution, report to Creole Petroleum Corporation, reference N ° 55-9. (Unpublished manuscript).

ROMERO, J. (1999). *Potabilización del agua*. Tercera edición. Alfaomega. México.

SEINCO. (2010). *Seminario I, "Tecnología de clarificación de agua por flotación por aire disuelto"*. Uruguay. [publicación en línea]. Fecha de consulta: 13 de septiembre de 2010. Disponible en: [www.SEINCO.com.uy](http://www.SEINCO.com.uy)

UPEL, UNESB. (2008). *Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales*. Cuarta edición. Editado por FEDUPEL. [publicación en línea]. Fecha de consulta: 10 de enero de 2011. Disponible en: <http://proyecto-internet.com/upel/cap2-investigacion-campo.htm>

U.S.E.P.A. (1975). *Process design manual for suspended solids removal, office of technology transfer*. Estados Unidos.

VOLLENWEIDER, R. (1971). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorous as factors in eutrophication*. Organization for economic cooperation and development. Francia.

## CÁLCULOS TÍPICOS

En ésta sección se presentan de forma detallada los modelos matemáticos empleados en el diseño de los equipos de la alternativa seleccionada para la adecuación del sistema de potabilización en la planta Dr. Alejo Zuloaga.

**Estimación de costos relacionados a la implementación de nuevas etapas al proceso convencional. Es de hacer notar que este proyecto de inversión, tendrá un tiempo de vida útil de 5 años.**

➤ **Evaluación técnico-económica para la instalación del sistema DAF en la planta.**

La evaluación económica del sistema DAF, se desarrolló a través de las siguientes ecuaciones:

❖ **Inversión inicial:**

$$II = CF + CT \quad (A.1) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

II: inversión inicial del proyecto, (Bs)

CF: capital fijo, (Bs)

CT: capital de trabajo, (Bs)

✓ **Capital fijo:**

$$CF = \sum \text{costos}_{\text{capital.fijo}} \quad (A.2) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

costos<sub>capital.fijo</sub>: costos asociados al capital fijo, (Bs)

El capital fijo comprende aquella porción de inversión destinada a la compra de los activos fijos tangibles y a la compensación de los activos fijos intangibles.

Para el sistema DAF, se consideró como activos fijos tangibles el costo de los equipos principales (compresores, bombas, generadores de saturación, pantallas, tuberías), éstos se describirán a continuación:

✓ **Costo de equipos:**

$$C_{eq.p} = \sum_{i=1}^n C_{ei} \quad (A.3) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

$C_{eq.p}$ : costo total de equipos, (Bs)

$C_{ei}$ : costo por equipo, (Bs)

n: número de equipos, (adim)

El costo de los equipos principales se fija según condiciones del mercado. A continuación se presenta el costo de cada equipo del sistema DAF:

**Tabla A.1. Costo de los equipos a utilizar**

<b>Equipos principales</b>	<b>Costo (Bs)</b>
Saturador	250.000,00
Bomba centrífuga	180.000,00
Compresor	113.000,00
Pantalla	714.000,00
Bomba de succión	10.000,00

Fuente: Presupuesto suministrado, (2011)

Por lo que el costo de los equipos será:

$$C_{eq.p} = (250.000,00 + 180.000,00 + 113.000,00 + 714.000,00 + 10.000,00)Bs$$

$$C_{eq.p} = 1.267.000,00Bs$$

✓ **Costo de tuberías:**

Para la adquisición y montaje de tuberías del sistema, como el estado físico de los materiales predominantes en el proceso es gas y líquido, se determina como un 50 % del costo total de equipos.

$$C_t = 0,50 \cdot 1.267.000,00Bs$$

$$C_t = 633.500,00Bs$$

Para este estudio, los activos intangibles comprenderán: estudios y proyectos; supervisión y mantenimiento; arranques, pruebas y contingencias;

instrumentación y control; acondicionamiento del terreno y finalmente costos eléctricos.

✓ **Costos de estudios y proyecto:**

Para estos estudios, se utilizará un porcentaje del 35 % del costo total de equipos:

$$C_{ep} = 0,35 \cdot 1.267.000,00Bs$$

$$C_{ep} = 443.450,00Bs$$

✓ **Costos de supervisión y mantenimiento:**

Estos costos por lo general los cubre la empresa, porque cuenta con personal laborando en ella y este proyecto sería parte del proceso actual.

➤ **Costo de arranque, pruebas y contingencias:**

Para estimar este costo se considera como un 10 % del costo total de equipos.

$$C_{apc} = 0,10 \cdot 1.267.000,00Bs$$

$$C_{apc} = 126.700,00Bs$$

➤ **Costo de instrumentación y control:**

Para este costo, se tomó un porcentaje del 15 % del costo total de equipos.

$$C_{ic} = 0,15 \cdot 1.267.000,00Bs$$

$$C_{ic} = 190.050,00Bs$$

➤ **Costo de de acondicionamiento del terreno:**

Se consideró un 15 % de los costos total de equipos.

$$C_{at} = 0,15 \cdot 1.267.000,00Bs$$

$$C_{at} = 190.050,00Bs$$

➤ **Costos eléctricos:**

Para estos costos, se tomará un 20 % del valor de los costos total de equipos.

$$C_{el} = 0,20 \cdot 1.267.000,00Bs$$

$$C_{el} = 253.400,00Bs$$

Reemplazando y evaluando todos los costos asociados al capital fijo, estimados anteriormente, en la ecuación A.2, se tiene:

$$CF = 3.104.150,00Bs$$

➤ **Capital de trabajo:**

El capital de trabajo comprende costos de inventario de producto, por salarios, efectivo en caja, e inventario de repuestos; considerando únicamente esté último debido a que el resto de los costos se encuentran previamente cubiertos por la empresa.

Se asume el costo de inventario de repuestos que a su vez será el capital de trabajo como un 15 % del costo total de equipos por lo que la ecuación queda expresada como:

$$CT = (15\%) \cdot C_{eq.p} \quad (A.4) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

Sustituyendo:

$$CT = 0,15 \cdot 1.267.000,00Bs$$

$$CT = 190.800,00Bs$$

Sustituyendo los montos de capital fijo y capital de trabajo en la ecuación A.1 se tiene:

$$II = (3.104.150,00 + 190.800,00)Bs$$

$$II = 3.294.950,00Bs$$

➤ **Evaluación de los costos operacionales:**

Se dividen en dos grupos los costos de manufactura directos y los costos de manufactura indirectos, a continuación se detallan:

➤ **Costos directos de manufactura:**

Éstos abarcan los costos de operadores de planta, supervisor de turno, laboratorio, materiales y mantenimiento. Como se ha explicado anteriormente la mayoría de estos costos se encuentran previamente cubiertos por la empresa, para los costos directos de manufactura solo se consideran los

referentes a materiales y mantenimiento por lo que su ecuación queda expresada como sigue:

$$\text{CMD} = (\text{material} + \text{mano.de.obra}) \cdot \text{CF} \quad (\text{A.5}) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

CMD: costos de manufactura directos, (Bs)

Para estimar el costo producido por materiales y mantenimiento se consideró el proceso como un proceso simple en el cual el material posee un porcentaje igual al 5 % así como la mano de obra. Sustituyendo los datos necesarios en la ecuación se tiene:

$$\text{CMD} = (0,05 + 0,05) \cdot 3.104.150,00\text{Bs}$$

$$\text{CMD} = 310.415,00\text{Bs}$$

➤ **Costos indirectos de manufactura:**

Los costos indirectos de manufactura están comprendidos por: supervisores de planta, gastos generales, seguro de nuevos activos, seguridad, protección, servicios médicos, mantenimiento general y gastos otros. De igual forma algunos de los gastos se encuentran cubiertos por la planta.

➤ **Seguro de nuevos activos:**

$$\text{Seg} = 1\% \cdot \text{CF} \quad (\text{A.6}) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

Seg: costo por seguros, (Bs)

Evaluando la ecuación anterior queda:

$$\text{Seg} = 0,01 \cdot 3.104.150,00\text{Bs}$$

$$\text{Seg} = 31.041,50\text{Bs}$$

➤ **Seguridad y protección, servicios médicos, mantenimiento general y gastos otros:**

Para estipular los costos generados por seguridad, protección, servicios médicos, mantenimiento general y otros gastos, se asumió en 70 % de los costos de materiales y mantenimientos, los cuales como se dijo previamente para el caso de estudio representan los costos directos de manufactura, por lo que su ecuación queda expresada como sigue:

$$\text{C}_{\text{ssm}} = (50\% \cdot 70\%) \cdot \text{CDM} \quad (\text{A.7}) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

C<sub>ssm</sub>: costo de seguridad, servicios médicos, mantenimiento y otros gastos, (Bs)

Evaluando la ecuación anterior se tiene:

$$\text{C}_{\text{ssm}} = 0,70 \cdot 310.415,00\text{Bs}$$

$$\text{C}_{\text{ssm}} = 217.290,50\text{Bs}$$

Los costos indirectos de manufactura quedan representados finalmente por la siguiente ecuación:

$$\text{CMI} = \text{Seg} + \text{Csm} \quad (\text{A.8}) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

CMI: costos indirectos de manufactura, (Bs)

Sustituyendo los datos correspondientes, queda:

$$\text{CMI} = (31.041,50 + 217.290,50)\text{Bs}$$

$$\text{CMI} = 248.332,00\text{Bs}$$

Posteriormente los costos operacionales se estiman como la suma de los costos directos e indirectos de manufactura, quedando representados por la ecuación siguiente:

$$\text{Cop} = \text{CMD} + \text{CMI} \quad (\text{A.9}) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

Cop: costos operacionales, (Bs)

Evaluando los datos correspondientes en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\text{Cop} = (310.415,00 + 248.332,00)\text{Bs}$$

$$\text{Cop} = 558.747,00\text{Bs}$$

➤ **Ahorros:**

El ahorro se va a ver reflejado en la cantidad de sulfato de aluminio líquido (SAL) que se suministra en la planta, ya que el sistema DAF, puede

proporcionar un porcentaje de 30-50 % de ahorros en coagulantes. En la actualidad, la planta Dr. Alejo Zuloaga aplica diariamente un aproximado de 1,3 cisternas de SAL, el precio actual de dicha cisterna es de 40.000,00 Bs. Para este proyecto, se espera mínimo un ahorro de 30 % en la cantidad de coagulante a utilizar. En la siguiente tabla se puede apreciar el ahorro.

**Tabla A.2. Cantidad de sustancias químicas anuales y ahorros esperados para la planta de estudio**

Cantidad de cisternas de SAL (año)	Costos anuales (Bs/año)	Ahorro del 30 % cisternas de SAL (años)	Ahorro 30 % (Bs/año)
546	21.840.000,00	164	6.560.000,00

➤ **Flujos monetarios netos:**

$$F_t = \text{Ahorros} + (-C_{op} - I) \quad (\text{A.12}) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

$F_t$ : flujo monetario neto, (Bs)

Con todos los costos y resultados obtenidos anteriormente se calcularon los flujos monetarios netos que permitieron calcular la rentabilidad del proyecto. Debido a que los gastos no son constantes a lo largo de los 5 años de vida del proyecto, los flujos monetarios son distintos para cada año, aunque su cálculo es igual, es decir la suma algebraica de cada uno de los gastos y ahorros, a continuación se presenta el flujo monetario neto para el año cero:

$$F_t = 6.560.000,00\text{Bs} + (-558.747,00 - 3.294.950,00)\text{Bs}$$

$$F_t = 2.706.303,00\text{Bs}$$

En la siguiente tabla se expresan los valores de flujos monetarios del tiempo de vida del proyecto.

**Tabla A.3. Flujos monetarios de los 5 años de vida del proyecto**

Año	Precio cisterna (Bs)	Monto anual en cisternas (Bs/año)	Ahorro del 30 % (Bs/año)	Costos operacionales (Bs)	Flujos monetarios netos (Bs)
1	46.000,00	25.116.000,00	7.544.000,00	726.371,10	6.817.628,90
2	52.900,00	28.883.400,00	8.675.600,00	944.282,43	7.731.317,57
3	60.800,00	33.196.800,00	9.971.200,00	1.227.567,16	8.743.632,84
4	70.000,00	38.220.000,00	11.480.000,00	1.595.837,31	9.884.162,69
5	80.500,00	43.953.000,00	13.202.000,00	2.074.588,50	11.127.411,50

## MODELOS DE RENTABILIDAD

### ➤ Valor actual:

En base a los valores de los flujos monetarios expresados anteriormente y con ayuda del valor de la tasa mínima de rendimiento (30 %), se calcula el valor actual por medio de la expresión:

$$VA = \sum_{t=0}^n F_t \cdot (P/S_{i,t}) \quad (A.13) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

VA: valor actual, (Bs/año)

(P/S<sub>i,t</sub>): factor de actualización de una cantidad, (adim)

i: es la tasa mínima de rendimiento, (%)

t: tiempo de vida del proyecto, (año)

$$VA = 2.706.303,00 + 6.817.628,90 \cdot 0,76923 + 7.731.317,57 \cdot 0,59172 + \dots$$

$$\dots + 8.743.632,84 \cdot 0,45517 + 9.884.162,69 \cdot 0,35013 + 11.127.411,50 \cdot 0,26933$$

$$VA = 22.962.929,89\text{Bs/año}$$

➤ **Equivalente anual:**

Es un modelo de características muy similares al valor actual. En consecuencia, el equivalente anual representa el beneficio o la pérdida equivalente en forma de una serie anual uniforme.

$$EA = VA_{(i)} \cdot (R/P_{i,n}) \quad (\text{A.14}) \quad (\text{Giugni, 2005})$$

donde:

EA: equivalente actual, (Bs/año)

(R/P<sub>i,n</sub>): factor de recuperación del capital, (adim)

Sustituyendo los valores queda:

$$EA = 22.962.929,89\text{Bs/año} \cdot 0,33438$$

$$EA = 7.678.344,50\text{Bs/año}$$

➤ **Tasa interna de retorno:**

Si un proyecto de inversión tiene asociado solamente costos o solamente ingresos, es evidente que no se puede hablar de una rentabilidad, ya que la misma representa un excedente de los ingresos sobre los costos.

Esta situación es más clara cuando se trata de la tasa interna de retorno, la cual se define como el beneficio neto anual (ingresos-costos) en relación con la inversión de capital. Por lo que, un proyecto con estas características, sólo costos o sólo ingresos, no tiene tasa interna de retorno. El cual es el caso de este proyecto donde todos los flujos monetarios netos están representados por solo ingresos (Giugni, 2005).

## APÉNDICE B

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan las tablas y figuras bibliográficas utilizadas para el desarrollo de las actividades planteadas y por ende para la obtención de los resultados de cada uno de los objetivos en la propuesta de mejora para el proceso de potabilización.

TABLA B.1

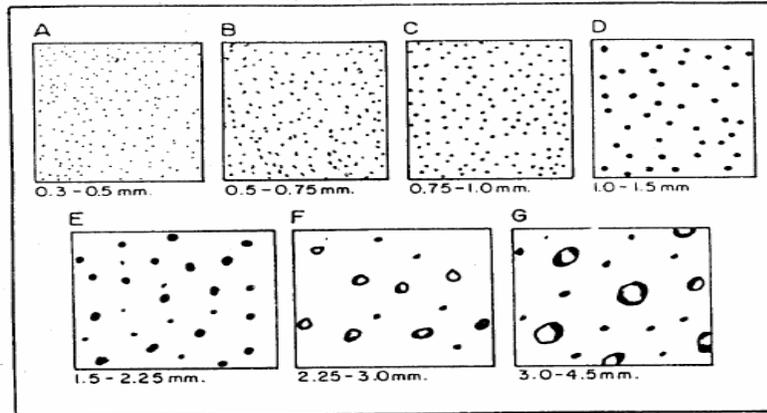
Valores límites de la OCDE para un sistema completo de clasificación trófica

Categoría trófica	P <sub>t</sub> (µg/L)	Clorf a (µg/L)		Transparencia D <sub>s</sub> (m)	
		Media	Máxima	Media	Mínimo
Ultraoligotrófico	< 4,0	< 1,0	< 2,5	6 > 12,0	> 6,0
Oligotrófico	< 10,0	< 2,5	< 8,0	> 6,0	> 3,0
Mesotrófico	10 - 35	2,5 – 8	8,0 – 25	6,0 – 3,0	3,0 – 1,5
Eutrófico	35 - 100	25 – 75	25 - 75	3,0 – 1,5	1,5 – 0,7
Hipereutrófico	> 100	> 75	> 75	< 1,5	< 0,7

Fuente: Carlson (1997)

FIGURA B.1

Comparador del tamaño del floc, según Water Research Institute de Inglaterra



Fuente: Arboleda, (2000)

TABLA B.2

Índice de floculación de Willcomb

Número del índice	Descripción
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Buena. Floc que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina

Fuente: Arboleda, (2000)

### **Artículo 3**

Las aguas se clasifican en:

Tipo 1: aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiere de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o subproducto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él.

Las aguas del tipo 1 se segregan en los siguientes subtipos:

**Tabla B.3 Clasificación de las aguas tipo 1**

Sub tipo 1A	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.
Sub tipo 1B	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamiento convencionales coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.
Sub tipo 1C	Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional.

Fuente: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos Gaceta N° 5.021(1995)

### **Artículo 4.2:**

Las aguas del subtipo 1B son aquellas cuyas características corresponden con los límites de los rangos siguientes:

**Tabla B.4 Características del agua subtipo 1 B**

<b>Parámetro</b>	<b>Límite o rango máximo</b>
Oxígeno disuelto (O. D.)	mayor de 4,0 mg/L
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5
Color real	menor de 150 UCV Pt-Co
Turbiedad	menor de 250 UNT
Fluoruros	menor de 1,7 mg/L
Organismos Coliformes totales	promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 mL

Fuente: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos Gaceta N° 5.021(1995)

**Tabla B.5 Límites recomendados para la turbiedad**

<b>Lugar</b>	<b>Límite recomendable (NTU)</b>	<b>Máximo aceptable (NTU)</b>
Antes de la filtración	5	15 – 20
Después de la filtración	1*	5

(\*): para desinfección óptima.

Fuente: CEPIS, (2004)

**Tabla B.6 Componentes relativos a la calidad organoléptica del agua potable**

<b>Componente o Característica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Deseable menor a</b>	<b>Valor máximo aceptable (a)</b>
Color	UCV (b)	5	15 (25)
Turbiedad	UNT (c)	1	5 (10)
Olor o sabor	---	Aceptable para la mayoría de los consumidores	
Sólidos disueltos totales	mg/L	600	1000
Dureza total	mg/L como CaCO <sub>3</sub>	250	500
pH	---	6,5 – 8,5	9,0
Aluminio	mg/L	0,1	0,2
Cloruro	mg/L	250	300
Cobre	mg/L	1,0	(2,0)
Hierro total	mg/L	0,1	0,3 (1,0)
Manganeso total	mg/L	0,1	0,5
Sodio	mg/L	200	200
Sulfato	mg/L	250	500
Zinc	mg/L	3,0	5,0

Fuente: Normas sanitarias de calidad del agua potable, (1998)

**Tabla B.7 Componentes inorgánicos del agua potable**

<b>Componentes</b>	<b>Valor máximo aceptable (mg/L)</b>
Arsénico	0,010
Bario	0,700
Boro	0,300
Cobre	20,000
Cadmio	0,003
Cianuro	0,070
Cromo total	0,050
Fluoruros	(c)
Mercurio total	0,001
Níquel	0,020
Nitrato (NO <sub>3</sub> )	45,000
Nitrógeno	10,000
Nitrito (NO <sub>2</sub> )	0,030
Nitrógeno	0,010
Molibdeno	0,070
Plomo	0,010
Selenio	0,010
Plata	0,050
Cloro residual	1,0 (3,0)

El valor entre paréntesis es aceptado provisionalmente en casos extremadamente excepcionales, planamente justificado ante la Autoridad Sanitaria Competente.

Fuente: Normas sanitarias de calidad del agua potable, (1998)

## **APÉNDICE C**

### **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

En ésta sección se presentan los resultados experimentales, que permitieron el desarrollo y síntesis de este trabajo de investigación.

MODELOS MATEMÁTICOS

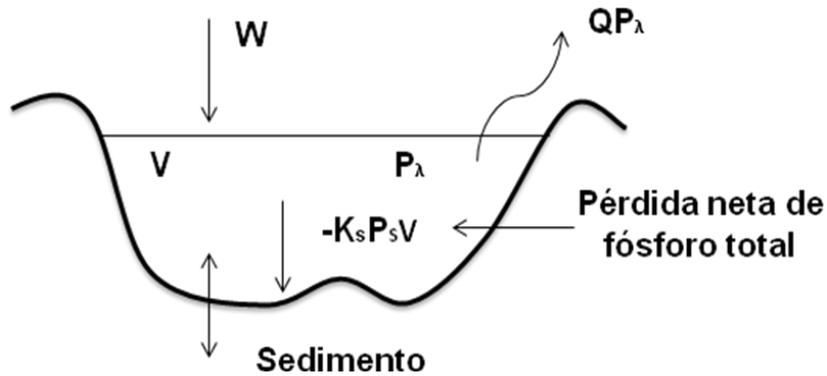


Figura C.1. Esquema del balance de masa para fósforo (lago completamente mezclado).

A.1. Modelos matemáticos para fósforo total:

A través de las siguientes ecuaciones, se desarrollara el cálculo de las concentraciones de fósforo total, presentes en el embalse Pao Cachinche.

A.1.1. Ecuación de balance de masa para fósforo total (según la figura C.1) es:

$$V \cdot \frac{dP_\lambda}{dt} = W - \vartheta_s \cdot A_s \cdot P_\lambda - Q \cdot P_\lambda \quad (C.1)$$

o,

$$V \cdot \frac{dP_\lambda}{dt} = W - K_s \cdot P_\lambda \cdot V - Q \cdot P_\lambda \quad (C.2)$$

para

$$K_s = \frac{\vartheta_s}{Z}$$

donde:

V: volumen del lago, ( $L^3$ )

$P_\lambda$ : fósforo (total) en el lago, ( $M/L^3$ )

Q: flujo de salida, ( $L^3/T$ )

$A_S$ : área superficial del lago, ( $L^2$ )

W: fuentes externas de fósforo, ( $M/T$ )

$K_S$ : tasa de pérdida global de fósforo total, ( $1/T$ )

$\bar{Z}$ : profundidad promedio del lago, ( $L$ )

En estado permanente, la ecuación C.1 se reduce a:

$$P_\lambda = \frac{W}{Q + q_S \cdot A_S} \quad (C.3)$$

o, expresarse en la siguiente ecuación, cuando se usa una tasa aérea de carga:

$$L_{(p)} = \frac{W}{A_S} \quad [M/(L^2 \cdot T)] \quad (C.4)$$

Generando la modificación de la ecuación C.3, a:

$$P_\lambda = \frac{L_{(p)}}{q + q_S} \quad (C.5)$$

donde:

q: tasa de sobreflujo hidráulico ( $Q/A_S$ ), [ $L/T$ ].

Una expresión alterna usando la ecuación C.2, puede derivarse como:

$$P_\lambda = \frac{L_{(p)}}{\bar{Z}(p + K_S)} \quad (C.6)$$

donde:

$$\rho = \frac{Q}{V} = \frac{1}{T_w} \quad (C.7)$$

$T_w$ : tiempo de retención del lago, (T)

Se debe tener en cuenta, que es difícil usar las ecuaciones C.5 y C.6 porque  $\vartheta_s$  (velocidad neta de sedimentación) o  $K_s$  (tasa neta de pérdida), no se conocen aún, ni se pueden medir en forma experimental directa.

Para los modelos de fósforo total: se basaron en dos relaciones:

1. Ecuación de balance de masa con la anterior.

$$P_\lambda = \frac{L_{(p)}}{\bar{Z} \left( \frac{1}{T_w} + K_s \right)} \quad (C.8)$$

Con una relación empírica para  $K_s$ .

2. Ecuaciones totalmente empíricas aplicando los análisis de regresión lineal múltiple.

$$P_\lambda = f[L_{(p)}, T_w, \bar{Z}] \quad (C.9)$$

$$P_\lambda = \text{CONS} \cdot L_{(p)}^A \cdot T_w^B \cdot \bar{Z}^C \quad (C.10)$$

donde:

CONS, A, B, C: son constantes.

Otra forma de expresar la ecuación C.8, del balance de masa es:

$$P_\lambda = \frac{P_{\lambda in}}{T_w \left( \frac{1}{T_w} + K_s \right)} \quad (C.11)$$

donde:

$P_{\lambda in}$ : concentración promedio afluente de fósforo total, (mg/L).

Por lo que  $K_S$  resultará:

$$K_S = \frac{1}{T_w} \left[ \frac{P_{\lambda in}}{P_\lambda} - 1 \right] \quad (C.12)$$

Aplicando un análisis de correlación, se tiene:

$$K_S = f(\text{TEMP}) \quad (C.13)$$

donde:

$$\text{TEMP} = \frac{P_{\lambda in}}{P_\lambda} - 1$$

La siguiente relación se obtuvo:

$$\text{TEMP} = 1,85 \cdot T_w^{0,420} \quad (C.14)$$

donde:

$r^2$  = coeficiente de determinación = 0,58

SE = error estándar del estimado = 1,34

N = número de datos = 39 (27 cuerpos de agua)

Por lo tanto:

$$K_S = \frac{1}{T_w} \cdot (\text{TEMP}) = 1,85/T_w^{0,580} \quad (C.15)$$

Lo cual puede ser sustituido ( $P < 0,05$ ) por:

$$K_S = 2 \cdot \sqrt{T_w} \quad (C.16)$$

Esta relación es doble en magnitud que la desarrollada para los lagos templados de OECD,  $K_s = 1/\sqrt{T_w}$  (Vollenweider, 1976) de forma que el  $K_s$  calculado para un lago tropical sería esencialmente el doble del de un lago templado con un tiempo de retención idéntico. Este resultado se aproxima al calculado por Castagnino (1982) en función de mayor temperatura y tasa de crecimiento fitoplanctónico en lagos cálidos tropicales.

La sustitución de la ecuación C.16 dentro del modelo del balance de masa  $P_\lambda$  resulta en:

$$P_\lambda = \frac{L_{(p)}}{\bar{Z}/T_w \cdot (1 + 2 \cdot \sqrt{T_w})} \quad (C.17)$$

La ecuación de regresión múltiple para fósforo total (aproximación totalmente empírica) producto de una regresión "Stepwise" con todas las variables independientes disponibles es:

$$P_\lambda = 0,290 \cdot L_{(p)}^{0,891} \cdot T_w^{0,676} / \bar{Z}^{0,934} \quad (C.18)$$
$$r^2 = 0,902 \quad ; \quad SE = 0,044 \quad ; \quad N = 39.$$

La ecuación C.18 se simplificó y se reorganizó, quedando:

$$P_\lambda = \frac{L_{(p)}}{\bar{Z}} \cdot \frac{T_w^{3/4}}{3} \quad (C.19)$$

## A.2. Modelos matemáticos para clorofila "a":

Es un estimador útil y simple de la densidad del fitoplancton y ha sido ampliamente utilizado en los modelos como el parámetro más pertinente para predecir la densidad de algas en algas.

No aplica para:

- Lagos con  $T_w$  excesivamente cortos.
- Lagos muy eutróficos limitado por nitrógeno con  $N_\lambda/P_\lambda < 10$ .

La ecuación de regresión del modelo estadísticamente significativo con fósforo es:

$$Cl_a = 332 \cdot P_\lambda^{1,21} \quad (C.20)$$

La ecuación de clorofila “a” con nitrógeno es:

$$Cl_a = 8,60 \cdot N_\lambda^{1,47} \quad (C.21)$$

Con un número mínimo de datos de 30.

### **A.3. Modelos matemáticos para nitrógeno total:**

El nitrógeno tiene un papel de nutriente limitante para cuencas dominadas por fuentes puntuales.

La ecuación con análisis de regresión lineal múltiple (“Stepwise”), es:

$$N_\lambda = 0,724 \cdot L_{(n)}^{0,440} \cdot T_w^{0,272} / \bar{Z}^{0,522} \quad (C.22)$$

Tabla D.1

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL</b> <b>CENTRO</b>			Fecha: 10-12-2010 Hora: 10:30 am					
Ensayo N° : 1 Ensayo de Muestra de Agua / Planta: Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga			Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a XX rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L					
Orden de Adición	<b>N° Beaker</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	Orden	Sustancia	Ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
		Carbón Activado	-	-	-	-	-	-
		Sulfato Líquido	-	-	-	-	-	-
	1	PAC	25	30	35	25	30	35
2	Cloro	10	10	10	10	10	10	
Análisis físico-químicos	<b>Parámetros</b>	<b>Cruda</b>	<b>T = 5 min</b>		<b>Resultados</b>		<b>T = 30 min</b>	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	2	2	2	2	2	2
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	D	D	D	D	D	D
	Turbiedad (NTU)	2,16	5,22	4,87	4,84	5,37	5,11	5,17
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40	30	30	30	25	25	25
	pH	7,17	6,74	6,80	6,83	6,83	6,79	6,86
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	113,390	101,260	101,260	101,260	103,285	109,361	103,285
	Aluminio (mg/L)	-	0,222	0,218	0,218	0,440	0,239	0,267
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	6,0	5,0	4,5	4,0	-	-	-	
<b>Dosis de planta:</b>	<b>Observaciones:</b>			<b>Breve descripción:</b>				
Sulfato Líquido: 50,9 Sulfato Sólido: Carbón: 1,5 Cloro: 19,5 Polímero: 0,02 Cal: PAC: Caudal: 3224 (L/s)				<b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 30 <b>Turbiedad:</b> 4,17 <b>pH:</b> 6,60 <b>Cloro:</b> 0 – 5,1 <b>Olor:</b>		<b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> <b>Olor:</b>		

**Tabla D.2**  
**Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF**

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b>		Fecha: 14-12-2010 Hora: 10:30 am						
Ensayo N°: 2 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga		Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L						
Orden de Adición	N° Beaker	1	2	3	4	5	6	
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	Ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	50	60	70	50	60	70
3	Cloro	27	27	27	27	27	27	
Análisis físico-químicos	Parámetros	Cruda	T = 5 min			Resultados		T = 30 min
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	1	1	1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	C	D	E	C	D	E
	Turbiedad (NTU)	4,46	6,31	5,85	5,78	6,24	5,82	5,54
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40	30	30	30	30	30	25
	pH	7,19	6,86	6,88	6,88	6,84	6,78	6,74
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	96,48	84,42	84,42	84,42	76,38	72,36	76,38
	Aluminio (mg/L)	-	1,049	0,967	0,782	0,933	0,773	0,798
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,8	5,1	4,9	4,4	5,1	4,9	4,4	
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	0,237	-	-	-	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	1,112	-	-	-	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	1,349	-	-	-	-
	Fósforo (mg/L)	-	-	0,195	-	-	-	-
Plancton (USA)	-	-	672	-	-	-	-	
<b>Dosis de planta:</b> Sulfato Líquido: 298 Sulfato Sólido: Carbón: 1,5 Cloro: 29,2 Polímero: 0,02 PAC: 13,4 Caudal: 3268 (L/s)	Observaciones:			Breve descripción:				
	La muestra del jarro 2 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.	Proceso: Sedimentada Color: 50 Turbiedad: 3,72 pH: 6,53 Cloro: 4,2 – 5,1 Olor:			Características Organolépticas del Agua Cruda: Color: Verdoso Olor: Desagradable			

Tabla D.3

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b>			Fecha: 14-12-2010 Hora: 2:30 pm					
Ensayo N°: 3 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga			Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L					
Orden de Adición	N° Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	50	60	70	50	60	70
	3	PAC	5	5	5	5	5	5
4	Cloro	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	T = 5 min		Resultados		T = 30 min	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	2	2	2	2	2	2
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	D	E	F	D	E	F
	Turbiedad (NTU)	3,22	5,70	5,82	5,15	5,35	5,72	4,97
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40	25	25	25	30	30	30
	pH	7,04	6,37	6,38	6,38	6,46	6,42	6,40
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	108,54	60,30	52,26	56,28	64,32	56,28	56,28
	Aluminio (mg/L)	-	0,508	0,604	0,497	0,498	0,568	0,437
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,1	4,8	4,4	5,1	4,8	4,4	
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	0,015	-	-	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	0,815	-	-	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	0,830	-	-	-
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	0,122	-	-	-
	Plancton (USA)	-	-	-	40	-	-	-
Dosis de planta:		Observaciones:			Breve descripción:			
Sulfato Líquido: 29,8 Sulfato Sólido: Carbón: 1,5 Cloro: 29,2 Polímero: 0,02 PAC: 13,4 Caudal: 3268 (L/s)		La muestra del jarro 3 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.			Proceso: Sedimentada Color: 30 Turbiedad: 4,31 pH: 6,60 Cloro: 0 - 3		Características Organolépticas del Agua Cruda: Color: Verdoso Olor: Desagradable	

**Tabla D.4**  
**Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF**

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b>			Fecha: 15-12-2010 Hora: 10:30 am					
Ensayo N°: 4 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga			Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L					
Orden de Adición	N° Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	50	60	70	50	60	70
	3	PAC	15	15	15	15	15	15
4	Cloro	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	T = 2 min		Resultados		T= 30 min	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	1	1	1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	E	E	E	E	E	E
	Turbiedad (NTU)	2,79	2,72	2,02	2,00	3,10	1,94	2,05
	Color aparente (UCV Pt-Co)	30,0	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
	pH	7,08	6,39	6,37	6,37	6,60	6,51	6,47
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	92,46	60,30	52,26	52,26	88,44	64,32	64,32
	Aluminio (mg/L)	-	0,728	0,819	0,781	0,777	0,637	0,617
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,8	4,0	3,0	2,4	4,0	3,0	2,4	
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	-	-	-	0,018
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	-	0,527
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	-	0,545
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	-	-	-	0,094
	Plancton (USA)	-	-	-	-	-	-	158
<b>Dosis de planta:</b> Sulfato Líquido: 30 Sulfato Sólido: Carbón: 1,5 Cloro: 26,7 Polímero: PAC: 13,5 Caudal: 3254 (L/s)		<b>Observaciones:</b> La muestra del jarro 6 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.			<b>Breve descripción:</b> Proceso: Sedimentada Color: 30 Turbiedad: 4,79 pH: 6,53 Cloro: 2,9 – 3,5 Características Organolépticas del Agua Cruda: Color: verdoso Olor: Desagradable			

Tabla D.5

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <p><b>HIDROCENTRO</b> C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</p>			<p>Fecha: 15-12-2010 Hora: 12:30 pm</p>						
<p>Ensayo N°: 5 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga</p>			<p>Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L</p>						
Orden de Adición	N° Beaker		1	2	3	4	5	6	
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	
	1	Sulfato Líquido	40	50	60	40	50	60	
	2	PAC	10	10	10	10	10	10	
	3	Cloro	23	23	23	23	23	23	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	T = 5 min			Resultados		T= 30 min	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	1	1	1	
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	E	E	E	E	E	E	
	Turbiedad (NTU)	2,12	2,38	1,74	1,88	2,29	2,25	2,35	
	Color aparente (UCV Pt-Co)	30,0	12,5	10,0	10,0	12,5	12,5	12,5	
	pH	7,16	6,77	6,63	6,56	6,65	6,75	6,84	
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	100,50	64,32	64,32	64,32	64,32	64,32	60,30	
	Aluminio (mg/L)	-	0,555	0,494	0,477	0,473	0,420	0,432	
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	6,0	4,2	3,4	2,9	4,2	3,4	2,9		
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	-	-	0,017	-	
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,695	-	
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,712	-	
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	-	-	0,133	-	
	Plancton (USA)	-	-	-	-	-	188	-	
<p><b>Dosis de planta:</b> Sulfato Líquido: 30,3 Sulfato Sólido: Carbón: 1,5 Cloro: 26 Polímero: PAC: 14,6 Caudal: 3224 (L/s)</p>		<p><b>Observaciones:</b> La muestra del jarro 5 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.</p>			<p><b>Breve descripción:</b> <b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 25 <b>Turbiedad:</b> 4,16 <b>pH:</b> 6,65 <b>Cloro:</b> 0,8 – 1,4</p>				
					<p><b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Verdoso <b>Olor:</b> Desagradable</p>				

**Tabla D.6**  
**Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF**

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b>		Fecha: 15-12-2010 Hora: 3:30 pm						
		Ensayo N°:6 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga		Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L				
<b>Orden de Adición</b>	<b>N° Beaker</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	40	40	40	40	40	40
	3	PAC	8	9	10	8	9	10
4	Cloro	23	23	23	23	23	23	
<b>Análisis físico-químico</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Cruda</b>	<b>T = 5 min</b>		<b>Resultados</b>		<b>T = 30 min</b>	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	1	1	1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	D	D	D	D	D	D
	Turbiedad (NTU)	2,71	3,19	2,43	2,27	2,54	2,18	2,16
	Color aparente (UCV Pt-Co)	30,0	15,0	12,5	10,0	15,0	10,0	12,5
	pH	6,64	6,29	6,41	6,40	6,82	6,80	6,77
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	96,48	72,36	72,36	64,32	64,32	64,32	72,36
	Aluminio (mg/L)	-	0,839	0,777	0,723	0,588	0,489	0,600
	Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,9	4,6	3,6	3,0	4,6	3,6	3,0
<b>Análisis bacteriológico</b>	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	-	-	0,018	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,160	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,178	-
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	-	-	0,105	-
	Plancton (USA)	-	-	-	-	-	240	-
<b>Dosis de planta:</b>		<b>Observaciones:</b>			<b>Breve descripción:</b>			
Sulfato Líquido: 30,3 Sulfato Sólido: Carbón: 1,5 Cloro: 26 PAC: 14,6 Caudal: 3224 (L/s)		La muestra del jarro 5 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.			<b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 40 <b>Turbiedad:</b> 3,10 <b>pH:</b> 6,70 <b>Cloro:</b> 0 – 0,6		<b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Verdoso <b>Olor:</b> Desagradable	

Tabla D.7

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <p><b>HIDROCENTRO</b> C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</p>			<p>Fecha: 16 – 12 - 2010 Hora: 08:30 am</p>					
<p>Ensayo Nº: 1 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga</p>			<p>Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 5 y 30 min. Volumen de la muestra: 2 L</p>					
Orden de Adición	Nº Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	20	30	40	20	30	40
	3	PAC	20	20	20	20	20	20
4	Cloro	17	17	17	17	17	17	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	T = 5 min		Resultado		T = 30 min	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	2	1	1	2	1	1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	D	D	E	D	D	E
	Turbiedad (NTU)	3,37	2,20	1,83	2,72	1,80	1,91	2,17
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40,0	12,5	12,5	12,5	12,5	10,0	12,5
	pH	7,26	6,71	6,67	6,69	6,75	6,69	6,66
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	96,48	60,30	60,30	60,30	64,32	72,36	72,36
	Aluminio (mg/L)	-	0,371	0,285	0,490	0,480	0,285	0,330
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,7	3,9	3,1	2,5	3,9	3,1	2,5	
<b>Dosis de planta:</b>		<b>Observaciones:</b>			<b>Breve descripción:</b>			
<p>Sulfato Líquido: 30,3 Sulfato Sólido: - Carbón: 1,5 Cloro: 22,1 Polímero: - Cal: - PAC: 11,1 Caudal: 3218 (L/s)</p>		<p>La muestra del jarro 5 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.</p>			<p><b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 30 <b>Turbiedad:</b> 3,76 <b>pH:</b> 6,91 <b>Cloro:</b> 0,5 – 1,0 <b>Olor:</b></p>		<p><b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Verdoso <b>Olor:</b> Desagradable</p>	

**Tabla D.8**  
**Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF**

 <p><b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL</b> <b>CENTRO</b></p>		Fecha: 16 – 12 - 2010 Hora: 11:00 am						
		Ensayo N°: 2 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga		Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 5 y 30 min. Volumen de la muestra: 2 L				
Orden de Adición	<b>N° Beaker</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	30	30	30	30	30	30
	3	PAC	20	25	30	20	25	30
4	Cloro	19	19	19	19	19	19	
Análisis físico-químico	<b>Parámetros</b>	<b>Cruda</b>	<b>T = 5 min</b>		<b>Resultado</b>		<b>T = 30 min</b>	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	1	1	1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	D	D	E	D	D	E
	Turbiedad (NTU)	4,95	2,29	1,95	2,69	2,45	1,85	2,05
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40,0	17,5	15,0	17,5	17,5	12,5	17,5
	pH	7,03	6,60	6,63	6,64	6,52	6,59	6,61
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	100,50	64,32	64,32	62,31	72,36	72,36	72,36
	Aluminio (mg/L)	-	0,374	0,337	0,378	0,378	0,357	0,384
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,8	4,4	3,5	3,0	4,4	3,5	3,0	
<b>Dosis de planta:</b>		<b>Observaciones:</b>			<b>Breve descripción:</b>			
Sulfato Líquido: 30,3 Sulfato Sólido: - Carbón: 1,5 Cloro: 24,3 Polímero: - Cal: - PAC: 11,1 Caudal: 3216 (L/s)					<b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 30 <b>Turbiedad:</b> 3,77 <b>pH:</b> 6,20 <b>Cloro:</b> 1,5 – 2,5 <b>Olor:</b>		<b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Verdoso <b>Olor:</b> Desagradable	

Tabla D.9

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <p><b>HIDROCENTRO</b> C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</p>		<p>Fecha: 16 – 12 - 2010 Hora: 03:00 pm</p>						
<p>Ensayo N°: 2 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga</p>		<p>Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 5 y 30 min. Volumen de la muestra: 2 L</p>						
Orden de Adición	<b>N° Beaker</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	40	40	40	40	40	40
	3	PAC	10	12	14	10	12	14
4	Cloro	19	19	19	19	19	19	
Análisis físico-químico	<b>Parámetros</b>	<b>Cruda</b>	<b>T = 5 min</b>		<b>Resultado</b>		<b>T = 30 min</b>	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	1	1	1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	D	D	D	D	D	D
	Turbiedad (NTU)	2,78	2,65	1,66	2,09	2,12	1,71	1,41
	Color aparente (UCV Pt-Co)	30,0	12,5	10,0	10,0	12,5	10,0	12,5
	pH	7,14	6,70	6,67	6,65	6,59	6,63	6,65
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	96,48	60,30	60,30	60,30	64,32	64,32	64,32
	Aluminio (mg/L)	-	0,609	0,378	0,440	0,551	0,489	0,424
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,7	4,9	4,1	3,6	4,9	4,1	3,6	
<b>Dosis de planta:</b>	<b>Observaciones:</b>			<b>Breve descripción:</b>				
Sulfato Líquido: 30,3 Sulfato Sólido: - Carbón: 1,5 Cloro: 24,3 Polímero: - Cal: - PAC: 11,1 Caudal: 3210 (L/s)				<p><b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 30 <b>Turbiedad:</b> 4,46 <b>pH:</b> 6,75 <b>Cloro:</b> 0,8 – 1,2 <b>Olor:</b></p>		<p><b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Verdoso <b>Olor:</b> Desagradable</p>		

**Tabla D.10**  
**Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF**

 <p><b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL</b> <b>CENTRO</b></p>		Fecha: 17 – 12 - 2010 Hora: 11:00 am						
		Ensayo N°: 1 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga		Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 15 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 5 y 30 min. Volumen de la muestra: 2 L				
Orden de Adición	<b>N° Beaker</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	Carbón Activado	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	2	Sulfato Líquido	20	20	20	20	20	20
	3	PAC	20,0	22,5	25,0	20,0	22,5	25,0
4	Cloro	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	
Análisis físico-químico	<b>Parámetros</b>	<b>Cruda</b>	<b>T = 5 min</b>		<b>Resultado</b>		<b>T = 30 min</b>	
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	D	D	D	D	D	D
	Turbiedad (NTU)	2,37	1,72	1,53	1,91	1,60	1,29	1,35
	Color aparente (UCV Pt-Co)	30,0	12,5	15,0	15,0	12,5	15,0	15,0
	pH	7,08	6,76	6,80	6,85	6,91	6,93	6,92
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	104,52	88,44	88,44	88,44	96,48	92,46	92,46
	Aluminio (mg/L)	-	0,333	0,300	0,374	0,333	0,304	0,465
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,9	4,1	3,3	2,6	4,1	3,3	2,6	
<b>Dosis de planta:</b>	<b>Observaciones:</b>			<b>Breve descripción:</b>				
Sulfato Líquido: 40,5 Sulfato Sólido: - Carbón: 1,5 Cloro: 27,4 Polímero: - Cal: 5,0 PAC: 12,0 Caudal: 3228 (L/s)	Se utilizó cloro para 1 L, porque los mL de cloro eran muy altos.			<b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 25 <b>Turbiedad:</b> 2,71 <b>pH:</b> 6,70 <b>Cloro:</b> 0,0 – 4,7 <b>Olor:</b>		<b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Verdoso <b>Olor:</b> Desagradable		

Tabla D.11

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <p><b>HIDROCENTRO</b> C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</p>			<p>Fecha: 10 – 02 - 2011 Hora: 08:30 am</p>					
<p>Ensayo N°: 1 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga</p>			<p>Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 25 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L</p>					
Orden de Adición	N° Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	Sulfato Líquido	70	80	90	100	110	120
	2	Cloro	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	Resultado					
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	C	C	C	C	D	D
	Turbiedad (NTU)	3,45	1,96	1,52	1,61	1,35	1,80	2,24
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40,0	15,0	12,5	12,5	10,0	10,0	12,5
	pH	-	-	-	-	-	-	-
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	136,8	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4
	Aluminio (mg/L)	-	0,818	0,781	0,691	0,773	0,958	1,114
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,2	4,0	3,0	4,2	3,5	4,3	3,8	
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	-	-	0,023	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,780	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,803	-
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	-	-	0,038	-
	Plancton (USA)	-	-	-	-	-	308	-
Dosis de planta:	Observaciones:			Breve descripción:				
Sulfato Líquido: 68,1 Sulfato Sólido: - Carbón: - Cloro: 20,3 Polímero: - Cal: 4,5 PAC: - Caudal: 3283 (L/s)	La muestra del jarro 5 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.  Se inyectó agua saturada, cada dos jarros, o sea el saturador se cargó de agua y aire cada dos jarros, para evitar el cambio brusco en la presión.			Proceso: Sedimentada Color: 15 Turbiedad: 1,67 pH: 6,55 Cloro: 0,5 – 1,2 Olor:			Características Organolépticas del Agua Cruda: Color: Verdoso Olor: Desagradable	

**Tabla D.12**  
**Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF**

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b>			Fecha: 10 – 02 – 2011 Hora: 02:30 pm					
Ensayo N°: 2 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga			Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 30 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L					
Orden de Adición	N° Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	Ppm
	1	Sulfato Líquido	70	80	90	100	110	120
2	Cloro	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	Resultado					
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	C	C	C	C	D	D
	Turbiedad (NTU)	3,66	1,75	1,82	1,60	1,54	2,31	2,20
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40,0	12,5	12,5	10,0	7,5	5,0	7,5
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	-	57,6	57,6	57,6	57,6	57,6	57,6
	Aluminio (mg/L)	-	0,852	0,929	0,806	1,033	1,152	1,098
	Color verdadero (UCV Pt-Co)	-	10,0	7,5	7,5	5,0	5,0	5,0
	Aluminio filtrada (mg/L)	-	0,510	0,765	0,353	0,510	0,645	0,432
	Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,1	4,2	3,6	4,5	3,9	4,4	3,8
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	-	0,057	-	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	0,791	-	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	0,848	-	-
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	-	0,038	-	-
	Plancton (USA)	-	-	-	-	368	-	-
Dosis de planta:	Sulfato Líquido: 68,1 Sulfato Sólido: - Cloro: 20,3 Polímero: - Cal: 4,5 Caudal: 3283 (L/s)		Observaciones:	La muestra del jarro 4 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.  Se inyectó agua saturada, cada tres jarros, o sea el saturador se cargó de agua y aire cada tres jarros, para evitar el cambio brusco en la presión.		Breve descripción:	<b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 15 <b>Turbiedad:</b> 1,70 <b>pH:</b> 6,62 <b>Cloro:</b> 0,2 – 1,0  <b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Verdoso <b>Olor:</b> Desagradable	

Tabla D.13

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL CENTRO</b>		Fecha: 11 – 02 - 2011 Hora: 11:00 am						
Ensayo Nº: 1 Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga		Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a 25 y 30 rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L						
Orden de Adición	Nº Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm
	1	Sulfato Líquido	80	90	100	80	90	100
2	Cloro	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	Resultado					
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	1	1	1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	C	C	C	C	D	D
	Turbiedad (NTU)	8,28	1,96	1,52	1,61	1,35	1,80	2,24
	Color aparente (UCV Pt-Co)	50,0	15,0	12,5	12,5	10,0	10,0	12,5
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	122,75	87,68	87,67	96,45	87,68	87,68	96,45
	Aluminio (mg/L)	-	0,954	1,007	0,987	1,140	1,217	1,050
	Color verdadero (UCV Pt-Co)	-	5,0	7,5	5,0	7,5	7,5	5,0
	Aluminio filtrada (mg/L)	-	0,538	0,366	0,551	0,424	0,510	0,675
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,1	4,3	3,4	3,0	4,2	3,5	3,0	
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	-	-	0,423	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,568	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	-	0,991	-
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	-	-	0,058	-
	Plancton (USA)	-	-	-	-	-	258	-
Dosis de planta:	Observaciones:			Breve descripción:				
Sulfato Líquido: 68,1 Sulfato Sólido: - Cloro: 20,6 Polímero: - Cal: 4,5 Caudal: 3252 (L/s)	La muestra del jarro 5 se seleccionó para realizarse el análisis bacteriológico.  Mezcla lenta: 25 rpm (jarros 1, 2 y 3) y 30 rpm (jarros 4, 5 y 6).  Se inyectó agua saturada, cada tres jarros, o sea el saturador se cargó de agua y aire cada tres jarros.			Proceso: Sedimentada Color: 15 Turbiedad: 1,59 pH: 6,48 Cloro: 0,5 – 1,0 Olor:		Características Organolépticas del Agua Cruda: Color: Verdoso Olor: Desagradable		

**Tabla D.14**  
**Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF**

 <p><b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL</b> <b>CENTRO</b></p>			Fecha: 12-02-2011 Hora: 08:30 am					
Ensayo N°: XX Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga			Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a XX rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L					
Orden de Adición	N° Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	1	Sulfato Líquido	80	85	90	80	85	90
2	Cloro	15	15	15	15	15	15	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	Resultado					
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	<1	<1	<1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	C	C	C	C	C-D	C-D
	Turbiedad (NTU)	5,48	2,31	1,86	1,62	1,98	2,09	1,88
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40,0	15,0	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
	pH	6,90	5,94	5,93	5,96	6,46	6,45	6,28
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	111,50	89,20	89,20	89,20	80,28	80,28	80,28
	Aluminio (mg/L)	-	0,43	0,31	0,13	0,32	0,38	0,39
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,0	4,8	4,5	4,4	4,5	3,9	3,2	
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	-	-	0,592	0,684	-	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	0,706	0,952	-	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	-	-	1,591	1,636	-	-
	Fósforo (mg/L)	-	-	-	0,049	0,038	-	-
	Plancton (USA)	-	-	-	395	650	-	-
<b>Dosis de planta:</b>		<b>Observaciones:</b>			<b>Breve descripción:</b>			
Sulfato Líquido: 67,8 Sulfato Sólido: Carbón: Cloro: 21,5 Polímero: Cal: PAC: Caudal: 3268 (L/s)		Las muestras de los jarros 3 y 4 se seleccionaron para realizarse el análisis bacteriológico. La mezcla lenta se realizó a 30 rpm.			Proceso: Sedimentada Color: 17,5 Turbiedad: 1,91 pH: 5,89 Cloro: Olor:		Características Organolépticas del Agua Cruda: Color: Verdoso Olor: Desagradable	

Tabla D.15

Parámetros de ensayo de jarros implementando un sistema DAF

 <b>HIDROCENTRO</b> <b>C. A. HIDROLÓGICA DEL</b> <b>CENTRO</b>			Fecha: 12 – 02- 2010 Hora: 12:00 m					
Ensayo N°:XX Ensayo de Flotación Muestra de Agua / Planta: Convencional Planta de Tratamiento: Dr. Alejo Zuloaga			Mezcla rápida 80 rpm. Min: 1 Mezcla lenta a XX rpm. Min: 15 Tiempo de flotación: 30 min. Volumen de la muestra: 2 L					
Orden de Adición	N° Beaker		1	2	3	4	5	6
	Orden	Sustancia	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm
	1	Sulfato Líquido	80	85	90	80	85	90
2	Cloro	15	15	15	15	15	15	
Análisis físico-químico	Parámetros	Cruda	Resultados					
	Tiempo aparic. Floc (min)	-	1	1	1	<1	<1	<1
	Tamaño floc / WRA (mm)	-	C	C	C	C	C-D	C-D
	Turbiedad (NTU)	4,69	1,91	2,10	2,07	2,23	2,40	1,92
	Color aparente (UCV Pt-Co)	40,0	12,5	15,0	15,0	12,5	15,0	15,0
	pH	7,11	6,56	6,58	6,55	6,38	6,48	6,48
	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	107,04	89,20	89,20	89,20	80,28	80,28	80,28
	Aluminio (mg/L)	-	0,20	0,36	0,43	0,21	0,44	0,45
Presión (kgf/cm <sup>2</sup> )	5,5	4,5	4,0	3,5	4,0	3,5	2,8	
Análisis bacteriológico	Nitrógeno amoniacal	-	0,532	-	-	0,550	-	-
	Nitrógeno orgánico (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	1,088	-	-	1,161	-	-
	Nitrógeno total Kjeldahl (mg NH <sub>3</sub> /L)	-	1,638	-	-	1,711	-	-
	Fósforo (mg/L)	-	0,052	-	-	0,051	-	-
	Plancton (USA)	-	420	-	-	337	-	-
Dosis de planta:		Observaciones:			Breve descripción:			
Sulfato Líquido: 67,8 Sulfato Sólido: Carbón: Cloro: 21,5 Polímero: Factor-Agua Clorada: Caudal: 3268 (L/s)		Las muestras de los jarros 1 y 4 se seleccionaron para realizarse el análisis bacteriológico. La mezcla lenta se realizó a 25 rpm.			<b>Proceso:</b> Sedimentada <b>Color:</b> 17,5 <b>Turbiedad:</b> 1,91 <b>pH:</b> 5,89 <b>Cloro:</b> <b>Olor:</b>		<b>Características Organolépticas del Agua Cruda:</b> <b>Color:</b> Amarillento <b>Olor:</b> Desagradable	



## **ANEXOS**

En esta sección se presentan las figuras que permitieron la validación de este trabajo de investigación.

## SATURADOR



**MUESTRAS DE FLOC**



**MUESTRAS SATURADAS**



**MUESTRA N° 1 SATURADA**



**MUESTRA N° 2 SATURADA**



**MUESTRA N° 3 SATURADA**



**SOBRENADANTE**



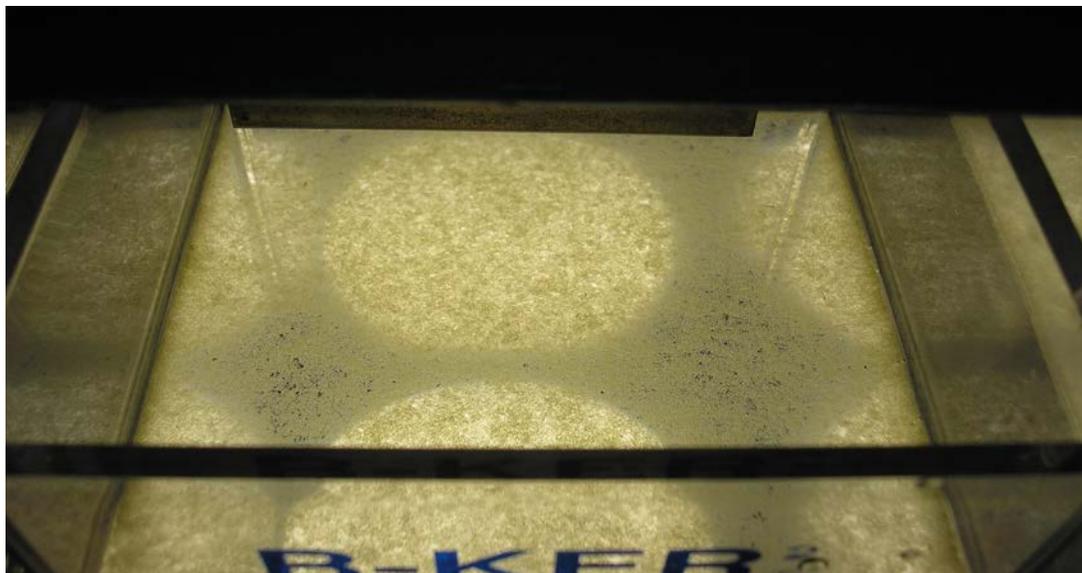
**SOBRENADANTE DESDE OTRO ÁNGULO**



**MUESTRA N° 1, SOBRENADANTE**



**MUESTRA N° 2, SOBRENADANTE**



**MUESTRA N° 3, SOBRENADANTE**

