

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (F.A.D) PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EL ORDEÑO Y LA CORPABE

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA

DIANA ELIZABETH AGUILAR ARIAS
danie_87@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ÀNGEL VINICIO PASACA ROJAS
viniopasaca@andinanet.net

CO-DIRECTOR: ING. SEBASTIÁN ANÍBAL TACO VASQUEZ
sebrisco@hotmail.com

Quito, Octubre 2014

© Escuela Politécnica Nacional 2014
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Diana Elizabeth Aguilar Arias, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Diana Elizabeth Aguilar Arias

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Diana Elizabeth Aguilar Arias, bajo nuestra supervisión.

Ing. Vinicio Pasaca Rojas
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Sebastián Taco
CODIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto “Tratamiento de efluentes líquidos mediante flotación por aire disuelto, para mejorar la calidad del agua”, que se ejecuta en la empresa WASCORP S.A.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar otra etapa de mi vida y seguir adelante con mis sueños.

A mi madrecita que desde el cielo siempre ha iluminado mi camino, a mi padre y hermanas por siempre permanecer a mi lado apoyándome.

A toda mi familia, abuelita, tíos, primos, quienes siempre confiaron en mí, gracias por su apoyo incondicional.

A los Ing. Vinicio Pasaca y Marcelo Albuja por la paciencia y enseñanzas durante este largo camino para la realización de este proyecto.

A la empresa WASCORP S.A por abrirme sus puertas y poder iniciar mi carrera profesional.

A mis amigos, por ser parte esencial de mi vida estudiantil, sus consejos y risas brindadas mi vida estudiantil.

A mi compañerito de vida, Alexis, por la enorme paciencia y amor de cada día.

DEDICATORIA

A ti madrecita y hermanita, mis ángeles, que siempre me acompañan cada día de mi vida, a mi padre y hermanas, Guido, Mónica y Karina Aguilar, por siempre brindarme su apoyo incondicional y permanecer conmigo en los buenos y malos momentos y a mi sobrinito, Emilio, por ser una parte esencial de mi vida.

A mi abuelita, Rosario, por ser mi madre y darme su infinito amor para seguir adelante y apoyarme en mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Generación de efluentes líquidos de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe	1
1.1.1. El Ordeño	1
1.1.1.1. Procesos de producción	1
1.1.2. La Corpabe	4
1.1.2.1. Procesos de producción	4
1.1.3. Operaciones auxiliares de la industria láctea	6
1.1.3.1. Operaciones de limpieza y desinfección	6
1.1.3.2. Generación de vapor	7
1.1.3.3. Generación de frío	7
1.1.4. Consumo de agua	8
1.1.5. Efluentes líquidos	8
1.1.5.1. Composición de los efluentes	10
1.1.5.2. Contaminantes de los efluentes	11
1.2. Flotación por aire disuelto para el tratamiento de efluentes líquidos	15
1.2.1. Flotación	15
1.1.2.1. Clases de sistemas de flotación	15
1.2.2. Flotación por aire disuelto	16
1.2.2.1. Descripción de los elementos del sistema	19
1.2.2.2. Tipos de sistemas de presurización	21
1.2.2.3. Fundamentos teóricos	24
1.2.2.4. Mecanismos de contacto	28
1.2.2.5. Parámetros de diseño	30
2. PARTE EXPERIMENTAL	33
2.1. Muestreo y caracterización de la mezcla del efluente proveniente de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe	33
2.1.1. Muestreo compuesto	33
2.1.2. Medición de parámetros en situ	34
2.1.3. Medición de parámetros en laboratorio	35
2.1.3.1. Determinación de Aceites y Grasas	35
2.1.3.2. Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno	36
2.1.3.3. Determinación de Demanda Química de Oxígeno	36
2.1.3.4. Determinación de Sólidos Totales (ST)	37
2.1.3.5. Determinación de Sólidos Sedimentables (SS)	37
2.1.3.6. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	38

2.2. Evaluación de un sistema de flotación por aire disuelto (FAD) construido a nivel laboratorio	38
2.2.1. Construcción del sistema	38
2.2.1.2. Cámara de saturación	39
2.2.1.3. Tanque de flotación	40
2.2.2. Funcionamiento del sistema	40
2.3. Determinación de las mejores condiciones de presión de saturación, porcentaje de recirculación y dosis de coagulante del sistema de flotación por aire disuelto (F.A.D) para disminuir la carga contaminante de aceites y grasas, DQO, DBO ₅ , sólidos totales (ST), sólidos sedimentables (SS) y sólidos suspendidos totales (SST)	41
2.3.1. Primera etapa	41
2.3.2. Segunda etapa	42
2.3.2.1. Dosis de coagulante químico	42
2.3.2.2. Prueba de jarras	42
2.3.2.3. Parámetro A/S	43
2.4. Determinación de la necesidad de aplicación de otros procesos físicos y químicos al sistema D.A.F para disminuir la carga contaminante de aceites y grasas, DQO, DBO ₅ , (ST), (SDT), (SST)	43
2.4.1. Neutralización	43
2.4.2. Filtración	44
2.5. Diseño de un sistema de flotación por aire disuelto (F.A.D) para mejorar la calidad del agua residual de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe	44
2.5.1. Cálculo de los parámetros de diseño	45
2.5.2. Cálculo de las dimensiones del tanque de flotación	45
2.5.3. Cálculo de las dimensiones del tanque de presurización	46
2.6. Análisis económico para la implementación del sistema propuesto	46
2.6.1. Costo de implementación	46
2.6.2. Costo de operación	47
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
3.1. Resultados del muestreo y caracterización de la mezcla del efluente proveniente de la industria Láctea el Ordeño y la Corpabe	48
3.1.1. Medición de parámetros en situ	48
3.1.2. Medición de parámetros en laboratorio	49
3.2. Resultados de la evaluación de un sistema de flotación por aire disuelto (FAD) construido a nivel laboratorio	50
3.2.1. Construcción del sistema de flotación por aire disuelto	50
3.2.1.1. Cámara de saturación	50
3.2.1.2. Tanque de flotación	52
3.2.2. Funcionamiento del sistema	54

3.3.	Resultados de la determinación de las mejores condiciones de presión de saturación, porcentaje de recirculación y dosis de coagulante del sistema de flotación por aire disuelto (FAD) para disminuir la carga contaminante de aceites y grasas, DQO, DBO ₅ , sólidos totales (ST), sólidos sedimentables (SS) y sólidos suspendidos totales (SST)	56
3.3.1.	Primera etapa	56
3.3.1.1.	Estudios de la influencia de la presión de operación y reciclaje	56
3.3.1.2.	Análisis de la relación A/S	62
3.3.2.	Segunda etapa	65
3.3.2.1.	Características de químicos	65
3.3.2.2.	Dosis de coagulante químico	66
3.3.2.3.	Estudio de la influencia de la presión de operación, reciclaje y coagulante químico en el tratamiento de flotación por aire disuelto	69
3.3.2.4.	Análisis de la relación A/S	77
3.4.	Resultados de la determinación de la necesidad de aplicación de otros procesos físicos y químicos al sistema DAF para disminuir la carga contaminante de aceites y grasas, DQO, DBO ₅ , ST, SDT y SST	80
3.4.1.	Neutralización	80
3.4.2.	Filtración	82
3.5.	Resultados del diseño de un sistema de flotación por aire disuelto (F.A.D) para mejorar la calidad del agua residual de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe	83
3.5.1.	Condiciones óptimas de operación	83
3.5.2.	Criterios de diseño	86
3.5.3.	Parámetros de diseño	85
3.5.3.1.	Caudal recirculado presurizado	85
3.5.3.2.	Solubilidad del aire	86
3.5.3.3.	Cantidad de aire liberado	86
3.5.3.4.	Relación aire/sólidos (A/S)	86
3.5.3.5.	Cantidad de lodo producido	87
3.5.2.6.	Cantidad de coagulante químico dosificado	88
3.5.4.	Diseño del tanque de flotación	88
3.5.4.1.	Área superficial del tanque de flotación	88
3.5.4.2.	Volumen del tanque de flotación (prisma rectangular)	88
3.5.4.3.	Ancho del tanque de flotación (prisma rectangular)	88
3.5.4.4.	Largo del tanque de flotación (prisma rectangular)	89
3.5.4.5.	Volumen del tanque de flotación (pirámide rectangular)	89
3.5.4.6.	Volumen total del tanque de flotación	89
3.5.5.	Diseño del tanque de presurización	90
3.5.5.1.	Volumen del tanque de presurización	90
3.5.5.2.	Altura del tanque de presurización	91
3.5.6.	Bomba de recirculación	91
3.5.7.	Válvula reductora de presión	92
3.5.8.	Descripción del sistema de flotación por aire disuelto	92

3.6. Resultados del análisis económico para la implementación del sistema propuesto	95
3.6.1. Costo de implementación	95
3.6.2. Costo de operación	96
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
4.1. Conclusiones	97
4.2. Recomendaciones	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Consumo de agua en procesos productivos de la Industria Láctea	8
Tabla 1.2.	Operaciones de mayor generación de efluentes líquidos en la industria Láctea	9
Tabla 1.3.	Solubilidad de saturación del aire en agua a una atmósfera	25
Tabla 3.1.	Resultados de la medida de pH, temperatura y caudal del efluente muestreado durante los tres días de operación de la Industria Láctea	48
Tabla 3.2.	Resultados de la caracterización fisicoquímica de los tres días de muestreo compuesto	49
Tabla 3.3.	Dimensiones de la cámara de saturación	51
Tabla 3.4.	Dimensiones del tanque de flotación	53
Tabla 3.5.	Condiciones de operación de la primera etapa del proceso de flotación por aire disuelto	61
Tabla 3.6.	Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos durante el estudio de la primera etapa del sistema de flotación por aire disuelto	62
Tabla 3.7.	Resultados de cálculo de valores de A/S para las diferentes presiones de operación, 30-60 psi y porcentajes de reciclo, 30-60%	63
Tabla 3.8.	Características del coagulante químico	65
Tabla 3.9.	Características Físicas del Floculante químico	66
Tabla 3.10.	Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 186 (NTU), y pH de 6, repetición 1	67
Tabla 3.11.	Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 165 (NTU), pH de 6.5, repetición 2	67
Tabla 3.12.	Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 173 (NTU), pH de 5.6, repetición 3	67
Tabla 3.13.	Porcentajes de remoción de contaminantes con respecto a la presión, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico, repetición 1	70

Tabla 3.14.	Porcentajes de remoción de contaminantes con respecto a la presión, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico, repetición 2	71
Tabla 3.15.	Porcentajes de remoción de contaminantes con respecto a la presión, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico, repetición 3	71
Tabla 3.16.	Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos a 50 psi, 40 % de reciclo y 35 mg/L	77
Tabla 3.17.	Resultados de cálculo de valores de A/S para las diferentes presiones de operación, 30-60 psi y porcentajes de reciclo, 30-60%	78
Tabla 3.18.	Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 169 (NTU), y pH de 6.4	81
Tabla 3.19.	Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos para un pH de 8, 50 psi, 40 % de reciclo y 35 mg/L	81
Tabla 3.20.	Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos para un pH de 8, 50 psi, 40 % de reciclo y 35 mg/L, filtro carbón activado	82
Tabla 3.21.	Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos para un pH de 8, 50 psi, 40 % de reciclo y 35 mg/L, filtro zeolita	83
Tabla 3.22.	Condiciones óptimas para el cálculo de los parámetros de diseño del sistema FAD determinadas experimentalmente	84
Tabla 3.23.	Criterios asumidos para el cálculo de los parámetros del diseño del sistema FAD	84
Tabla 3.24.	Dimensiones del tanque de flotación	90
Tabla 3.25.	Dimensiones del tanque de presurización	91
Tabla 3.26.	Resultados del costo de implementación del sistema de flotación por aire disuelto	95
Tabla 3.27.	Resultados del costo de operación del sistema FAD	96
Tabla AIII.1.	Selección de la cantidad de muestra del efluente con respecto al rango de medido del DBO ₅	113
Tabla AX.1	Densidad del aire a una atmósfera	124

Tabla AX.2	Presión de vapor del agua	125
Tabla AX.3	Condiciones requeridas para el cálculo del parámetro A/S a una temperatura de 30 °C	125

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Punto de descarga de los efluentes generados en la Industria Láctea El Ordeño y la Corpabe	10
Figura 1.2.	Tanque circular de flotación por aire disuelto	19
Figura 1.3.	Tanque rectangular de flotación por aire disuelto	20
Figura 1.4.	Tanque de presurización	21
Figura 1.5.	Esquema del sistema de flotación por aire disuelto con presurización total del efluente	23
Figura 1.6.	Esquema del sistema de flotación por aire disuelto con presurización de la recirculación	24
Figura 1.7.	Mecanismos de contacto entre las burbujas y las partículas de suspensión en el sistema FAD	29
Figura 1.8.	Influencia de la presión en el diámetro de las burbujas de aire generadas en el sistema FAD	31
Figura 2.1.	Esquema de un sistema de flotación por aire disuelto construido a escala laboratorio	39
Figura 3.1.	Cámara de Saturación	51
Figura 3.2.	Tanque de flotación	53
Figura 3.3.	Sistema de flotación por aire disuelto de contacto con el tratamiento	54
Figura 3.4.	Agua clarificada después del tratamiento en el equipo FAD	55
Figura 3.5.	Remoción de DQO con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto	57
Figura 3.6.	Remoción de DBO5 con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto	57
Figura 3.7.	Remoción de aceites y grasas con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto	58

Figura 3.8.	Remoción de sólidos suspendidos con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto	59
Figura 3.9.	Remoción de sólidos totales con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto	60
Figura 3.10.	Remoción de sólidos sedimentables con respecto a la variación de presión y porcentaje de reciclo en el sistema de flotación por aire disuelto	61
Figura 3.11.	Remoción de sólidos suspendidos con respecto a valores de A/S en el sistema de flotación por aire disuelto para un reciclo del 40 %	64
Figura 3.12.	Prueba de jarras para una muestra del efluente con turbidez inicial de 186 (NTU) y pH 6.	69
Figura 3.13.	Remoción de DQO del efluente con respecto a la presión de operación	72
Figura 3.14.	Remoción de DBO5 del efluente con respecto a la presión de operación	73
Figura 3.15.	Remoción de aceites y grasas del efluente con respecto a la presión de operación	74
Figura 3.16.	Remoción de sólidos totales del efluente con respecto a la presión de operación	75
Figura 3.17.	Remoción de sólidos sedimentables del efluente con respecto a la presión de operación	76
Figura 3.18.	Remoción de sólidos suspendidos del efluente con respecto a la presión de operación	76
Figura 3.19.	Remoción de sólidos suspendidos con respecto a valores de A/S en el sistema de flotación por aire disuelto para un reciclo del 40 %	79
Figura 3.20.	Dimensiones del tanque de flotación	90
Figura 3.21	Diseño del sistema de flotación por aire disuelto (F.A.D) para el tratamiento del agua residual de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe	94
Figura AI.1.	Velocidad ascensional de burbujas de aire en función del tamaño de la partícula	109

Figura AII.1.	Resultados de la medida de aceites y grasas en el efluente	111
Figura AIII.1.	Equipo para la medida del DBO ₅	113
Figura AVI.1.	Cono de sedimentación	116
Figura AVIII.1.	Equipo de jarras	118
Figura AIX.1	Norma Ambiental TULSMA para descargas a un receptor de agua dulce	119
Figura AXI.1	Forma del tanque de flotación	129
Figura AXIII.1.	Catálogo de la selección de la bomba de presurización	135

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Velocidad ascensional de burbujas de aire en función del tamaño de la partícula	109
ANEXO II	
Determinación de aceites y grasas con base en el método APHA 5520 B	110
ANEXO III	
Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) con base en el método APHA 5510 B	112
ANEXO IV	
Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) con base en el método APHA 5510 B	114
ANEXO V	
Determinación de sólidos totales con base en el método APHA 2540 B	115
ANEXO VI	
Determinación de sólidos sedimentables con base al método APHA 2540 F	116
ANEXO VII	
Determinación de sólidos disueltos con base en el método APHA 2540 F	117
ANEXO VIII	
Procedimiento de la prueba de jarras	118
ANEXO IX	
Norma ambiental TULSMA para descargas a un receptor de agua dulce	119
ANEXO X	
Cálculos de los parámetros de diseño del sistema de flotación por aire disuelto	121
ANEXO XI	
Dimensionamiento del tanque de flotación del sistema de FAD	128
ANEXO XII	
Dimensionamiento del tanque de presurización del sistema FAD	133
ANEXO XIII	
Catálogo de la bomba de presurización	135

RESUMEN

En el presente proyecto se estudió el proceso de flotación por aire disuelto como una alternativa para el tratamiento del agua residual de la Industria Láctea El Ordeño y la Corpabe localizadas en el Sector de Aipicho Machachi.

La caracterización del efluente permitió verificar que el agua residual no cumple con la Norma ambiental vigente para descargas a un cuerpo receptor de agua dulce (Norma TULSMA). Los parámetros analizados fueron: pH, DQO, DBO₅, aceites y grasas, sólidos totales, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos.

Para la determinación de las condiciones óptimas de operación del sistema, se construyó un equipo de flotación por aire disuelto a escala laboratorio, que consta de un tanque de flotación con una capacidad de 2 L y una cámara de presurización de 17 L.

En la primera etapa, sin la adición de coagulante químico, se analizó la influencia de la presión de operación y porcentaje de reciclo en la disminución principalmente de aceites y grasas, así como también de sólidos suspendidos. Con una presión de 60 psi y 40 % de reciclo se alcanzaron valores de 43 % y 41,8 % de reducción en aceites-grasas y sólidos suspendidos, respectivamente. La relación mg/L de aire liberado por la despresurización/ mg/L de sólidos en el efluente (A/S) fue 0,031.

En la segunda etapa, las condiciones de operación que generaron los mejores resultados con respecto a la remoción de la carga contaminante fueron: una presión de 50 psi, porcentaje de reciclo del 40 % y dosis de poli cloruro de aluminio de 35 mg/L. Los porcentajes de remoción obtenidos bajo estas condiciones corresponden a un 87,7 % para aceites y grasas y un 82,6 % para los sólidos suspendidos. La relación de A/S para esta etapa fue 0,021.

La combinación de los procesos de neutralización y filtración para mejorar la eficiencia del sistema, permitieron alcanzar porcentajes de remoción en los contaminantes del 62,5 % de la DQO, 62,6 % de la DBO₅, 91,2 % de aceites y

grasas, 88,6 % de sólidos suspendidos, 80,4 % de sólidos totales y un 82,5 % de sólidos sedimentables.

Sobre la base de estos resultados, se diseñó el sistema para el tratamiento del efluente, que consta principalmente de un tanque de flotación, un tanque de presurización, un compresor, una bomba de presurización y una válvula reductora de presión. Las dimensiones del tanque de flotación son de 3,36 m de ancho, 4,87 m de largo y 1,2 m de altura, y del tanque de presurización son 0,60 m de diámetro y 1,3 m de altura.

Se estimó que el costo de instalación del sistema de FAD demanda de una inversión de \$ 97.900, con un costo de tratamiento por metro cúbico de agua tratada de \$ 0.68.

INTRODUCCIÓN

La Industria Láctea es un sector económico importante en el país, la cual se encuentra sujeta a cambios, producto de las variables de mercado y de producción. En la actualidad ha alcanzado avances importantes, logrando elevados estándares de calidad en sus productos. Sin embargo, hoy los mercados también exigen que los procesos productivos se desarrollen cuidando el medio ambiente, por lo que deben poner especial atención en el manejo y tratamiento de sus desechos industriales.

La diversidad de productos y métodos de producción de la Industria, generan gran cantidad de efluentes que son considerados como aguas residuales complejas, por la presencia de elevados niveles de DQO y DBO, alta concentración de sólidos suspendidos y alto contenido orgánico de varios tipos de compuestos, tales como carbohidratos, proteínas y lípidos, los mismos que son difíciles de eliminar por tratamientos tradicionales. (Casas, 2009, p.10). Por esta razón, el presente proyecto pretende analizar y proponer una solución que permita reducir significativamente los impactos ambientales que provoca la eliminación de las aguas residuales generadas por la industria y cumplir con la norma ambiental vigente TULSMA.

Uno de los tratamientos más eficientes para el tratamiento de aguas residuales con altas cargas contaminantes de SST de menor densidad que el agua, y por tanto no eliminables a través de un proceso de decantación y la eliminación de aceites y grasas no eliminables en los sistemas de separación tradicionales, se encuentra la flotación por aire disuelto. (Sainz, 2005, p.) .Estudios sobre el uso de esta tecnología en aguas municipales y en aguas residuales industriales, han demostrado que la eficiencia en la remoción de estos compuestos, es superior a los métodos convencionales de tratamiento como los separadores API, separadores de placas corrugadas, sedimentación y decantación. (Rojas, 2008, p.1).

La flotación por aire disuelto es una operación unitaria eficaz utilizada para separar las partículas líquidas o sólidas de baja densidad de una fase líquida, principalmente materiales grasosos. Inicialmente el líquido es sometido a un proceso de presurización con aire comprimido para conseguir la disolución del gas en el líquido. La presión oscila entre 2 a 6 atmósferas. Seguidamente el sistema es despresurizado mediante una válvula reductora de presión, formándose micro burbujas de aire que se adhieren a las partículas contaminantes y los obliga a flotar sobre la superficie libre del líquido. Finalmente los sólidos se separan de la superficie por sistemas mecánicos (raspadores) y parte del líquido es recirculado para lograr mayores eficiencias de separación. (Salas, 2003, p. 60). El tratamiento propuesto permite emplear altas cargas superficiales y periodos cortos de retención, lo que significa que el tamaño y espacio ocupado por la unidad sea menor en comparación con equipos como los sedimentadores, además de reducir el bajo costo de construcción e instalación. (Nemerow y Dasgupta, 1998, p.138.)

Méndez et al. (2008), con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de flotación por aire disuelto, sugiere emplear algunos productos químicos, que en su mayor parte actúan de manera que crean una superficie o estructura que pueda absorber o atrapar fácilmente las burbujas de aire. El efecto del pre-tratamiento químico, adquiere importancia particularmente cuando aquellos componentes emulsionados del efluente deben ser removidos. (MetCalf, 1995, p. 313).

La investigación de la tecnología descrita permitirá a la Industria Láctea mejorar la calidad del agua y cumplir con la Normativa Ambiental, ya que el incumplimiento de esta representará un costo adicional, el riesgo de multas, sanciones y cierre temporal o definitivo de la empresa.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 GENERACIÓN DE EFLUENTES LÍQUIDOS EN LA INDUSTRIALÁCTEA EL ORDEÑO Y LA CORPABE

La Industria Láctea se encuentra integrada por la sociedad industrial ganadera El Ordeño y la Corporación Ecuatoriana de Alimentos y Bebidas S.A (CORPABE), localizadas en la Provincia de Pichincha, Cantón Mejía, Panamericana Sur Km 34 ½ en el Sector de Aipicho Machachi. Actualmente ofrecen una amplia gama de productos de alta calidad como la leche líquida y en polvo.

1.1.1 EL ORDEÑO

El Ordeño es una empresa dedicada a la producción y empaqueo de productos lácteos en polvo, que son distribuidos al mercado interno del país. Constantemente implementa nuevas tecnologías que mejoran la eficiencia de los procesos y minimizan el impacto ambiental que provocan sus actividades. El área total es de 40.000 m² de los cuales 250 m² son utilizados para realizar los procesos de producción. (Ecuadorambiental, 2012, p.7).

Los productos lácteos elaborados son: leche entera en polvo, leche descremada en polvo y leche industrial en polvo

1.1.1.1 Procesos de producción

Los procesos industriales que se llevan a cabo en la planta de producción El Ordeño, para la elaboración de los productos lácteos en polvo se describen a continuación:

Recepción de materia prima

Este proceso comprende el ingreso de la leche hacia los silos de almacenamiento de la planta de producción de la Industria Láctea (entre 50.000 a 60.000 litros/día).

Control de Calidad

Los parámetros que definen la calidad de la leche son: acidez, presencia de antibióticos, conservantes, entre otros. Los mismos son medidos y analizados diariamente por el personal de laboratorio para permitir la salida de la leche hacia los siguientes procesos.

Enfriamiento

Mediante el uso de bombas se extrae la leche de camiones proveedores y se coloca en un intercambiador de placas. Al salir del enfriador la leche se dispone temporalmente en 5 silos; 2 silos de 50.000 litros; 1 silo de 14.000 litros y 2 silos de 11.000 litros de capacidad. El agua del proceso de enfriamiento es recirculada con la finalidad de aprovechar adecuadamente el recurso y evitar descargas al cauce de agua dulce.

Pasteurización, descremado y homogenización

En esta sección se cuenta con tres equipos: un pasteurizador que aumenta la temperatura de la leche para eliminar los microorganismos, una descremadora para extraer la mayor cantidad de crema en la leche y un homogeneizador que permite el paso de la leche por pequeñas boquillas que evitan la formación futura de una capa de crema.

La pasteurización se convierte en una esterilización parcial que busca alterar lo menos posible los componentes químicos y las propiedades organolépticas de la leche.

Evaporación y secado

La leche desde los silos pasa a un evaporador de película descendente el cual trabaja al vacío y procesa hasta 7000 litros de leche por hora. Al entrar la leche al equipo contiene un 12 % de sólidos y al salir contiene un 48 % de los mismos. Después, la leche pasa a una torre de secado en la cual se elimina casi la totalidad del agua, obteniéndose leche en polvo con un contenido de hasta un 3% de agua en su composición. La torre utiliza aire caliente desde 165-210 °C. De cada 7000 litros de leche que se procesan se extraen actualmente 6000 litros de agua evaporada que se condensa y sale a una temperatura de 63 °C, el agua se almacena en un tanque de 10.000 litros y es reutilizada en baños, duchas, lavamanos y lavado de contenedores de leche.

Empacado

Se empacan de 12 a 14 toneladas de leche en polvo diarios en fundas de 25 kg, mientras que una cantidad menor se empaca en fundas pequeñas de 960, 480, 240 y 120 gr. Las fundas de 25 kg son atadas y posteriormente cosidas, mientras que las pequeñas son selladas utilizando empacadoras convencionales.

Almacenamiento del producto final

La leche en polvo empacada se ubica temporalmente en la bodega de producto final, la cual tiene una capacidad de almacenamiento de 350 toneladas.

1.1.2 LA CORPABE

La Corpabe es una empresa dedicada principalmente al procesamiento y distribución de productos lácteos líquidos a nivel nacional como: Leche UHT entera, leche UHT semidescremada y leche UHT descremada. (Corpabe, 2013, p.1).

1.1.2.1 Procesos de producción

Los procesos industriales que permiten el procesamiento de los productos lácteos líquidos en la planta de producción la Corpabe se describen a continuación:

Recepción de la leche

Una vez ingresada la leche a la planta de producción, se determina la cantidad y su calidad.

Estabilización y almacenamiento

La estabilización de la proteína de la leche se realiza con la adición de sales de sodio al 0.8% para luego ser almacenada durante un tiempo mínimo de una hora a una temperatura menor de 8 ° C.

Estandarización

Cuando la leche no cumple la prueba de contenido graso se somete a un proceso de estandarización. El contenido graso es diferente para cada tipo de producto lácteo líquido.

Pasteurización

La leche se calienta a una temperatura de 75 °C por un intervalo de 15 segundos para eliminar microorganismos patógenos específicos para luego ser almacenada temporalmente a una temperatura menor a 8 °C.

Homogenización

La homogeneización de la leche evita la separación de la nata y favorece una distribución uniforme de la materia grasa.

Esterilización y enfriamiento

La temperatura empleada para eliminar cualquier microorganismo presente en la leche, mediante el proceso de esterilización se realiza a 139 °C durante 4 segundos. Después, la leche es enfriada en un rango de temperatura de 20-25 °C, para posteriormente ser envasada.

Almacenamiento de producto final

La leche envasada y sellada se ubica temporalmente en la bodega de producto final, para luego ser despachada hacia los diferentes puntos de venta a nivel nacional.

Los procesos descritos de la Industria Láctea son datos históricos recolectados por estudios realizados a lo largo de su desarrollo y crecimiento por parte de la misma empresa.

1.1.3 OPERACIONES AUXILIARES EN LA INDUSTRIA LÁCTEA

Para garantizar la calidad de los productos elaborados en la Industria Láctea, las condiciones de higiene de los equipos e instalaciones son muy importantes, llegando a representar la cuarta parte del tiempo total del trabajo. Las operaciones auxiliares comunes a todos los procesos incluyen: operaciones de limpieza y desinfección, generación de vapor y generación de frío. (AINIA, 1996, p.80).

1.1.3.1 Operaciones de limpieza y desinfección

Las operaciones de limpieza y desinfección constituyen la mayor parte del consumo de agua, energía y productos químicos, generando diariamente elevadas cantidades de efluentes líquidos. La limpieza y desinfección son operaciones que se realiza de manera conjunta o por separado. La limpieza permite eliminar el total de restos de leche y desechos en equipos e instalaciones, mientras la desinfección elimina microorganismos patógenos y no patógenos. (CAR/PAL, 2002, p. 68)

Las operaciones antes descritas requieren:

- Agua para disolver soluciones de productos químicos y sólidos adheridos a la superficie de equipos.
- Energía eléctrica para el funcionamiento de la planta de producción y energía térmica para alcanzar la temperatura óptima del proceso.
- Productos químicos para el mantenimiento de las condiciones higiénicas.
- Personal capacitado para mantener las condiciones de limpieza y desinfección en cada etapa de la Industria.

Los instrumentos necesarios para la limpieza de equipos e instalaciones son físicos (temperatura, presión, cepillos, etc.) y químicos (productos básicos y químicos). Los medios físicos se emplean para eliminar de forma mecánica la suciedad. Un ejemplo; el uso de cepillos implica una fuente de contaminación sino

es manejada adecuadamente. Los métodos químicos se basan en el uso de productos en forma de disoluciones acuosas de carácter ácido o básico. Los productos ácidos ayudan a eliminar incrustaciones formadas por la acumulación de sales de leche y agua, mientras que los detergentes alcalinos disuelven las grasas adheridas a los equipos. Los productos químicos utilizados diariamente por la Industria Láctea son: sosa caustica al 3 % para eliminar grasas incrustadas, ácido nítrico al 3 % para eliminar tanto las sales como las proteínas y finalmente ácido per-acético para sanitizar equipos y materiales. Igualmente, los medios de desinfección empleados son físicos (temperatura) y químicos (desinfectantes). La temperatura empleada para generar agua caliente, vapor o aire caliente permite desinfectar equipos y superficies contaminadas. Los desinfectantes presentan propiedades germicidas y contienen sustancias alcalinas e inhibidores de corrosión.

La contaminación en la Industria Láctea se debe principalmente a la composición química de la leche, lo cual determina las condiciones de limpieza y desinfección, que dependen del personal a cargo, productos químicos utilizados, disponibilidad de equipos, etc.

1.1.3.2 Generación de vapor

El agua empleada en la alimentación de las calderas no requiere condiciones higiénicas especiales, pero es necesario que el contenido en carbonatos y sulfatos sea bajo, debido a que el intercambio de calor se ve afectado cuando se produce la formación de incrustaciones de sales en las tuberías de distribución. El tratamiento del agua para estos equipos genera un efluente altamente contaminado con sustancias químicas. (Ministerio de Ambiente, 2011, p.55). Los condensados son reutilizados como agua de alimentación de equipos o agua caliente en el proceso, con lo que se consigue un ahorro en su consumo.

1.1.3.3 Generación de frío

La Industria Láctea produce frío principalmente con dos fines: para el enfriamiento de cuartos de almacenamiento y enfriamiento de los líquidos. El agua del proceso de enfriamiento es recirculada con la finalidad de aprovechar adecuadamente el recurso y evitar descargas al cauce de agua dulce. Sin embargo, una parte de este tipo de agua forma el efluente final.

1.1.4 CONSUMO DE AGUA

El principal recurso natural empleado en la mayor parte de las actividades de producción, como en procesos de limpieza y desinfección, es el agua. La Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe diariamente consume elevadas cantidades de agua en cada proceso y especialmente para mantener las condiciones higiénicas y sanitarias requeridas. El consumo se encuentra entre 11-15 litros/segundo. El mayor consumo de agua se produce en las operaciones auxiliares, particularmente en la limpieza y desinfección, donde se consume entre el 25-40% del total. Las operaciones que involucran el mayor consumo de agua dentro de la Industria se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Consumo de agua en procesos productivos de la Industria Láctea

Proceso Productivo	Nivel de consumo	Operaciones con mayor consumo de agua	Observaciones
Elaboración de la leche	Bajo	Tratamiento Térmico Envasado	
Operaciones Auxiliares	Alto	Limpieza y desinfección Generación de vapor Enfriamiento	Estas operaciones suponen el mayor consumo de agua

1.1.5 EFLUENTES LÍQUIDOS

Los efluentes son el aspecto que presenta mayor incidencia medioambiental debido al alto volumen de descargas hacia el cuerpo receptor. (AINIA, 1996, p.80). La Industria Láctea produce diariamente una elevada cantidad de efluentes

líquidos, que oscilan entre 4-6 litros/segundo y se caracterizan por presentar alta carga contaminante, especialmente aceites y grasas, así como también elevada cantidad de sólidos suspendidos y disueltos. El caudal vertido depende de la operación que se está realizando en cada momento y de la gestión de los efluentes que se realice en la planta de producción. El origen principal de la contaminación en el agua residual se debe a pérdidas del producto en las distintas etapas del proceso para la obtención de leche líquida y leche en polvo.

La Tabla 1.2 resume los procesos productivos que generan la mayor cantidad de efluentes en la Industria Láctea.

Tabla 1.2. Operaciones de mayor generación de efluentes líquidos en la Industria Láctea

Proceso Productivo	Nivel de Vertido	Operaciones con mayor generación de aguas residuales
Elaboración de la Leche	Medio	Tratamiento térmico Envasado
Control de calidad	Bajo	Lavado de materiales
Operaciones Auxiliares	Alto	Limpieza y desinfección Enfriamiento

Los distintos procesos en la Industria Láctea que generan gran cantidad de efluentes se clasifican de la siguiente manera:

- Agua de proceso: Agua que interviene en el proceso de elaboración de productos lácteos en polvo y líquidos.
- Agua de Servicios: Agua para el funcionamiento de calderas y equipos de refrigeración.
- Agua Sanitaria: Agua para servicios sanitarios del personal que trabaja en la Industria.

- Agua de Limpieza y desinfección: Agua para el lavado de equipos y materiales de la Industria.

El agua residual que genera cada empresa tanto El Ordeño como la Corpabe, se unen en un tanque de almacenamiento para luego ser descargadas a un cauce de agua dulce.

La Figura 1.1 muestra el sitio de recolección de todos los efluentes generados por los procesos industriales en la elaboración de productos lácteos.



Figura 1.1. Punto de descarga de los efluentes generados en la Industria Láctea El Ordeño y la Corpabe

1.1.5.1 Composición de los efluentes

Todos los componentes de la leche como agua, grasa, proteínas, azúcares y minerales aparecen en el agua residual en mayor o menor cantidad, ya sea por disolución o por arrastre de los mismos con las aguas de limpieza y desinfección.

En general, los efluentes de la Industria Láctea presentan las siguientes características:

- Alto contenido de materia orgánica, debido a la presencia de los componentes de la leche. El 90 % del DQO se atribuye a la composición de la leche y el 10% a la suciedad generada. (Pacururu, 2011, p.26)
- Altos niveles de aceites y grasas, debido a la grasa de la leche.
- Alto contenido de nitrógeno y fósforo, debido al uso de productos químicos para la limpieza y desinfección de equipos.
- Variaciones de pH, debido a las operaciones de limpieza y desinfección que ocasionan vertidos de soluciones ácidas y básicas.
- Variaciones de temperatura.
- Elevada carga contaminante de sólidos totales, disueltos y suspendidos.

1.1.5.2 Contaminantes de los efluentes

El agua residual de la Industria Láctea presenta ciertos contaminantes físicos y químicos que alteran su composición y causan diversos efectos sobre el cuerpo receptor de descarga y que son difíciles de eliminar por tratamientos convencionales.

Contaminantes físicos

Las principales características físicas del agua residual son su contenido de color, temperatura, aceites y grasas, sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos suspendidos totales.

Color

El color en el agua residual se origina por la presencia de material coloidal y sólidos suspendidos. En forma cualitativa, este parámetro permite estimar de manera general las condiciones del efluente. (Crites y Tchobanoglous, 2000, p. 42-43)

Los efectos sobre el cuerpo receptor son:

- Afecta la fotosíntesis, como consecuencia de disminuir la transmisión de la energía solar.
- Afecta la vida acuática, al disminuir la visión de los peces.

Grasas y aceites

Los lípidos denominados aceites y grasas se caracterizan por ser insolubles en agua y solubles en ciertos solventes orgánicos no polares. Debido a sus propiedades, su presencia puede causar muchos problemas en tanques sépticos, sistemas de recolección y en el tratamiento de aguas residuales. (Crites y Tchobanoglous, 2000, p. 42-43). La densidad está comprendida en un rango de 0.92-0.94 g/l.

Los efectos sobre el cuerpo receptor son:

- Impide la fotosíntesis, respiración y transpiración de seres animales y vegetales.
- Impide la transferencia de oxígeno desde la atmósfera a la masa del líquido, debido a que la solubilidad del oxígeno en aceites y grasas es extremadamente baja y en muchos casos casi nula.
- Produce efectos estéticos perjudiciales.

Temperatura

La temperatura altera la solubilidad de los gases y determina el nivel de actividad de poblaciones microbianas. El valor de este parámetro, también incide en la cantidad de oxígeno disponible en el agua residual.

Los efectos sobre el cuerpo receptor son:

- Altera las características físicas del agua: densidad y viscosidad.
- Disminuye la solubilidad de los gases
- Aumenta la velocidad de las reacciones químicas y bioquímicas.

Sólidos Totales

Los sólidos totales corresponden a la suma de los sólidos disueltos y en suspensión presentes en el agua residual. Son los residuos que resultan de la evaporación y secado de la muestra a 103-105 °C. (Laboratorio de la Dirección Nacional de Medio Ambiente, 1996, p. 22).

Sólidos disueltos

Los sólidos disueltos constituyen las sales que se encuentran presentes en el agua residual. La presencia de estos sólidos no es detectable a simple vista, por lo tanto se determinan analíticamente al evaporar el agua y pesar el medio que contiene las sales residuales. (Crites y Tchobanoglous, 2000, p. 38).

Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos comprenden el material que se encuentra en fase sólida en el agua residual en forma de coloides o partículas finas, causantes de la turbidez del agua. Son materiales retenidos por un filtro estándar de fibra de vidrio

y secados a 103-105 °C. (Laboratorio de la Dirección Nacional de Medio Ambiente, 1996, p. 19).

Contaminantes químicos

Los contaminantes químicos presentes en el agua residual de la Industria Láctea constituyen el DQO, DBO₅ y el pH.

Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO constituye la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química de la materia orgánica susceptible a oxidarse en una muestra de agua residual. (Torres, 2006, p.1)

Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar biológicamente la materia orgánica, bajo condiciones aerobias presente en el agua residual. La relación DQO/DBO₅ proporciona una estimación de la biodegradabilidad de las aguas residuales. (Rojas, 2002, p. 7).

pH

El valor de pH permite determinar la calidad de las aguas residuales, debido a que el rango en el cual pueden interactuar los ecosistemas y sobrevivir las especies está sumamente restringido, por lo cual si este valor es alterado, los procesos biológicos que normalmente se llevan a cabo pueden ser perturbados y las consecuencias adversas. (Velázquez y Ordorica, 2009, p. 4)

1.2 FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS

1.2.1 FLOTACIÓN

La flotación es una operación unitaria utilizada para separar partículas líquidas y sólidas de baja densidad de una fase líquida, mediante burbujas finas de un gas, generalmente aire. Estas burbujas se adhieren a las partículas suspendidas y la fuerza ascendente, permite que el conjunto partícula-burbuja de aire suba a la superficie, logrando que partículas con mayor densidad que el agua, puedan ser separadas por flotación. (Romero, 2000, p. 345; MetCalf, 1977, p. 310). La aglomeración de lodos flotados pueden ser eliminados fácil y rápidamente de la superficie del líquido mediante la utilización de una barredera. Estos lodos son generalmente estables y libres de olores. (Nemerow y Dasgupta, 1998, p. 136).

1.2.1.1 Clases de sistemas de flotación

Los sistemas de flotación, se clasifican de acuerdo a la manera de generar o introducir las burbujas de aire al seno del líquido. Los procesos de flotación más conocidos en el tratamiento de aguas residuales se detallan a continuación.

Flotación a presión atmosférica

En este sistema la introducción directa del aire se realiza mediante el uso de difusores de burbuja fina ubicados en el fondo del tanque de flotación. Debido al bajo número de capturas de sólidos por las burbujas inyectadas, este sistema presenta una baja eficiencia en la separación de sólidos suspendidos aunque para ciertas aguas residuales con contenido de aceites y grasas, ofrece cierta disminución. El sistema no se emplea de forma habitual en el tratamiento de aguas residuales, debido a bajos rendimientos para conseguir disminución de cargas contaminantes. (Sainz, 2005, p.148)

Flotación electrolítica

La flotación electrolítica o electro-flotación es la generación de burbujas de hidrógeno y oxígeno en una solución acuosa diluida mediante el paso de una corriente eléctrica continua entre dos electrodos. La aplicación de este sistema ha sido restringida para pequeñas plantas de tratamiento de agua residual en el rango de 10 a 20 m³/h, debido al elevado consumo energético. (American Water Works, 2002, p. 412).

Flotación por aire inducido

En la flotación por aire inducido, el aire se introduce dentro de la fase acuosa mediante aireadores o turbinas. La aspiración de aire se realiza mediante inducción desde la atmósfera o forzado mediante eyectores. El sistema se basa en la función de un rotor que al girar produce la mezcla íntima del aire del ambiente con el agua residual y permite el contacto entre las burbujas generadas y las partículas sólidas en el efluente líquido. Debido a los grandes tamaños de burbuja generados por el sistema (1000 µm) se incrementa la cantidad de aire que se debe inyectar y por lo tanto el uso de grandes difusores representa mayor consumo energético. (Forero, Díaz y Blandón, 1999, p.69).

1.2.2 FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (FAD)

La flotación por aire disuelto (FAD) se consigue introduciendo agua residual en un tanque de presurización, donde el aire es disuelto hasta saturación bajo una presión entre cuatro y seis atmósferas, seguido de una descompresión a presión atmosférica. Al disminuir la presión del líquido, el gas disuelto se libera en toda la masa del líquido del tanque de flotación en forma de finas burbujas. Las burbujas generadas tienden a formarse en la interface sólido-líquido, donde se produce la fijación del aire sobre las partículas y de esta manera se facilita la flotación de materiales en suspensión y principalmente materiales grasos. El material

flotante es recolectado en la parte superior del tanque a través de mecanismos como barrederas y el líquido clarificado se retira mediante un vertedero protegido por deflectores que evitan la salida del material flotante. (Romero, 2000, p.345; Sainz, 2005, p.149).

La flotación por aire disuelto en aguas residuales facilita la remoción de sólidos suspendidos en un 30-60 %, mientras que para aceites y grasas la eliminación es de un 50-80%. (Veall, 1993, p. 163).

Ventajas

- Remoción de grasas, sólidos livianos y pesados en una sola unidad
- Debido a los períodos cortos de retención y a la presencia de oxígeno disuelto en el efluente, en muchos casos se disminuye la presencia de olores.
- Los lodos generados en muchos casos son más espesos que los producidos en sistemas de sedimentación por gravedad
- Los sólidos recuperados se pueden utilizar como combustible

Desventajas

- Los costos de operación pueden ser más altos que otros sistemas, por el consumo de energía, productos químicos y mantenimiento.
- En muchas ocasiones, el sistema no es efectivo en la disminución de sólidos suspendidos como las unidades de sedimentación por gravedad.
- La operación del sistema puede ser complicada.

1.2.2.1 Descripción de elementos del sistema FAD

Los principales elementos de un sistema de flotación por aire disuelto constituyen:

- Tanque de flotación
- Tanque de presurización

Tanque de flotación

Es una unidad diseñada para permitir la despresurización a presión atmosférica del agua residual presurizada previamente y saturada en aire. Las burbujas que se liberan en la solución del tanque, se elevan hacia la superficie en conjunto con el material suspendido. El tiempo de retención en el tanque de flotación estimado es de 30-60 minutos dependiendo de las características del agua residual y el rendimiento de la unidad. (Wang, Fahey y Wu, 2005, p. 441).

La construcción de estos tanques puede ser de forma rectangular o circular de acuerdo al caudal de agua residual a tratar.

- ***Tanques circulares***

Los tanques circulares se usan principalmente en pequeñas plantas de tratamiento aguas residuales o para aplicaciones de espesamiento de lodos que no requieren pre floculación antes de la flotación. En instalaciones de mayor tamaño, el agua previamente floculada debe introducirse en el fondo del centro del tanque de flotación para conseguir la distribución uniforme, como se observa en la Figura 1.2. (American Water Work, 2002, p. 426).

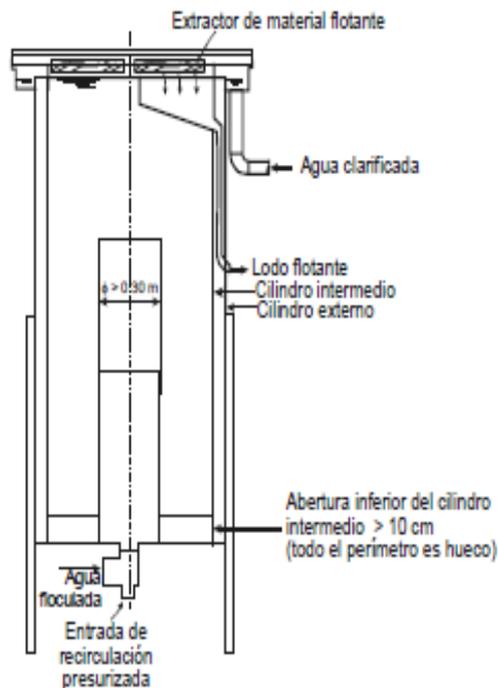


Figura 1.2. Tanque circular de flotación por aire disuelto

(Vargas, 2004, p.76)

- **Tanques rectangulares**

Los tanques rectangulares presentan ventajas en términos de escalado, diseño simple, fácil introducción de agua floculada, fácil remoción del lodo y mínimo espacio en planta. Son diseñados de acuerdo al agua a tratar y normalmente tienen una profundidad aproximada de 1.5 m. Están equipados con un baffle inclinado de 60° con la horizontal de 30 a 50 cm de largo, para dirigir la partícula-burbuja hacia la superficie y reducir las velocidades extremas del agua al ingreso del tanque, como se observa en la Figura 1.3. (American Water Work, 2002, p. 426).

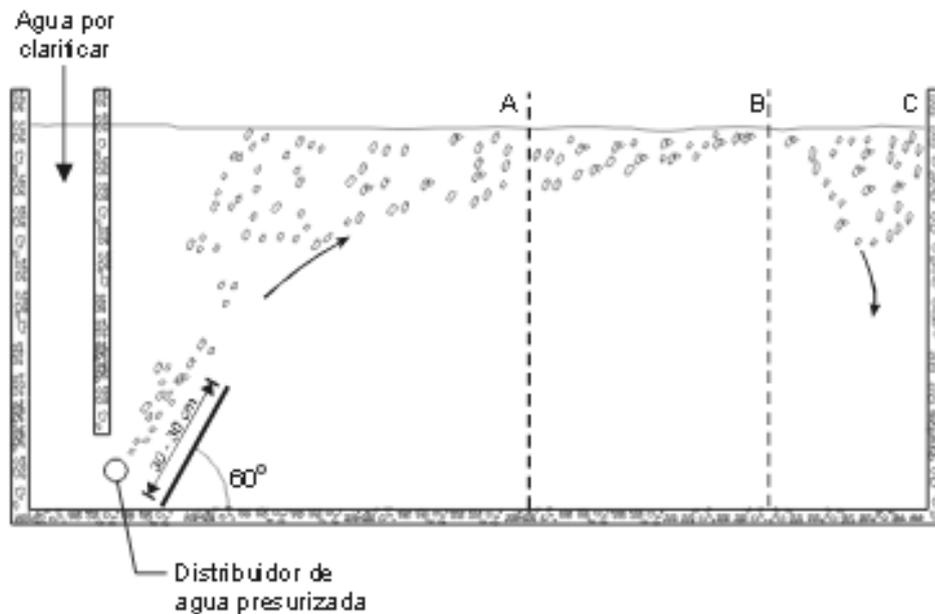


Figura 1.3. Tanque rectangular de flotación por aire disuelto
(Vargas, 2004, p.75)

Tanque de presurización

Consiste en un tanque cerrado de material capaz de resistir altas presiones usualmente comprendidas entre 250 y 500 kPa. (Vargas, 2004, p. 74). El efluente total o caudal recirculado ingresa por la parte superior del tanque y permanece un tiempo de retención comprendida entre 0,5 a 3 min bajo la presión establecida para la disolución del aire en el agua. El líquido saturado sale por la parte inferior hacia el tanque de flotación a través de una válvula reductora de presión. El equipo consta de una válvula de flotador para mantener constante el nivel del agua para garantizar el tiempo de contacto, de una válvula de seguridad para expulsar el aire en exceso y mantener la presión requerida de saturación, de un manómetro y válvulas de purga.

Los sistemas que no utilizan tanques de presurización, inyectan el aire a presión en el circuito de recirculación. La línea de la impulsión de la bomba de recirculación se construye en forma de zig-zag para aumentar la turbulencia y el

tiempo de residencia de forma que se mejore la disolución del aire. (Wang, Fahey, y Wu, 2005, p.440).

La Figura 1.4 muestra el esquema de un tanque de presurización y sus componentes.

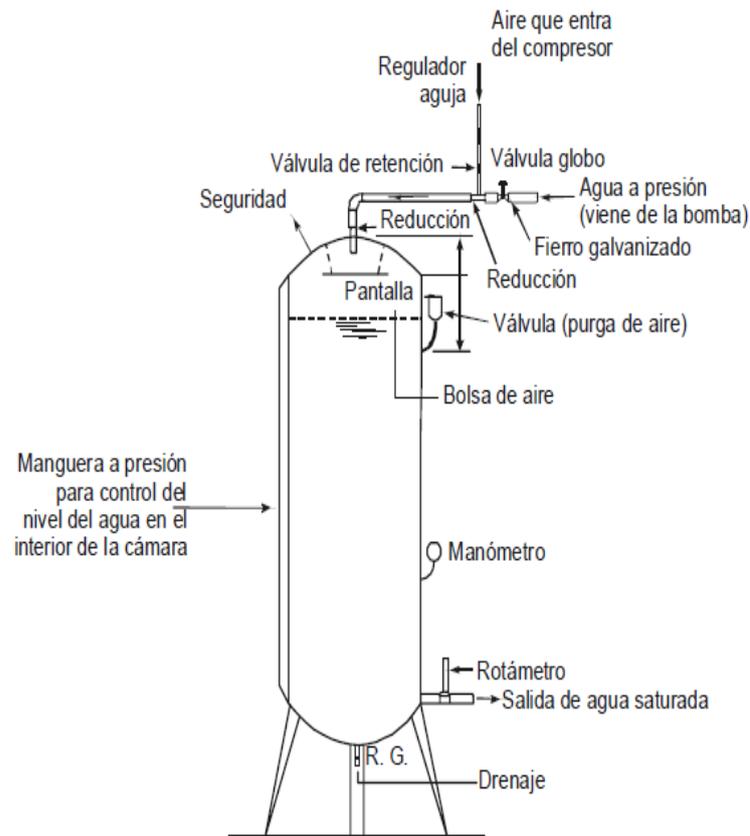


Figura 1.4. Tanque de presurización
(Vargas, 2004, p.75)

1.2.2.2 Tipos de sistemas de presurización del sistema (FAD)

En función del método de presurización aplicada, la flotación por aire disuelto se lleva a cabo mediante dos maneras distintas:

Presurización total del afluente

En este sistema todo el afluente ingresa al tanque de presurización. El sistema presenta ventajas y desventajas en el funcionamiento global del tratamiento que se detallan a continuación:

Ventajas

- Generación de mayor cantidad de burbujas mediante la disolución máxima del aire en el tanque de presurización.
- Producción de mejores condiciones para la formación de burbujas en la interface sólido-líquido.
- Elevado consumo energético, al requerir un equipo de presurización de gran tamaño.

Desventajas

- Formación de emulsiones debido al ingreso de todo el caudal por el sistema de bombeo.
- Generación de problemas de corrosión en el tanque de presurización.
- Rotura de flóculos formados en el tratamiento químico.

La Figura 1.5 indica el esquema del sistema de flotación por aire disuelto con presurización de todo el caudal.

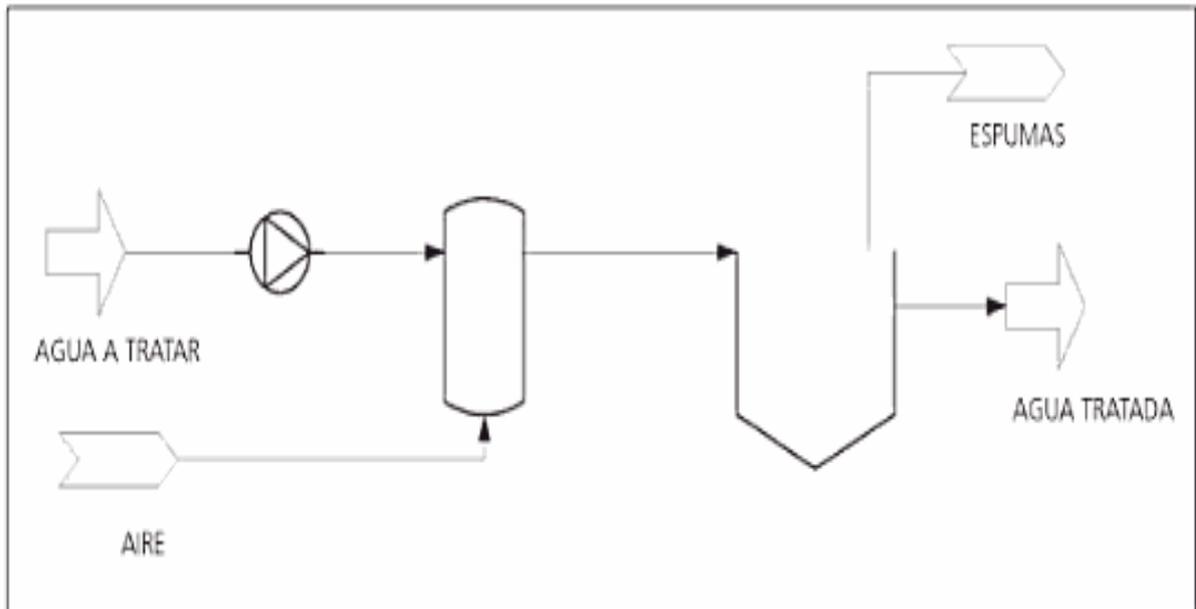


Figura 1.5. Esquema del sistema de flotación por aire disuelto con presurización total del efluente
(Sainz, 2005, p. 150)

Presurización de la recirculación

En este sistema parte del agua clarificada del tanque de flotación se recircula e introduce en el tanque de presurización. Las unidades con recirculación requieren generalmente presiones menores y optimizan la formación del floc. (Wang, Fahey, y Wu. 2005, p.441)

Entre las principales características que presenta este sistema se describen las siguientes:

- Representa menor consumo energético.
- Asimila con gran facilidad cambios en el caudal y composición.
- Optimiza la formación de flóculos en plantas con un previo tratamiento de coagulación y floculación.
- Disminuye la formación de emulsiones al controlar el paso de todo el caudal por el sistema de bombeo.
- Evita la corrosión en equipos al presurizar una parte del agua tratada.

El esquema del sistema de flotación por aire disuelto donde una parte del efluente tratado es presurizado, se presenta en la Figura 1.6.

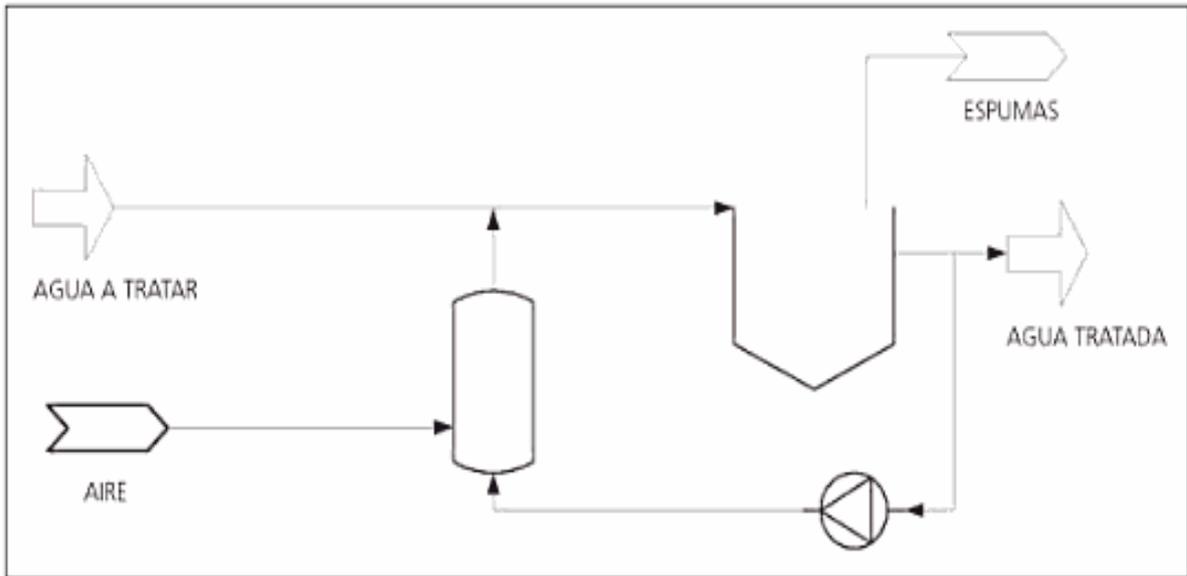


Figura 1.6. Esquema del sistema de flotación por aire disuelto con presurización de la recirculación
(Sainz, 2005, p. 151)

1.2.2.3 Fundamentos teóricos

Solubilidad

Según la Ley de Henry, la cantidad de gas disuelto en un líquido, a temperatura constante, es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce el gas sobre el líquido. (Nalco, 1989, p.14). La solubilidad del gas aumenta con el incremento de la presión parcial y disminuye con el aumento de la temperatura. Tomando en cuenta la variación de la solubilidad del aire en agua con la presión atmosférica, sus valores corregidos a las condiciones locales (Quito), se representan por la Ecuación [1.1].

$$C' = C * \frac{P' - P_V}{760 - P_V} \quad [1.1]$$

Donde:

C' : solubilidad del aire en agua, a la presión absoluta P' (mL aire/L de agua)

C : solubilidad del aire en agua, a presión de una atmosfera (mL aire/L de agua)

P' : presión absoluta del aire (mmHg)

P_V : presión de vapor del agua (mmHg)

La solubilidad del aire a presión atmosférica, frecuentemente se expresa en términos de (mL aire)/ (L de agua), y varía de acuerdo a las diferentes temperaturas, como se presenta en la Tabla [1.3].

Tabla 1.3 Solubilidad de saturación del aire en agua a una atmósfera

Temperatura °C	Solubilidad, C <i>ml aire</i> <i>L de agua</i>
0	29,2
5	25,7
10	22,8
15	20,6
20	18,7
25	17,1
30	15,7

(Romero, 2000, p. 351)

Cantidad de aire liberado

Al reducir la presión atmosférica, la cantidad de aire liberado, se mide a partir de la diferencia de solubilidades, calculadas según la Ecuación [1.2].

$$C_T - C_L = C * \frac{f * P_T - P_V - P_L - P_V}{760 - P_V} \quad [1.2]$$

Donde:

C_T : solubilidad de saturación del aire a la presión de operación del tanque (mL de aire /L de agua)

C_L : solubilidad de saturación del aire, a la presión atmosférica (mL aire /L)

P_T : presión de operación del tanque (mmHg)

P_L : presión local atmosférica (mmHg)

P_V : presión de vapor de agua a la temperatura de ensayo (mmHg)

C : solubilidad de saturación del aire, a una atmósfera de presión (mL aire /L de agua)

f : fracción de saturación, alcanzada en el tanque de presurización, generalmente 0,5-0,8.

El valor de la fracción de saturación (f) es función del diseño de cada sistema y de las condiciones de mezcla que se presentan en el tanque de presión.

Relación A/S

La eficiencia de un sistema de flotación por aire disuelto depende principalmente del valor de la relación entre la cantidad de aire liberado y la de sólidos requeridos, para lograr un determinado grado de clarificación. El valor del parámetro A/S varía con cada tipo de agua y se puede determinar experimentalmente utilizando un equipo a escala laboratorio. Para el diseño de unidades de flotación por aire disuelto, con aguas residuales crudas, generalmente el valor de la relación A/S varía entre 0,01 a 0,20. En plantas de aguas mezcladas, domésticas-industriales se utilizan valores de 0,03 a 0,05, para lograr una máxima remoción de carga contaminante. Cuando se utiliza la flotación por aire disuelto para espesamiento de lodos, el valor A/S oscila entre 0,005 a 0,060. La recirculación del efluente, permite obtener una relación de A/S óptima

para la separación efectiva de los contaminantes. (Romero, 2000, p. 354). La relación adimensional de aire/sólidos se obtiene a partir de la división de la Ecuación [1.2] por la concentración de sólidos suspendidos y para sistemas sin recirculación se calcula a partir de la Ecuación [1.3]

Sin recirculación

$$\frac{A}{S} = \frac{C * d * f * P_T - P_V - P_L - P_V}{S_o * 760 - P_V} \quad [1.3]$$

$$\frac{A}{S} = \frac{\frac{mg}{L} \text{ de aire liberado por la despresurización}}{\frac{mg}{L} \text{ de sólidos en el efluente}}$$

Donde:

A/S : relación adimensional aire/sólido

C : solubilidad de saturación del aire a una atmósfera (mL/L)

d : densidad de aire a las condiciones del problema (mg/mL)

f : fracción de aire disuelto a la presión absoluta de operación, generalmente 0,5

P_T : presión absoluta de operación (mmHg)

P_V : presión de vapor del agua a la temperatura de operación (mmHg)

P_L : presión local atmosférica (mmHg)

S_o : concentración de sólidos suspendidos del afluente (mg/mL)

Con recirculación

El parámetro A/S para sistemas que tienen recirculación se calcula a partir de la Ecuación [1.4].

$$\frac{A}{S} = \frac{C * d * Q_R * f * P_T - P_V - P_L - P_V}{S_o * Q * 760 - P_V} \quad [1.4]$$

Donde:

$\frac{A}{S}$: relación adimensional aire/sólido

C : solubilidad de saturación del aire a una atmósfera (mL/L)

d : densidad de aire a las condiciones del problema (mg/mL)

f : fracción de aire disuelto a la presión absoluta de operación

P_T : presión absoluta de operación (mmHg)

P_V : presión de vapor del agua a la temperatura de operación (mmHg)

P_L : presión local atmosférica (mmHg)

S_o : concentración de sólidos suspendidos del afluente (mg/mL)

Q_R : caudal recirculado presurizado (L/s)

Q : caudal de ingreso al sistema de flotación (L/s)

Para un afluente específico, el valor de S_o es fijo. La relación A/S aumenta, al incrementar el aire liberado por la despresurización operando a presiones altas, para de esta manera obtener un efluente de mejor calidad. (Ramalho, 1996, p.149).

1.2.2.4 Mecanismos de contacto

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en el sistema de flotación por aire disuelto, depende de la estructura y de las propiedades superficiales de las partículas. El mecanismo dominante, en el contacto entre partículas y aire, depende del tamaño de las burbujas, de la tensión superficial entre gas y sólido, y de las características de las partículas como densidad, carga eléctrica, diámetro y área superficial. (Romero, 2000, p.354).

En la Figura 1.7, se puede visualizar los tres mecanismos de contacto partícula-gas que ocurren en un sistema de flotación por aire disuelto. (Wang, L. Fahey, E. y Wu, Z, 2005. p. 434)

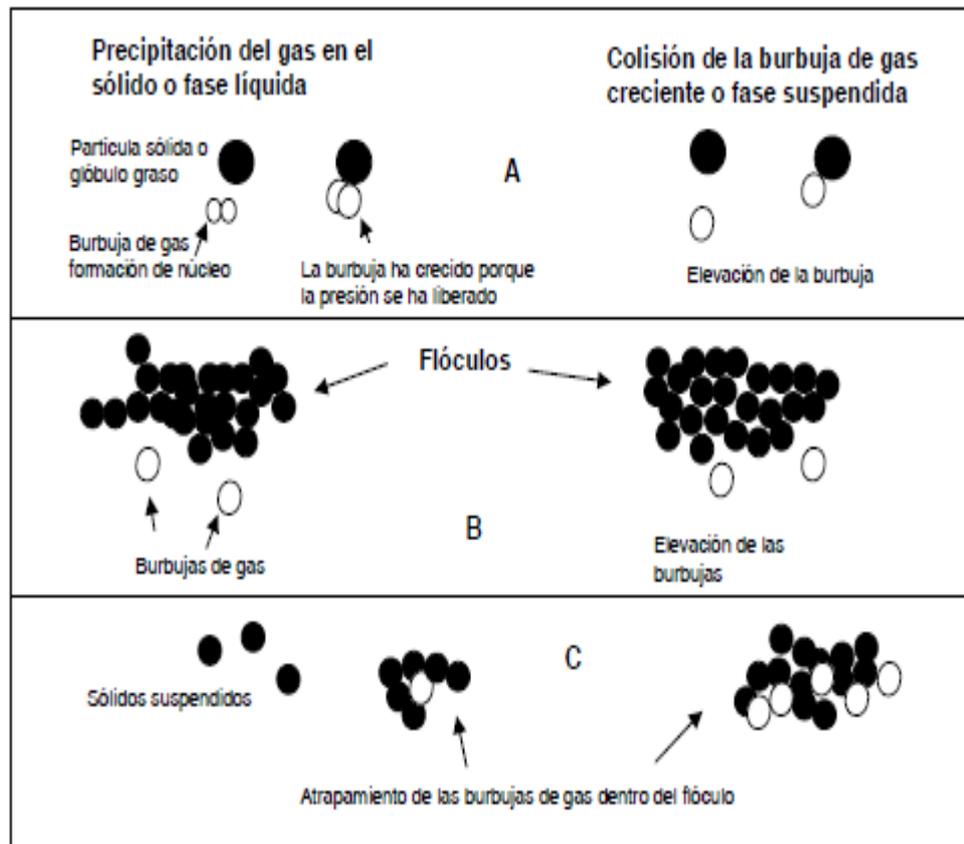


Figura 1.7. Mecanismos de contacto entre las burbujas y las partículas de suspensión en el sistema FAD
(Casas, F, 2009, p.22)

- A.** Adherencia de una burbuja ascendente de gas a un líquido en suspensión a una fase sólida.
- B.** Unión de las burbujas de gas en la estructura del flóculo cuando se elevan.
- C.** Absorción y adsorción de las burbujas de gas en la estructura del flóculo, cuando se forma la estructura. (Hendricks, 2006, p. 236)

1.2.2.5 Parámetros de diseño

Entre los parámetros de diseño más relevantes que influyen en la eficiencia de un sistema de FAD incluyen: carga hidráulica, tamaño de burbuja, velocidad ascensional de las burbujas y coagulación-floculación.

Coagulación-Floculación

La coagulación y floculación son los mecanismos que permiten la remoción de partículas en suspensión y materiales coloidales presentes en agua residual mediante el proceso de flotación. Los productos químicos usados como coagulantes tienen dos papeles en la flotación: (1) producir partículas floculares con reducida carga superficial y (2) producir partículas floculares que sean hidrofóbicas. (American Water Works, 2002, p. 430).

Carga superficial

La razón de carga superficial es una medida del volumen del afluente aplicado por unidad de área superficial y unidad de tiempo, ($m^3/m^2 \cdot h$). Cuando la carga hidráulica, es superior a $15 m^3/m^2 \cdot h$ se pueden originar turbulencias que afectan a la capa de lodos flotantes y disminuyen la eficiencia del sistema FAD. (Lehman, 2000, p. 168).

Tamaño de burbuja

Un sistema de flotación por aire disuelto tiene alta eficiencia cuando produce suficientes burbujas de aire que permiten la flotación de todos los sólidos suspendidos presentes en el agua residual. Cuanto más pequeña sea la burbuja de aire que puedan producirse, mayor será el número de burbujas producidas por unidad de volumen de gas desprendido. La presencia de un gran número de

burbujas incrementa la posibilidad de agregación de burbuja-flóculo en suspensiones floculares bastante diluidas. El tamaño de burbuja está controlado principalmente por la diferencia de presión a través del sistema de inyección y por el tipo de válvula de inyección, como se observa en la Figura 1.8.

En la práctica el tamaño de la burbuja producida en un sistema de FAD está en el rango de 10-120 μm , con un tamaño medio de aproximadamente 40-50 μm . (American Water Works, 2002, p. 419).

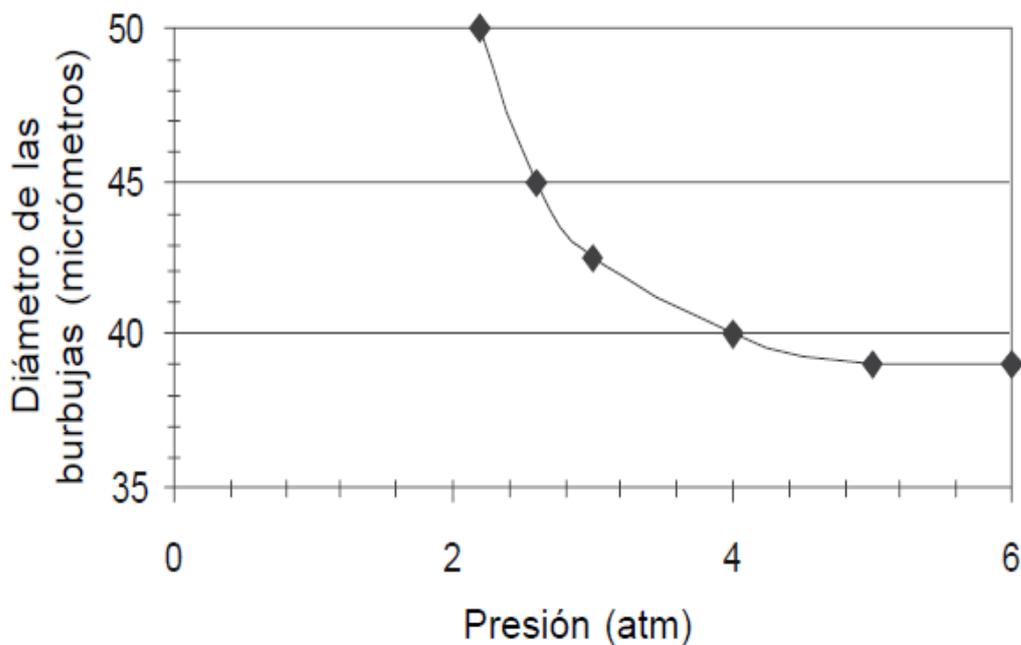


Figura 1.8. Influencia de la presión en el diámetro de las burbujas de aire generadas en el sistema FAD
(Vargas, 2004, p.383)

Velocidad ascensional de la burbuja

La velocidad ascensional de la burbuja depende su tamaño en el agua residual, como se observa en la Figura [A1.1] del Anexo I. Para conseguir el máximo de colisión y agregación entre burbujas de aire y partículas, la burbuja debe ascender en condiciones de flujo laminar, con el propósito de evitar el desbordamiento de los flóculos como puede ocurrir en el régimen turbulento. El máximo diámetro de burbuja para flujo laminar es de 130 μm , para tamaños de burbujas menores de

130 μm , la velocidad ascensional de las burbujas de aire se puede calcular a partir de la Ley de Stokes. Cuanto más pequeño sea el tamaño de la burbuja, menor será la velocidad ascensional de la misma. Consiguientemente, se requiere un mayor tanque de flotación para permitir a las burbujas alcanzar la superficie del tanque de flotación. (American Water Works, 2002, p. 419). El tiempo de retención depende principalmente de la velocidad ascensional de las burbujas, y se considera un factor crítico que afecta directamente el dimensionamiento de los tanques de flotación y presión. (Nemerow y Dasgupta, 1998, p. 137)

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA DEL EFLUENTE PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EL ORDEÑO Y LA CORPABE

2.1.1 MUESTREO COMPUESTO

La caracterización de la mezcla del efluente líquido de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe se realizó mediante un muestreo durante tres días de operación de la planta (lunes, miércoles y viernes) en un periodo de 16 horas, aforando y tomando muestras cada intervalo de hora. El muestreo compuesto consistió en la combinación de muestras puntuales tomadas en el sitio de descarga del efluente final, durante diferentes tiempos, que luego fueron mezcladas extrayendo de cada una el volumen correspondiente (alícuota). (BID y ANDI, 1997, p.9).

Se tomaron muestras puntuales de 10 L en el tanque de descarga del efluente final. El volumen de la alícuota para componer la muestra compuesta se calculó a partir de la Ecuación [2.1].

$$V_i = \frac{V}{n * Q_p} * Q_i \quad [2.1]$$

Donde:

V_i : volumen de cada alícuota (L)

V : volumen total a componer (L)

n : número de muestras tomadas

Q_p : caudal promedio durante la jornada de aforo (L/s)

Q_i : caudal instantáneo en cada medición (L/s)

Para determinar la medida del caudal en el sitio de descarga, se midió el tiempo transcurrido desde que se introdujo el recipiente en el sitio de aforo hasta que se retiró, la relación de estos valores permitió conocer el caudal en ese instante de tiempo. Durante la medida del caudal se utilizaron los siguientes materiales:

- Cronómetro
- Recipiente plástico de 10 L de capacidad

El caudal se calculó a partir de la Ecuación [2.2]

$$Q = \frac{V}{t} \quad [2.2]$$

Donde:

Q : caudal (L/s)

V : volumen (L)

t : tiempo (s)

2.1.2 MEDICIÓN DE PARAMETROS EN SITU

La medición de parámetros en situ consistió en la determinación de la temperatura y pH de las muestras puntuales cada intervalo de tiempo durante el periodo establecido (16 horas).

Los materiales utilizados para la medida de los parámetros descritos fueron los siguientes:

- Vaso de precipitación de 500 mL
- Termómetro B & C GERMANY, 1 ° C
- pHmetro digital LUTRON

2.1.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS EN LABORATORIO

Una vez recolectada la muestra compuesta durante un día de operación, se realizó el respectivo análisis de los parámetros en el Laboratorio de la empresa WASCORP S.A. El manejo, conservación, transporte y recepción de las muestras compuestas se rigió con base en la Norma NTN INEN 2 169:98: “*Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y Conservación de muestras*”. Los parámetros analizados para la caracterización del efluente muestreado fueron DQO, DBO₅, aceites y grasas, sólidos totales (ST), sólidos sedimentables (SS) y sólidos suspendidos totales (SST) de acuerdo al método APHA. La caracterización del agua residual de la Industria Láctea permitirá determinar si los parámetros medidos cumplen con la Norma Ambiental Vigente para descargas a un receptor de agua dulce (río).

2.1.3.1 Determinación de Aceites y Grasas

La medida del parámetro Aceites y Grasas se basó en el método APHA 5520 B. El procedimiento seguido se presenta en el Anexo II. Se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- Embudo de Separación de 500 mL
- Vasos de precipitación de 250 y 500 mL
- Balón aforado de 50 mL
- Pipeta volumétrica de 10 mL y 25 mL
- Probeta graduada de 250 mL
- Balón Tarado
- Piceta
- Etiquetas de identificación
- Balón del rota vapor
- Rota vapor BUCHI 461 Water Batch, 100 ° C
- Balanza Analítica KERN ABS/ABJ, 220 g, 0,1 mg
- Ácido Sulfúrico, 98%, Mallinckrodt CHrom AR.HPLC

- Hexano, 100%, J.T BAKEP
- Agua destilada

2.1.3.2 Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

El parámetro Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) se basó en el método APHA 5210 B. El procedimiento seguido se presenta en el Anexo III. Se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- Pipeta volumétrica de 10 mL
- Vaso de precipitación de 500 mL
- Piceta
- Frascos oscuros
- Termostato
- Inhibidor de Bacterias Nitrificante.
- Hidróxido de Potasio
- Agua destilada

2.1.3.3 Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La determinación de DQO en la muestra se basó en el método 5210 B. El procedimiento seguido se presenta en el Anexo IV. Los equipos y materiales utilizados fueron:

- Pipeta volumétrica de 10 mL
- Vaso de precipitación de 250 mL
- Viales de reactivo de DQO
- Piceta
- Espectrofotómetro HACH DR 2800
- Reactor DQO HACH, 150 °C

- Agua destilada
- Etiquetas de Identificación

2.1.3.4 Determinación de Sólidos Totales (ST)

El análisis del parámetro sólidos totales en el laboratorio de la empresa WASCORP se basó en el método APHA 2540 B. El procedimiento seguido se presenta en el Anexo V. Se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- Vaso de precipitación de 250 mL
- Pinza
- Piceta
- Tripode
- Crisol
- Desecador
- Estufa QL Quincy Lab INC, 260 ° C, 500 ° F
- Baño Termostático FULLGAUGE MT 543R, 250 °C, 1 °C
- Balanza Analítica KERN ABS/ABJ, 220 g, 0,1 mg

2.1.3.5 Determinación de Sólidos Sedimentables (SS)

La determinación de Sólidos Sedimentables en la muestra se basó en el método APHA 2540 F. El procedimiento seguido se presenta en el Anexo VI. Se utilizaron los siguientes materiales:

- Vaso de Precipitación de 250 mL
- Varilla de agitación
- Cono Inhoff, 1 L
- Porta conos
- Piceta

2.1.3.6 Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

La medida de Sólidos Suspendidos Totales se basó en la diferencia entre los sólidos totales y sólidos disueltos determinados en la muestra. Los sólidos suspendidos totales se calcularon a partir de la Ecuación [2.3]. Los sólidos disueltos se presentan en el Anexo VII.

$$SST = ST - SS \quad [2.3]$$

Donde:

SST: sólidos suspendidos totales (mg/L)

ST: sólidos Totales (mg/L)

SS: sólidos suspendidos (mg/L)

2.2 EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (FAD) CONSTRUIDO A NIVEL LABORATORIO

La eficiencia de un sistema de flotación por aire disuelto depende principalmente de la presión de operación, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico, condiciones determinadas en el equipo de FAD construido a escala laboratorio. A continuación se detalla su construcción y funcionamiento que permitieron determinar los criterios y condiciones óptimas requeridas para el diseño del sistema a escala industrial.

2.2.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

El sistema a escala laboratorio se construyó con base a datos bibliográficos y con el auspicio de la empresa WASCORP S.A. Básicamente se construyeron dos elementos del sistema: cámara de presión y tanque de flotación, cuyo esquema

se muestra en la Figura 2.1. El tercer elemento que comprende el sistema fue un compresor.

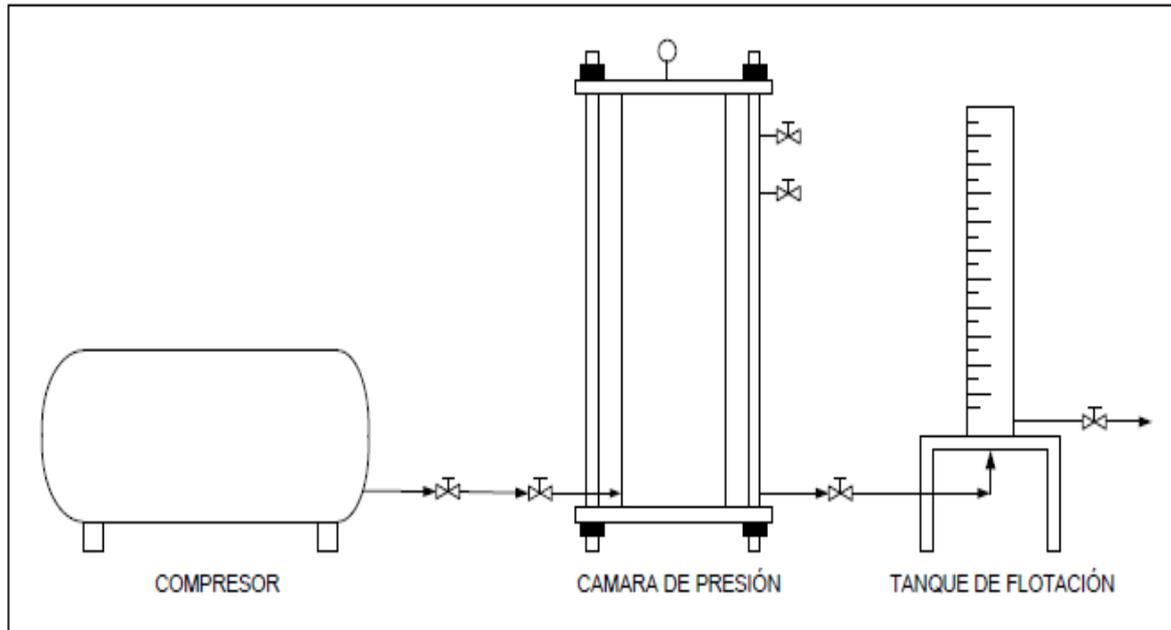


Figura 2.1. Esquema del sistema de flotación por aire disuelto construido a escala laboratorio

2.2.1.1 Cámara de saturación

Para la construcción de la cámara de saturación se utilizaron los siguientes materiales:

- Tubería de PVC de presión
- Válvulas: compuerta
- Manómetro HAYWARD, 60 psi
- Accesorios: codos, T, universal, tuberías, reducciones
- Varillas de hierro
- Discos de hierro fundido
- Difusor

2.2.1.2 Tanque de Flotación

Los materiales utilizados para la construcción del tanque de flotación fueron los siguientes:

- Probeta graduada de 2000 mL
- Base de acero
- Difusor de PVC

2.2.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El procedimiento para tratar el efluente en el sistema FAD construido a escala laboratorio para las respectivas pruebas fue el siguiente:

- Previamente a la operación del sistema, en la cámara de saturación se vertió agua hasta los $\frac{3}{4}$ de su capacidad.
- Una vez cerradas las válvulas de entrada y salida de la cámara, se accionó el compresor, el cual al aplicar aire comprimido en la cámara, permitió alcanzar la presión de ensayo requerida. Esta presión se mantuvo durante el tiempo de saturación escogida.
- El exceso de aire se liberó por medio de una válvula instalada en la parte superior de la cámara.
- Simultáneamente a la saturación, en el tanque de flotación se colocó un volumen determinado del efluente, en donde una vez transcurrido el tiempo de saturación, se liberó un volumen del líquido procedente de la cámara de saturación.
- El volumen liberado se determinó según la relación de caudales establecidos.
- Una vez completa la flotación por aire disuelto, se tomó una muestra del efluente clarificado por la parte inferior del tanque de flotación.
- La muestra recolectada se analizó inmediatamente en el laboratorio de la empresa WASCORP S.A.

- Los parámetros medidos en cada muestra al inicio y al final fueron DQO, DBO₅, aceites y grasas, sólidos totales (ST), sólidos sedimentables (SS) y sólidos suspendidos totales (SST) de acuerdo al método APHA.

2.3 DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DE PRESIÓN DE SATURACIÓN, PORCENTAJE DE RECIRCULACIÓN Y DOSIS DE COAGULANTE DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (F.A.D) PARA DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE DE ACEITES Y GRASAS, DQO, DBO₅, SÓLIDOS TOTALES (ST), SÓLIDOS SEDIMENTABLES (SS) Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Las mejores condiciones de presión de saturación, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico del sistema de flotación por aire disuelto se determinaron mediante el análisis en dos etapas.

2.3.1 PRIMERA ETAPA

Para la primera etapa, sin adición de coagulante químico (poli cloruro de aluminio) se desarrolló un diseño experimental con un total de 12 tratamientos. Se trabajó con dos variables a cuatro niveles cada uno: presión: 30, 40, 50 y 60 psi, y porcentaje de reciclo: 30, 40, 50 y 60 %, valores seleccionados con base en las condiciones usuales de operación de los equipos de flotación por aire disuelto. Cada experimento se realizó una sola vez y en cada caso se midieron los parámetros DQO, DBO₅, aceites y grasas, sólidos totales, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales, según el método APHA para cada parámetro. Se seleccionó el porcentaje de reciclo que presenta el mayor porcentaje en la disminución de los contaminantes.

2.3.2 SEGUNDA ETAPA

2.3.2.1 Dosis de coagulante químico

La dosis de coagulante químico para disminuir la carga contaminante del efluente se determinó mediante la prueba de jarras. Se trabajó en un rango entre 30-50 mg/L, valores seleccionados con base en las condiciones usuales de operación de los equipos de flotación por aire disuelto. Se determinó la dosis óptima y se procedió a tratar el efluente en el equipo de flotación por aire disuelto, manteniendo un porcentaje de recirculación constante determinado en la primera etapa y variando la presión de saturación en el rango establecido (30-60) psi. Se analizaron los parámetros establecidos al final de cada prueba: aceites y grasas, DQO, DBO₅, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos sedimentables. Se realizaron tres repeticiones de la prueba para disminuir el error y estimar datos correctos sobre el efecto de la presión de operación, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante en la disminución de los contaminantes analizados en el efluente.

2.3.2.2 Prueba de jarras

La prueba de jarras permitió determinar la dosis óptima de coagulante químico (poli cloruro de aluminio) requerido para efectuar la segunda etapa. El procedimiento seguido se presenta en el Anexo VIII. Se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- Equipo de jarras PHIPPS & BIRDINC, serie N° 3105, 100 RPM
- Espectrofotómetro HACH DR 2800
- pHmetro digital LUTRON
- Vasos de precipitación de 500 mL
- Erlenmeyer de 250 mL
- Pipeta volumétrica de 10 mL
- Turbidímetro Portátil HACH 2100
- Poli cloruro de aluminio, 100%, WASCORP S.A

- Polímero floculante, 100%, WASCORP S.A

2.3.2.4 Parámetro A/S

Un parámetro fundamental en el diseño de unidades de flotación por aire disuelto es la relación A/S expresada como (mg/L de aire liberado por la despresurización / mg/ L de sólidos en el efluente), la misma que para tratamiento de efluentes industriales se encuentra en un rango de 0.01-0.2. La relación A/S en cada etapa se determinó a partir de la Ecuación [1.6] del apartado 1.2.2.3.

2.4 DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE APLICACIÓN DE OTROS PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS AL SISTEMA D.A.F PARA DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE DE ACEITES Y GRASAS, DQO, DBO₅, (ST), (SDT), (SST)

2.4.1 NEUTRALIZACIÓN

Para mejorar la eficiencia del tratamiento del agua residual, se experimentó la necesidad de incorporar al sistema un proceso de neutralización con sosa caustica al efluente antes del ingreso al sistema. Se trabajó en un rango de pH de 7-9 y se estableció el rango óptimo con los mejores resultados obtenidos en la prueba de jarras. Se trató el efluente con las mejores condiciones de presión de saturación, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico seleccionados.

La neutralización consistió en el ajuste del pH del efluente a tratar con sosa cáustica. Se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- pH metro digital LUTRON
- Vaso de precipitación de 500 mL
- Agitador de vidrio

- Pipeta volumétrica de 10 mL
- Pera
- Sosa cáustica

2.4.2 FILTRACIÓN

Se determinó la necesidad de aplicación de un proceso de filtración en dos tipos de filtros a escala laboratorio, el primero de carbón activado y el segundo de zeolita, llevadas a cabo una vez concluida la prueba en el equipo de flotación por aire disuelto. El filtro seleccionado correspondió al filtro con el que fue posible disminuir aún más la carga contaminante del efluente.

Se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- Filtro de zeolita
- Filtro de carbón activado
- Vasos de precipitación de 500 mL
- Embudo plástico

2.5 DISEÑO DE UN SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (F.A.D) PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EL ORDEÑO Y LA CORPABE

El sistema de flotación por aire disuelto como tratamiento del agua residual de la Industria Láctea que consta de un tanque de flotación, un tanque de presurización, una bomba de recirculación y una válvula reductora de presión se diseñó para un caudal de 500 m³/día. Con base en los resultados obtenidos experimentalmente en el equipo a escala laboratorio y a través de ecuaciones empíricas se calculó el dimensionamiento de los equipos y los parámetros más

importantes del sistema. Para el dimensionamiento de los mismos se consideró un factor de seguridad de 1.35. (Crites y Tchobanoglous, 2002, p. 229).

La bomba de recirculación y la válvula reductora de presión se seleccionaron con base al caudal que ingresa al tanque de presurización, sus características fueron proporcionadas por empresas proveedoras de dichos equipos. Las condiciones obtenidas experimentalmente fueron las siguientes:

- Presión de operación
- Porcentaje de reciclo
- Dosis de coagulante químico.

2.5.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA

Los parámetros de diseño más importantes del sistema FAD calculados a partir de las condiciones óptimas de operación y que se detallan en el Anexo IX fueron:

- Caudal recirculado presurizado
- Solubilidad del aire
- Cantidad de aire liberado
- Relación aire/sólidos (A/S)
- Cantidad de lodo producido
- Cantidad de coagulante dosificado

2.5.2 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE DE FLOTACIÓN

Con base a las condiciones óptimas de operación y criterios de diseño como el tiempo de retención y factor de seguridad se calculó el volumen, largo, ancho y altura del tanque de flotación. Los respectivos cálculos se detallan en el Anexo XI.

2.5.3 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE DE PRESURIZACIÓN

Las dimensiones del tanque de presurización como volumen, altura y ancho se calcularon con base a los criterios asumidos y condiciones requeridas para lograr la saturación de la mezcla. Los cálculos respectivos se detallan en el Anexo XII.

2.6 ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

El análisis económico del presente proyecto se enfocó en la determinación del costo para la implementación y operación del sistema de flotación por aire disuelto para un caudal de agua residual de 500 m³/día generados en la Industria Láctea El Ordeño y Corpabe.

2.6.1 COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

Para este análisis se consideró el costo de equipos, materiales, instalación y, de ingeniería vigentes en el mercado. El costo de equipos y materiales se obtuvo por medio de cotizaciones a empresas proveedoras.

1. Equipos

- Tanque rectangular (DAF)
- Compresor
- Bomba de Recirculación
- Tanque de presurización
- Sistema de recolección de Lodos (Cadena Giratoria)
- Sistema de mezcla rápida (Difusores)
- Bombas dosificadoras
- Escaleras

2. Materiales

- Tuberías
- Válvulas
- Accesorios
- Manómetros
- Controles

3. Ingeniería y diseño

4. Instalación y puesta en marcha

2.6.2 COSTO DE OPERACIÓN

Se analizó el costo de operación del sistema propuesto con la finalidad de establecer el costo de m³ de agua tratada.

Para establecer el costo se consideró:

- Caudal de ingreso al sistema (m³/día)
- Dosis de Coagulante (kg)
- Salario Operador
- Mantenimiento y Servicio Públicos

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS DEL MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA DEL EFLUENTE PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EL ORDEÑO Y LA CORPABE

3.1.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS EN SITU

La medición de los parámetros en situ se realizó con el fin de conocer las características del efluente generado por la Industria Láctea, ya que actualmente no cuentan con una planta para el tratamiento de sus aguas residuales. Los efluentes generados son recolectados en un tanque de almacenamiento para luego ser descargados a un cauce de agua dulce.

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos de la medida de los parámetros en situ durante los tres días de muestreo compuesto.

Tabla 3.1. Resultados de la medida de pH, temperatura y caudal del efluente muestreado durante los tres días de operación de la Industria Láctea

Parámetro	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Caudal	L/s	4,67	3,92	4,23	4,27
Temperatura	°C	29,38	29,25	29,12	29,25
pH	-	6,14	5,87	5,92	5,98

La Tabla 3.1 detalla los valores promedios de cada muestra como caudal, pH y temperatura durante cada hora en un día de operación de la planta. La muestra 1 corresponde al promedio de datos recopilados durante el muestreo compuesto el día Lunes, la muestra 2 al día miércoles y la muestra 3 al día viernes. El valor promedio del caudal durante el muestreo es de 4,27 L/s. La medida de este parámetro es un factor crítico para el dimensionamiento de los equipos que conforman el tratamiento propuesto. El valor de pH en las tres muestras presenta poca variación, con un valor promedio de 5,98. El control de pH es trascendental

ya que valores extremos, provocados por el uso de ácido y sosa en los procesos de limpieza y desinfección, disminuyen la eficiencia de los productos químicos. El valor recomendado para la acción efectiva de los mismos, se encuentra comprendido entre 7 y 9. La temperatura medida presenta un valor promedio de 29,25 °C. Igualmente, el control de este parámetro influye en la eficiencia de la solubilidad del aire en agua.

3.1.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS EN LABORATORIO

La Tabla 3.2 presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica en el Laboratorio de la empresa WASCORP S.A, determinada en las muestras del efluente de la Industria Láctea obtenidas en los tres muestreos compuestos.

Tabla 3.2. Resultados de la caracterización fisicoquímica de los tres días de muestreo compuesto

Parámetro	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	*Límite máximo permisible
Aceites y grasas	mg/L	716,67	653,34	706,67	692,23	0,3
Sólidos totales	mg/L	2300	2120	2450	2290	1600
Sólidos suspendidos totales	mg/L	320	275	284	293	100
Sólidos sedimentables	mL/L	12	8	10	10	1
DQO	mg O ₂ /L	8100	6350	7150	7200	250
DBO ₅	mg O ₂ /L	4150	2750	3150	3350	100

*(Ministerio del Ambiente, 2005, p. 42-43)

Como se puede observar en la Tabla 3.2, los valores medidos en la caracterización del efluente no se encuentran dentro del rango del límite máximo permisible para descargas a un receptor de agua dulce establecido por la Norma Ambiental vigente TULSMA, debido a que el agua residual posee una elevada carga orgánica, compuesta por carbohidratos, proteínas y lípidos.

El parámetro con mayor carga contaminante, corresponde a aceites y grasas con un valor promedio de 692,23 mg/L, los mismos que son considerados compuestos difíciles de tratar por tratamientos convencionales. La concentración de la carga orgánica es muy elevada, lo que se refleja en los altos valores de DQO y DBO₅, con valores de 7200 y 3350 mg/L respectivamente. La gran cantidad de sólidos suspendidos totales están directamente relacionados con el color blanquecino y elevada turbidez que presenta el agua residual con un valor promedio de 293 mg/L.

Las características descritas son las que explican por qué se optó por estudiar el proceso de flotación por aire disuelto como una opción de tratamiento primario para disminuir la concentración de las cargas contaminantes; ya que el tratamiento propuesto es altamente eficiente para eliminar los sólidos suspendidos de menor densidad que el agua, no eliminables a través de un proceso de decantación y aceites y grasas no eliminables en los sistemas de separación tradicionales (separadores API).

3.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (F.A.D) CONSTRUIDO A NIVEL LABORATORIO

3.2.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de flotación por aire disuelto se construyó dentro de las posibilidades técnico-económicas, a base de materiales adecuados para la técnica constructiva del equipo a escala laboratorio. Se consideró su fácil obtención en el mercado así como también su distinta naturaleza.

3.2.1.1 Cámara de saturación

La cámara de saturación comprende un tanque cerrado construido en material capaz de resistir altas presiones, con la finalidad de permitir la disolución del aire en el agua. Las dimensiones y características de la cámara se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Dimensiones de la cámara de saturación

Dimensiones	Unidad	Valor
Diámetro	m	0,20
Altura	m	0,80
Espesor	mm	8
Material	-	PVC
Capacidad	L	16,65
Presión de trabajo	psi	0-60

La Figura 3.1 permite apreciar la cámara de saturación construida a escala laboratorio con el auspicio de la empresa WASCORP S.A.



Figura 3.1. Cámara de Saturación

Como se observa en la Figura 3.1, la cámara de saturación constituye un tubo de PVC de presión, cuyo diámetro interno es 0.20 m, con una altura de 0,80 m y 8 mm de espesor. Sus extremos superior e inferior están cerrados con discos de hierro, los cuales son colocados con un empaque de caucho flexible de 15 mm de espesor para obtener un cierre hermético. Estas tapas, además se encuentran sujetas en sus extremos mediante soportes asegurados por cuatro varillas de hierro, para evitar que la presión interna de la cámara ocasione el desprendimiento de las mismas. El difusor de la cámara consta de un tubo de PVC perforado, cerrado en su extremo por un tapón del mismo material. El sistema encargado del control de entrada y salida de aire está compuesta por dos válvulas de compuerta de ½ pulgada, las mismas que por su estructura permiten una regulación exacta de la cantidad de aire que ingresa y sale de la cámara, logrando una estabilización de una determinada presión en el interior de la misma. El exceso de presión suministrado por el compresor es controlado por una válvula de alivio de ½ pulgada ubicada en la parte lateral. El manómetro colocado en la parte superior de la cámara permite controlar la presión requerida en el interior del tanque. Por último, la cámara es pintada exterior e interiormente con pintura anticorrosiva, con el fin de evitar problemas de corrosión durante la realización de las respectivas pruebas. Las conexiones entre los elementos del equipo, constituyen accesorios de hierro galvanizado y PVC tales como: codos, reducciones, T, universal y tubos cortos de acoplamiento.

3.2.1.2 Tanque de Flotación

En el tanque de flotación se produce la formación de micro burbujas generadas por la despresurización del agua desde de la cámara de saturación y por consecuencia la separación de los contaminantes presentes en el agua residual.

La Tabla 3.4 indica las respectivas dimensiones y características del tanque de flotación para las respectivas pruebas en laboratorio.

Tabla 3.4. Dimensiones del Tanque de flotación

Dimensiones	Unidad	Valor
Diámetro	m	0,07
Altura	m	0,60
Material	-	PVC
Capacidad	L	2

El tanque de flotación a escala laboratorio constituye una probeta de plástico soportado en una base de acero con una capacidad de 2 L, como se observa en la Figura 3.2. La altura de la celda es de 0.60 m con un diámetro interno de 0.07 m. Tiene una válvula de compuerta que permite que el líquido proveniente de la cámara de presión ingrese de manera constante por la parte inferior, mientras que la válvula instalada en la parte lateral permite tomar las muestras clarificadas para el respectivo análisis de los contaminantes en el Laboratorio. Además, cuenta con un difusor de tubo corto de PVC perforado, instalado en su interior para la distribución uniforme del agua saturada.

**Figura 3.2.** Tanque de Flotación

3.2.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

La eficiencia de la unidad FAD básicamente depende del acoplamiento de los tres elementos que conforman el sistema: cámara de saturación, tanque de flotación y compresor, como lo indica la Figura 3.3.



Figura 3.3. Sistema de flotación por aire disuelto a escala laboratorio

Durante el procedimiento de cada prueba se observó que el equipo funcionaba de manera correcta, al presentar una separación efectiva de los contaminantes del agua residual, en la parte superior una capa de lodo y en la parte inferior agua clarificada. También se pudo observar que la posición relativa de la válvula de compuerta, que permite la salida del agua saturada hacia la celda de flotación, resultó de fundamental importancia para evitar la existencia de zonas de alta saturación que generan burbujas de gran tamaño que afectan el rendimiento del FAD en la remoción de los contaminantes, en efecto un tamaño y distribución ideal se obtuvo solamente cuando ésta se instaló muy cerca a la celda de

flotación. Se determinó que el tiempo de detención del líquido en el tanque de flotación es aproximadamente 10 minutos, ya que transcurrido este tiempo la liberación del aire en el tanque se habría cumplido en su totalidad. De igual manera, para la saturación de la mezcla se determinó un tiempo de detención de 15 minutos. Los parámetros descritos se fijaron como constantes para la realización de las respectivas pruebas.

La Figura 3.4 presenta el efluente resultante tratado en el equipo FAD. Se observa que el agua residual tiene un alto grado de clarificación al lograr disminuir los porcentajes de remoción de los contaminantes.

Por lo tanto, el sistema a escala laboratorio se considera factible para determinar criterios y condiciones óptimas necesarias para el dimensionamiento de los equipos del sistema FAD a escala industrial.

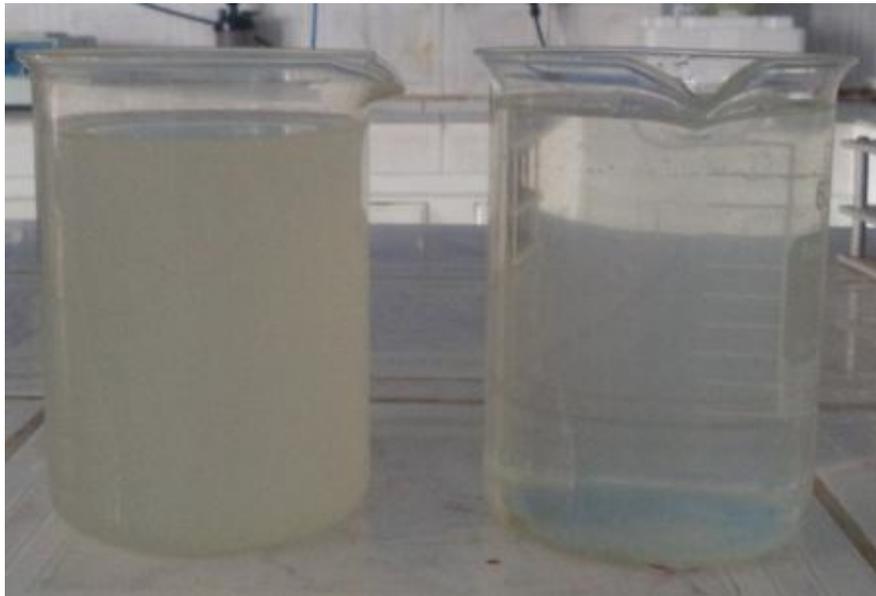


Figura 3.4. Agua clarificada después del tratamiento en el equipo FAD

3.3 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DE PRESIÓN DE SATURACIÓN, PORCENTAJE DE RECIRCULACIÓN Y DOSIS DE COAGULANTE DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (F.A.D) PARA DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE DE ACEITES Y GRASAS, DQO, DBO₅, SÓLIDOS TOTALES (ST), SÓLIDOS SEDIMENTABLES (SS) Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

3.3.1 PRIMERA ETAPA

3.3.1.1 Estudio de la influencia de la presión de operación y porcentaje de recirculación

Inicialmente, se estudió la influencia de la presión de trabajo y porcentaje de reciclo en el sistema de flotación por aire disuelto, sin la adición de coagulante químico. En esta primera etapa se trabajó con valores de presión entre 30-60 psi y valores de reciclo de 30-60 %.

La Figura 3.5 muestra la remoción del DQO con respecto a la variación de la presión de trabajo y porcentaje de reciclo. Se puede observar que el aumento de la presión y el reciclo favorecen la remoción del parámetro.

Las mejores condiciones corresponden a una presión de 60 psi y 50% de reciclo, que permitieron obtener un porcentaje de remoción de DQO del 26,6%, disminuyendo éste al incrementarse el reciclo a 60%, debido a que la combinación de una elevada presión y reciclo producen un efecto de turbulencia en el tanque de flotación provocando la ruptura de los lodos generados en la parte superior del tanque.

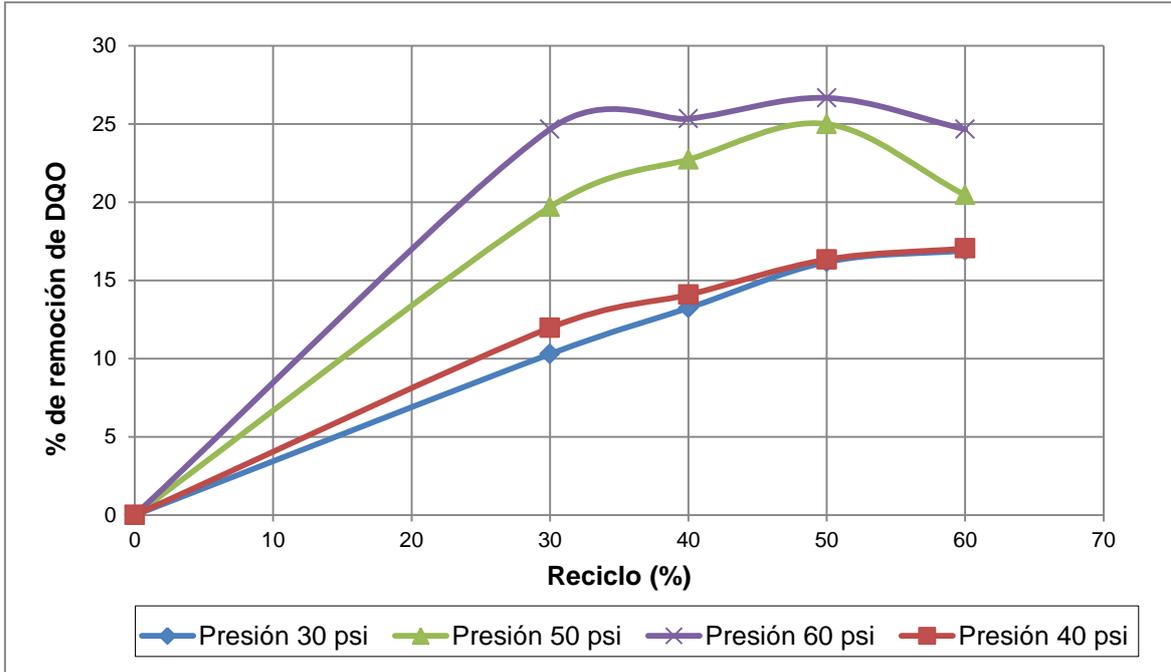


Figura 3.5. Remoción de DQO con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto

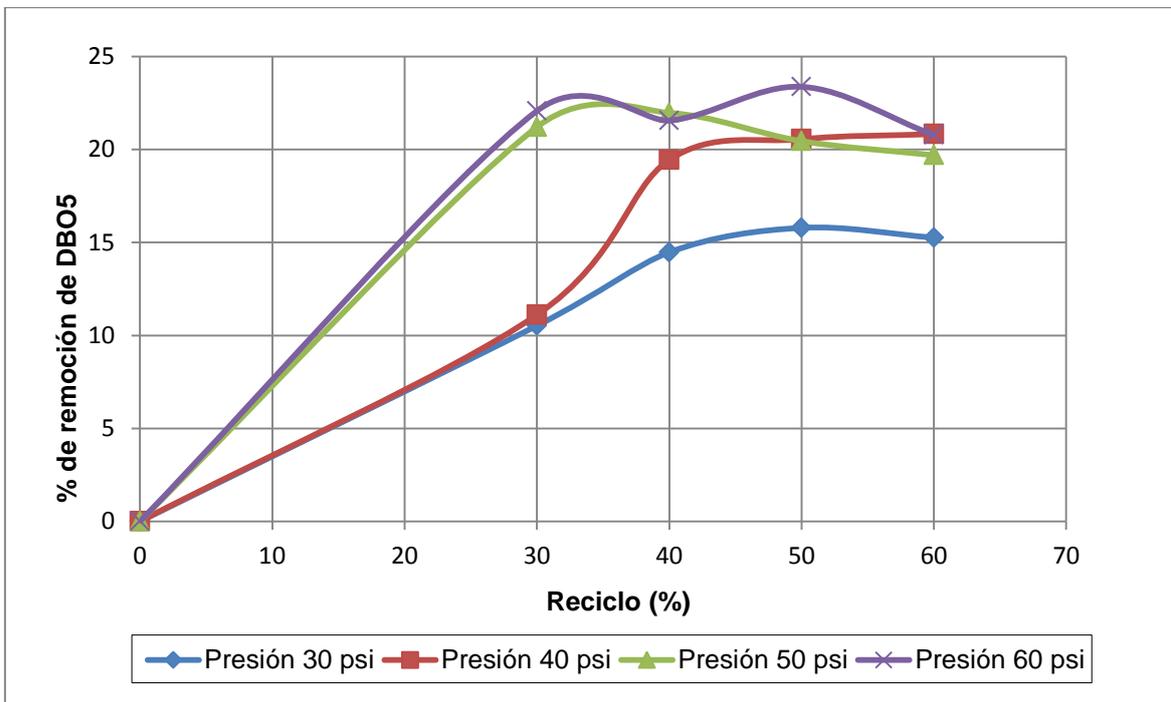


Figura 3.6. Remoción de DBO₅ con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto

En la Figura 3.6 se puede observar que la máxima eficiencia de remoción del parámetro DBO_5 con un 23,4 % se obtiene operando a una presión de 60 psi y 50 % de reciclo. A valores inferiores de presión, se observaron porcentajes de remoción bajos, debido a que a estas condiciones la generación de micro burbujas en el tanque de flotación es ineficiente para la remoción del contaminante presente en el agua residual. Igualmente, el reciclo tiene el efecto de aumentar el porcentaje de remoción hasta llegar a un punto de inflexión correspondiente al 50%, para un valor mayor a este la eficiencia de remoción del parámetro de interés disminuye.

A diferencia de la remoción de aproximadamente un 25 % en el DQO y DBO_5 presentadas en la Figuras 3.5 y 3.6, respectivamente; en la Figura 3.7 se observa un mayor porcentaje de remoción en los aceites y grasas.

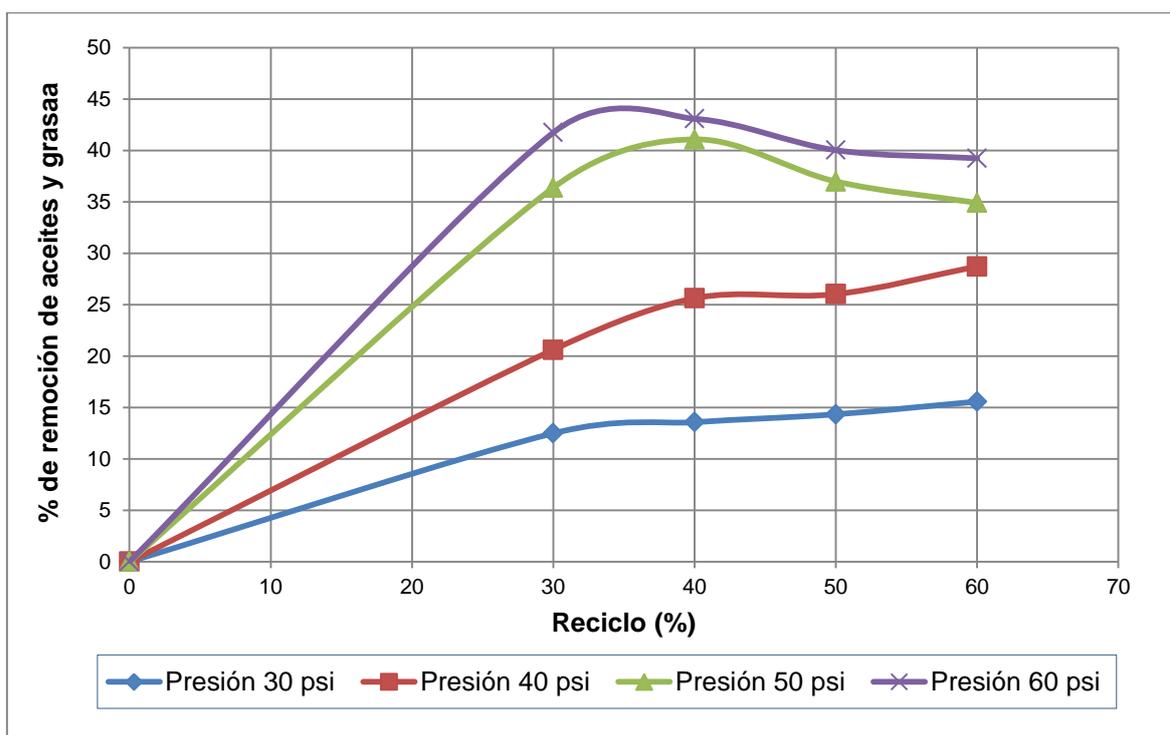


Figura 3.7. Remoción de aceites y grasas con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto

La flotación por aire disuelto se considera un tratamiento eficaz en la disminución de la carga contaminante de aceites y grasas, lo cual se observa en la Figura 3.7 con un porcentaje de remoción de aceites y grasas de un 43,1 % para una presión de 60 psi y 40% de reciclo. Se considera que la remoción obtenida de este parámetro en el sistema FAD sin la adición de coagulante químico es representativa, al eliminar gran porcentaje de la carga contaminante.

La Figura 3.8 presenta la remoción de sólidos suspendidos con respecto a la presión de operación y porcentaje de reciclo.

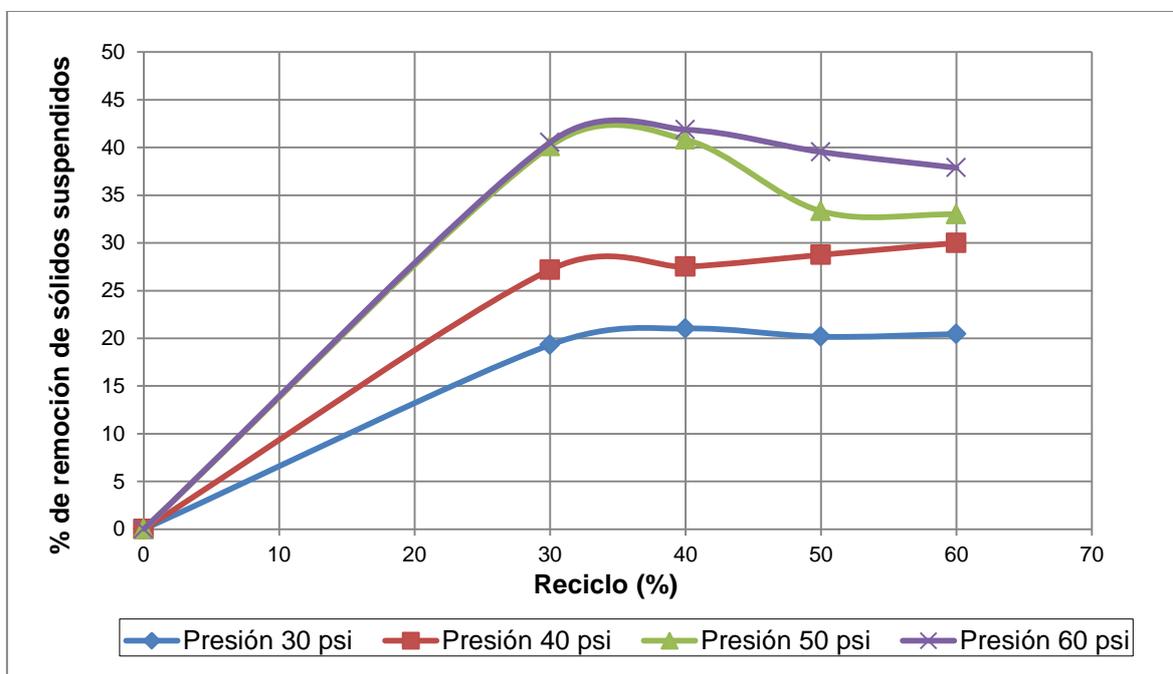


Figura 3.8. Remoción de sólidos suspendidos con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto

De manera similar a lo reportado en la eliminación de aceites y grasas, el mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en el agua residual se presentó bajo las mismas condiciones de operación con 41,9 % de remoción. Para valores de 50 psi y 40 % de reciclo se observa que la remoción del parámetro es casi similar al anterior, demostrando que se puede trabajar con cualquiera de las dos presiones mencionadas para lograr cierto grado de remoción.

En la Figura 3.9 se observa el comportamiento de los sólidos totales con relación a la variación de presión y porcentaje de reciclo. Se puede observar que las mejores condiciones corresponden a una presión de 60 psi y 30 % de reciclo, con un porcentaje de remoción de 37,9 %. El incremento del porcentaje de reciclo en trabajo con una presión de 60 psi disminuye significativamente la remoción de los sólidos.

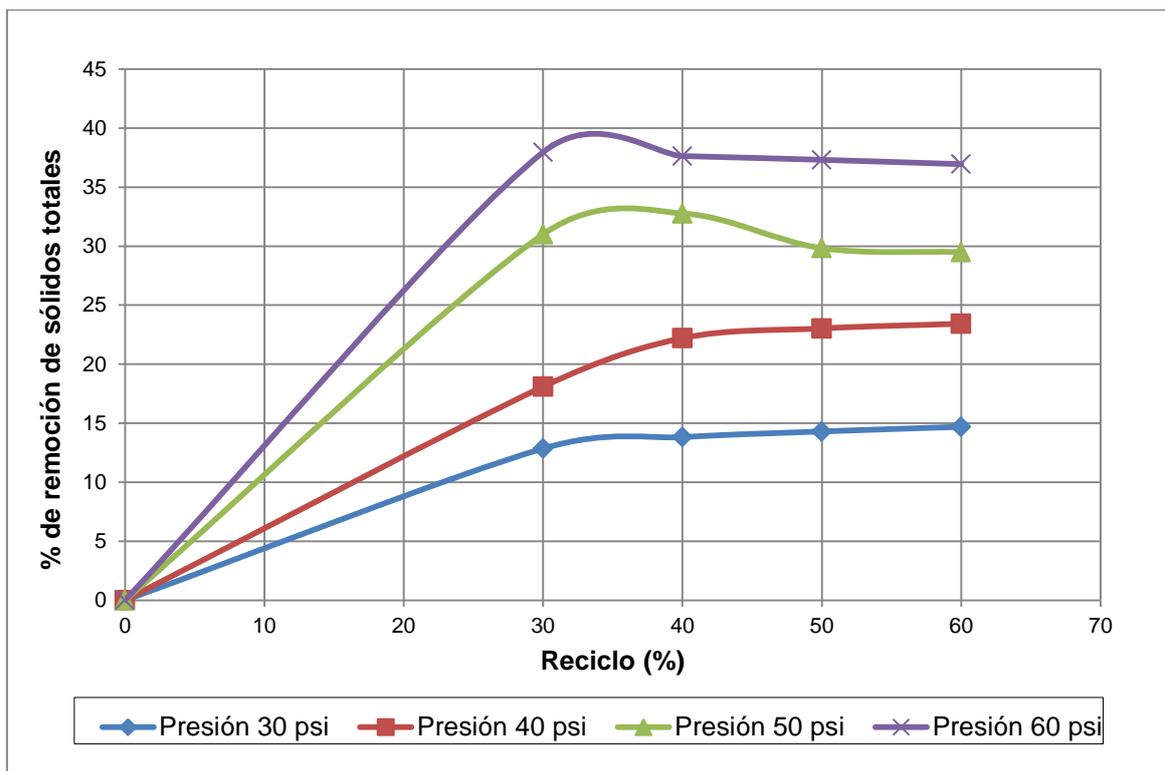


Figura 3.9. Remoción de sólidos totales con respecto a la variación del porcentaje de reciclo y de presión de trabajo en el sistema de flotación por aire disuelto

En la Figura 3.10 se puede observar un comportamiento similar en la remoción de sólidos sedimentables en el tratamiento del efluente por flotación con aire disuelto. Se encontró que se obtiene un porcentaje de remoción de un 40,8 % cuando se trabaja con una presión de 60 psi y 40 % de reciclo. Para valores más altos de reciclo con una presión de 60 psi la remoción de la carga contaminante disminuye, debido que la recirculación excesiva provoca turbulencia en el tanque de flotación afectando así la eficiencia de remoción en el sistema de FAD.

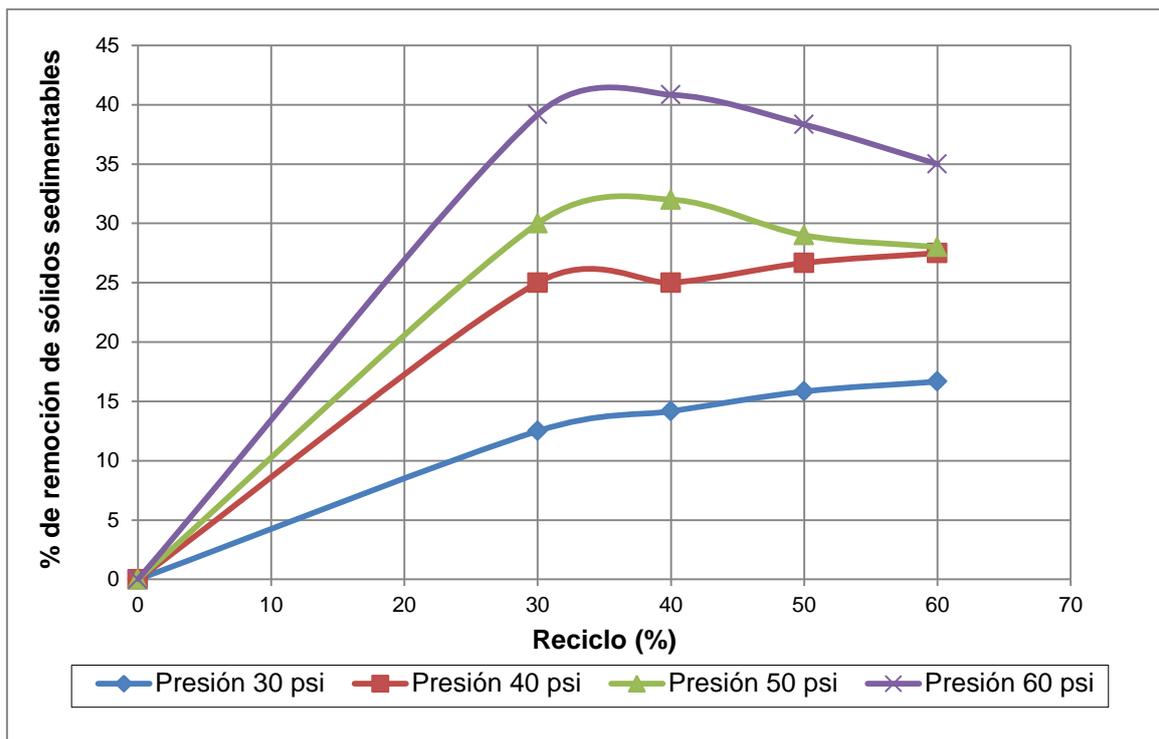


Figura 3.10. Remoción de sólidos sedimentables con respecto a la variación de presión y porcentaje de reciclo en el sistema de flotación por aire disuelto

La flotación por aire disuelto es un proceso de separación física para el tratamiento de aguas residuales industriales, que remueve grasas-aceites y sólidos suspendidos con alta eficiencia. (Forero et al, 1999, p.67). Los parámetros más importantes a analizar en el presente estudio fueron la remoción de aceites y grasas, así como también de sólidos suspendidos totales. Por tal razón, se escogieron las condiciones de operación que permitieron obtener los mayores porcentajes de remoción de los parámetros descritos. La Tabla 3.5 detalla las condiciones de presión y porcentaje de reciclo seleccionadas en la primera etapa del presente estudio.

Tabla 3.5. Condiciones de operación de la primera etapa del proceso de flotación por aire disuelto

Variables	Unidad	Valor
Presión de trabajo	psi	60
Porcentaje de reciclo	%	40

La Tabla 3.6 presenta un resumen de los porcentajes de remoción de los contaminantes obtenidos bajo las condiciones de las variables indicadas en la Tabla 3.5.

Tabla 3.6. Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos durante el estudio de la primera etapa del sistema de flotación por aire disuelto

Parámetro	Unidad	Valor inicial	Valor Final	% de Remoción
DQO	mg O ₂ /L	7500	5600	25,3
DBO ₅	mg O ₂ /L	3850	3020	21,5
Aceites y Grasas	mg/L	721,33	410,66	43,0
Sólidos Suspendidos	mg/L	301	175	41,8
Sólidos Totales	mg/L	2176	1357	37,6
Sólidos Sedimentables	mL/L	12	7,1	40,8

3.3.1.2 Análisis de la relación A/S

La eficiencia del sistema de flotación por aire disuelto, además de las condiciones óptimas de operación, depende fundamentalmente de la relación A/S, de manera que siendo este un parámetro importante a continuación se presenta el respectivo análisis.

La relación A/S permite determinar la cantidad de aire disponible o el porcentaje de sólidos suspendidos que pueden ser eliminados a la presión de operación y porcentaje de reciclo consideradas. En la Tabla 3.7 se presentan los valores de A/S calculados a partir de la Ecuación [1.6] del apartado 1.2.2.3, para las presiones comprendidas entre 30-60 psi y reciclo entre 30-60 %.

Tabla 3.7. Resultados de cálculo de valores de A/S para las diferentes presiones de operación, 30-60 psi y porcentajes de reciclo, 30-60%

Reciclo (%)	Presión de trabajo (psi)	A/S	% de remoción de sólidos suspendidos del efluente (mg/L)
30	30	0,0079	19,3
	40	0,013	27,2
	50	0,018	40,1
	60	0,023	40,5
40	30	0,011	21,0
	40	0,017	27,5
	50	0,025	40,8
	60	0,030	41,9
50	30	0,013	20,1
	40	0,021	28,7
	50	0,031	33,3
	60	0,038	39,5
60	30	0,015	20,4
	40	0,026	30,0
	50	0,037	32,9
	60	0,046	37,8

Como se puede observar la máxima eficiencia en la eliminación de la carga contaminante de sólidos suspendidos se presenta cuando la relación A/S es igual a 0,030, con un porcentaje de remoción del 41,9 %, calculada con una presión de 60 psi y 40 % de reciclo. Los valores de A/S por encima del valor óptimo, disminuyen la eficiencia de remoción del parámetro de interés, debido a la dificultad de las micro burbujas para atrapar los sólidos suspendidos, como consecuencia del elevado nivel de energía producido por el incremento de la presión y reciclo.

La Figura 3.11 representa la remoción de los sólidos suspendidos con respecto a la relación A/S sin adición de coagulante químico, para el porcentaje de reciclo seleccionado de 40 % y presiones de operación de 30-60 psi.

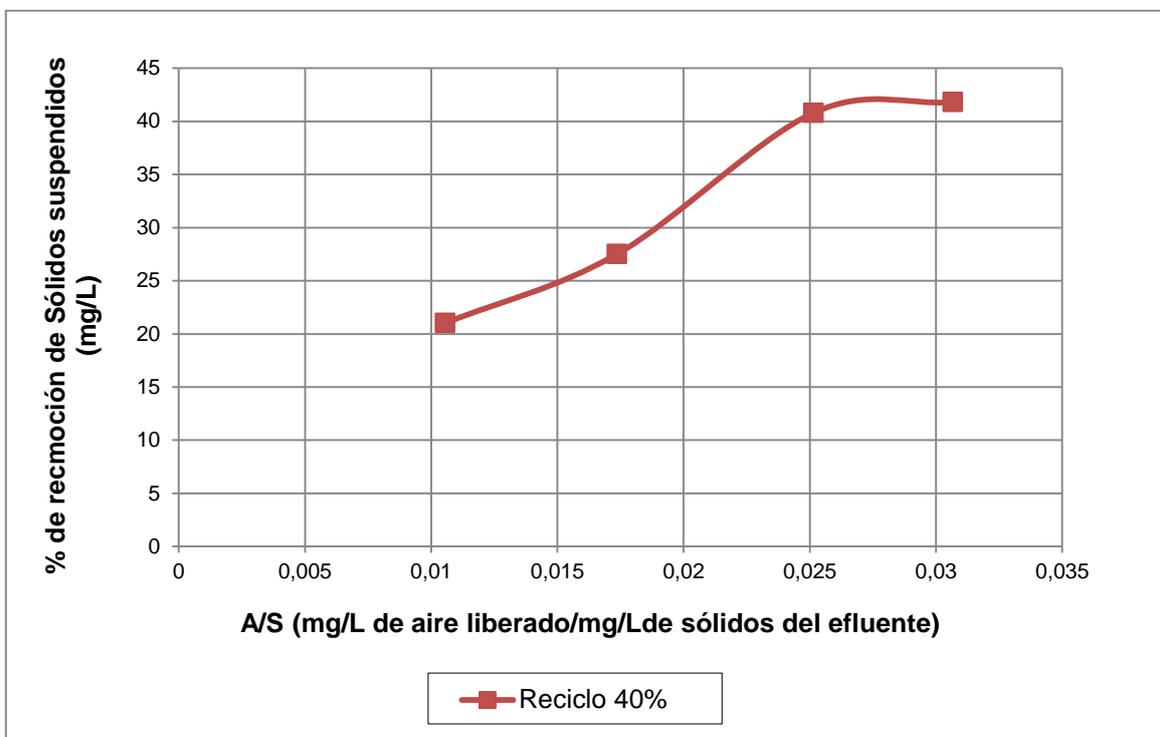


Figura 3.11. Remoción de sólidos suspendidos con respecto a valores de A/S en el sistema de flotación por aire disuelto para un reciclo del 40 %

En la Figura 3.11 se observa que para valores de A/S inferiores a 0,030, la remoción de sólidos suspendidos es baja debido a que la formación de burbujas de aire en el tanque de flotación no es suficientemente efectiva para hacer flotar todos los sólidos hacia la superficie del tanque. La cantidad de aire liberado por la despresurización por kg de sólidos suspendidos aumenta con el incremento de la presión.

A partir de este análisis se puede afirmar que el valor calculado de A/S es correcto con base a la bibliografía propuesta por, Romero (2000), el cual indica que para el tratamiento de efluentes industriales el valor de A/S ideal está comprendido entre 0,01-0,2 permitiendo la máxima remoción de sólidos suspendidos y un alto grado de clarificación del efluente. (p.354).

3.3.2 SEGUNDA ETAPA

Durante la segunda etapa, se procedió a estudiar el efluente en el sistema propuesto bajo las condiciones de la variable de presión 30-60 psi, pero con la adición de un coagulante químico y un valor de reciclo constante determinado durante la primera etapa, que permitió obtener el mayor grado de clarificación y remoción de la carga contaminante.

3.3.2.1 Características de químicos

Para mejorar la eficiencia del sistema propuesto, se evaluó el efecto de la adición de un coagulante químico con las condiciones de presión y reciclo establecidas de 50 psi y 40% respectivamente.

Las características del químico coagulante utilizado durante las respectivas pruebas de jarras, se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Características Físicas del Coagulante químico

Producto Químico	Características Físicas			
	pH	Color	Forma	Densidad (g/cm ³)
PCA-1R	3,8	Ligeramente Amarillo	Sólido	1,12

El químico utilizado como coagulante es un poli cloruro de aluminio elaborado en la empresa WASCORP S.A de acuerdo a las características del efluente a tratar, que permite la desestabilización de los coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados. Tiene una densidad de 1,12 g/cm³ y un pH de 3.8.

Igualmente, en la Tabla 3.9 se presentan las características del floculante químico utilizado como coadyuvante al proceso de coagulación.

Tabla 3.9. Características Físicas del Floculante químico

Producto Químico	Características Físicas			
	pH	Color	Forma	Densidad (g/cm ³)
WCA-301	7	Blanco-Tranparente	Líquido	1

El producto químico WCA-301, es un líquido blanco transparente con un pH de 7 y una densidad de 1 g/cm³. La acción del floculante es reunir los coloides en una red formando puentes de una superficie a otra y enlazar las partículas individuales en aglomerados fáciles de separar, debido a que el flóculo formado por la coagulación no es lo suficientemente grande como para separarse con la rapidez deseada. (Andía, 2000, p.33)

3.3.2.2 Dosis de coagulante químico

La dosis óptima del poli cloruro de aluminio para el pre tratamiento del agua residual, se determinó mediante la prueba de jarras, cuyos resultados se indican en la Tabla 3.10, 3.11 y 3.12.

Se realizaron tres pruebas que son consideradas como repeticiones de las mediciones para disminuir el error y estimar datos correctos sobre los efectos de la dosis del coagulante en la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual a tratar. Las dosis evaluadas son 30, 35, 40, 45, y 50 mg/L de coagulante químico con la adición de 2 mL de floculante para cada caso.

En las pruebas realizadas para determinar la concentración ideal del coagulante químico además de la determinación mediante la visualización se consideró la medición de la turbidez y el tamaño del floc formado en las respectivas jarras.

Tabla 3.10. Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 186 (NTU), y pH de 6, 2 repetición 1

N° de jarra	Coagulante (mg/L)	Floculante (mL)	Turbidez (NTU)	Tamaño del floc
1	30	2	11,2	Mediano
2	35	2	13,5	Grande
3	40	2	18,1	Pequeño
4	45	2	20,4	Pequeño
5	50	2	22,7	Pequeño

Tabla 3.11. Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 165 (NTU), pH de 6.8, repetición 2

N° de jarra	Coagulante (mg/L)	Floculante (mL)	Turbidez (NTU)	Tamaño del floc
1	30	2	14,9	Grande
2	35	2	16,4	Mediano
3	40	2	17,6	Pequeño
4	45	2	18,5	Pequeño
5	50	2	21,3	Pequeño

Tabla 3.12. Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 173 (NTU), pH de 5.7 repetición 3

N° de Jarra	Coagulante (mg/L)	Floculante (mL)	Turbidez (NTU)	Tamaño del floc
1	30	2	13,8	Mediano
2	35	2	12,1	Grande
3	40	2	15,2	Pequeño
4	45	2	16,3	Pequeño
5	50	2	18,7	Pequeño

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de jarras para cada una de las repeticiones, la dosis óptima de coagulante químico que permite disminuir considerablemente la turbidez y por consecuencia aumentar el porcentaje de remoción de los contaminantes es de 35 mg/L. El tamaño del flóculo formado con esta concentración es mayor en comparación con el resto de jarras.

Como se observa en las diferentes Tablas 3.10, 3.11 y 3.12 cuando se adiciona una concentración mayor a 35 mg/L de coagulante, el tamaño del flóculo no es lo suficientemente grande y estable para lograr una clarificación en el efluente. Según, Rojas et al. (2008), indica que dosis altas y bajas de coagulante químico tienden a desestabilizar los flóculos y producen dispersión en lugar de ayudar a la coagulación. Los valores de turbidez con concentraciones de coagulante por encima de la dosis óptima presentan un efluente totalmente turbio.

Resultados similares de baja turbidez se presentan cuando se dosifica 30 mg/L de coagulante químico, con la diferencia que los flóculos formados son medianos en comparación con el tamaño de los flóculos en la dosis ideal.

En la Figura 3.12 se muestra una de las pruebas realizadas en el equipo de jarras para la determinación de la dosis óptima de poli cloruro de aluminio para una muestra de agua residual con una turbidez inicial de 186 (NTU) y pH de 6.2



Figura 3.12. Prueba de jarras para una muestra del efluente con turbidez inicial de 186 (NTU) y pH 6.2

La Figura 3.12 permite visualizar que la jarra N° 2 con una concentración de 35 mg/L de coagulante químico es la mejor opción para el pre tratamiento químico del efluente antes del proceso por flotación, además se observa que conforme aumenta la concentración del químico el agua presenta baja clarificación y cada vez es más turbia. En estudios realizados por Tapia y Cázares (2009), se demostró que mientras menor sea la cantidad de flóculos en el agua a tratar menor será la cantidad de aire requerido para el tratamiento por flotación. Igualmente, se determinó que el desempeño de un sistema FAD es mejor cuando trabaja con flóculos grandes.

3.3.2.3 Estudio de la influencia de la presión de operación, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico

La presión de operación, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico constituyen parámetros importantes que influyen en la eficiencia del sistema FAD.

Los parámetros determinados mediante las respectivas pruebas y que representan valores óptimos para la disminución de la carga contaminante, constituyen un 40 % de reciclo y 35 mg/L de poli cloruro de aluminio. Sobre la base de estos resultados, se determinó la influencia de la presión de operación en la disminución de la carga contaminante del agua residual.

Para minimizar el porcentaje de error de las variables de estudio, se realizaron tres repeticiones de las mediciones, las cuales se indican en las Tablas 3.13, 3.14 y 3.15.

Tabla 3.13. Porcentajes de remoción de contaminantes con respecto a la presión, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico, repetición 1

	Porcentaje de reciclo			
	40%			
	Dosis de coagulante óptimo			
	35 mg/ L			
	Presión de operación			
PARÁMETROS	30	40	50	60
DQO	52,8	53,8	54,7	51,9
DBO ₅	47,1	49,0	52,9	47,8
Aceites y grasas	81,9	85,2	86,9	84,8
Sólidos Totales	61,9	71,9	72,9	67,2
Sólidos sedimentables	62,5	64,4	68,8	61,3
Sólidos suspendidos	66,4	76,5	81,7	74,8

Tabla 3.14. Porcentajes de remoción de contaminantes con respecto a la presión, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico, repetición 2

Porcentaje de reciclo				
40%				
Dosis de coagulante optimo				
35 mg/ L				
Presión de operación				
Parámetros	30	40	50	60
DQO	61,0	61,5	62,6	62,9
DBO ₅	61,0	61,6	62,3	62,3
Aceites y grasas	77,9	87,8	88,7	86,6
Sólidos Totales	66,1	62,4	76,4	76,8
Sólidos sedimentables	53,8	55,4	84,6	61,5
Sólidos suspendidos	70,9	77,4	85,2	81,0

Tabla 3.15. Porcentajes de remoción de contaminantes con respecto a la presión, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico, repetición 3

Porcentaje de reciclo				
40%				
Dosis de coagulante optimo				
35 mg/ L				
Presión de operación				
Parámetros	30	40	50	60
DQO	60,2	60,8	62,0	59,6
DBO ₅	58,5	59,7	60,0	58,5
Aceites y grasas	80,6	85,0	87,5	85,8
Sólidos Totales	60,7	65,7	72,3	79,3
Sólidos sedimentables	54,5	63,6	72,7	49,1
Sólidos suspendidos	73,9	76,6	81,0	78,9

Como se puede observar los porcentajes de remoción son más altos en comparación con los resultados obtenidos durante la primera etapa. De manera general, la máxima eficiencia de remoción se obtiene a una presión de 50 psi, mientras que para el caso del tratamiento sin coagulante químico, una presión de

60 psi constituyó la mejor opción. Esta diferencia se debe a que el poli cloruro de aluminio actúa como un agente coagulante que favorece la eliminación de la carga contaminante mediante la formación de flóculos grandes que se pueden remover con mayor facilidad.

Según un estudio realizado por, Féris et al. (2001), el uso de productos químicos incrementa la eficiencia del tratamiento y reduce el costo de energía, al disminuir considerablemente la presión de operación en el saturador.

En la Figura 3.13 se muestra el efecto de la presión de operación con 35 mg/L de poli cloruro de aluminio y 40 % de reciclo en la remoción de DQO presente en el efluente tratado.

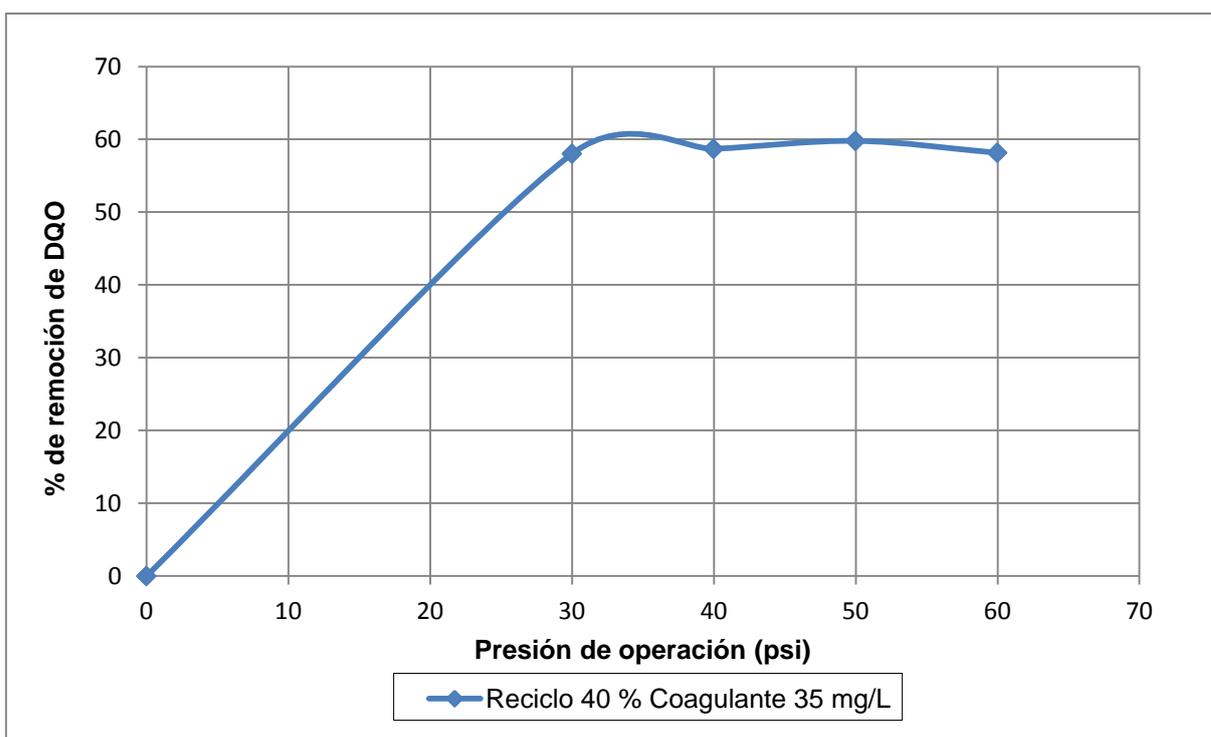


Figura 3.13. Remoción de DQO del efluente con respecto a la presión de operación

Como se observa en la Figura 3.13, el mejor porcentaje de remoción de DQO con un 59,8 % se logra con una presión de 50 psi, revirtiéndose este efecto al aumentar la presión a 60 psi.

La remoción de DBO_5 con respecto a la presión, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico se indica en la Figura 3.14

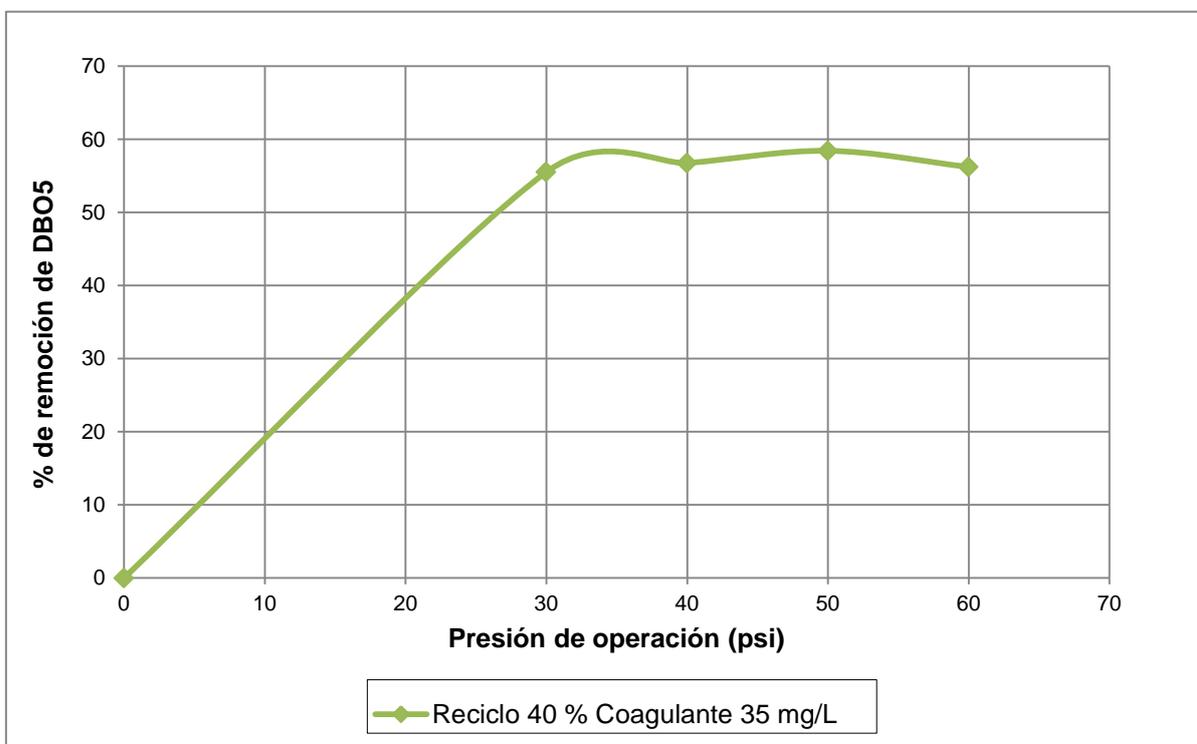


Figura 3.14. Remoción de DBO_5 del efluente con respecto a la presión de operación

En la Figura 3.14 se puede observar un comportamiento similar en la remoción de DBO_5 . La máxima eficiencia se alcanza con una presión de 50 psi que permitió obtener un 58,4 % de remoción del contaminante. Además, se observa que a una presión mayor el porcentaje de remoción del parámetro de interés disminuye debido a la destrucción de la textura de los flóculos formados en el tanque de flotación.

La Figura 3.15 representa la remoción de aceites y grasas con respecto a las condiciones de las variables de estudio establecidas.

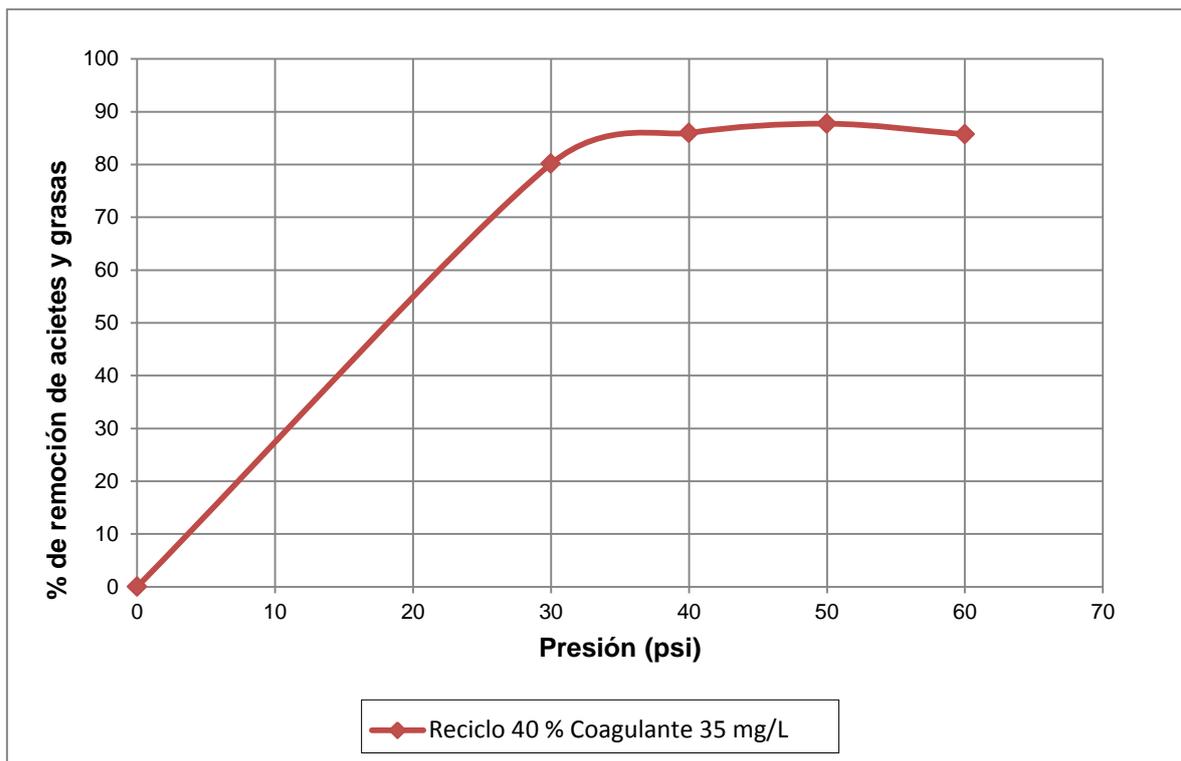


Figura 3.15. Remoción de aceites y grasas del efluente con respecto a la presión de operación

Los resultados indican que la eficiencia en el porcentaje de remoción de aceites y grasas varía de acuerdo con el incremento de la presión. A una presión de 50 psi la remoción es máxima con un 87,7 %, mientras que para una presión de 60 psi se observa una disminución considerable en el porcentaje de remoción, debido a que el aumento de la presión en la cámara de presurización, aumenta el nivel de saturación de aire en el agua, incrementando la producción de burbujas, las mismas que al ser liberadas en el tanque de flotación producen un efecto de turbulencia y por consecuencia la ruptura de los aglomerados presentes en dicha celda.

El alto porcentaje de remoción también se debe a que el poli cloruro de aluminio aumenta la hidrofocidad de las partículas y mejora la interacción de la partícula/burbuja para que sea fácilmente removida y eliminada.

Igualmente, los mejores porcentajes de remoción de sólidos totales, sedimentables y suspendidos se presentan cuando se trabaja a una presión de 50 psi con porcentajes de remoción del 73,9 %, 75,4 % y 82,6 %, respectivamente.

De manera general en las Figuras 3.16, 3.17 y 3.18, se observa que el aumento de la presión de operación, al generar una mayor cantidad de aire disuelto en el agua, provoca que la distribución de las micro burbujas ocasionen turbulencia en el tanque, disminuyendo la eficiencia del tratamiento. Caso contrario sucede al operar a presiones inferiores de 50 psi, las burbujas de aire generadas no son suficientes para clarificar el agua residual y permitir la eliminación de los contaminantes.

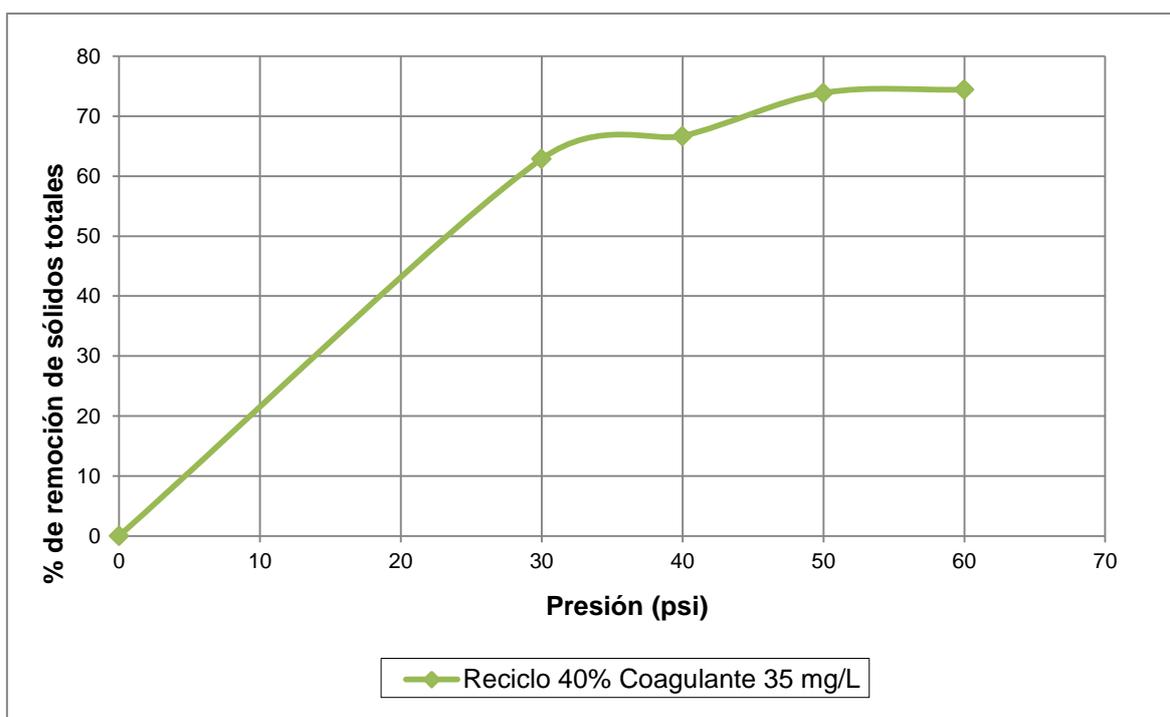


Figura 3.16. Remoción de sólidos totales del efluente con respecto a la presión de operación

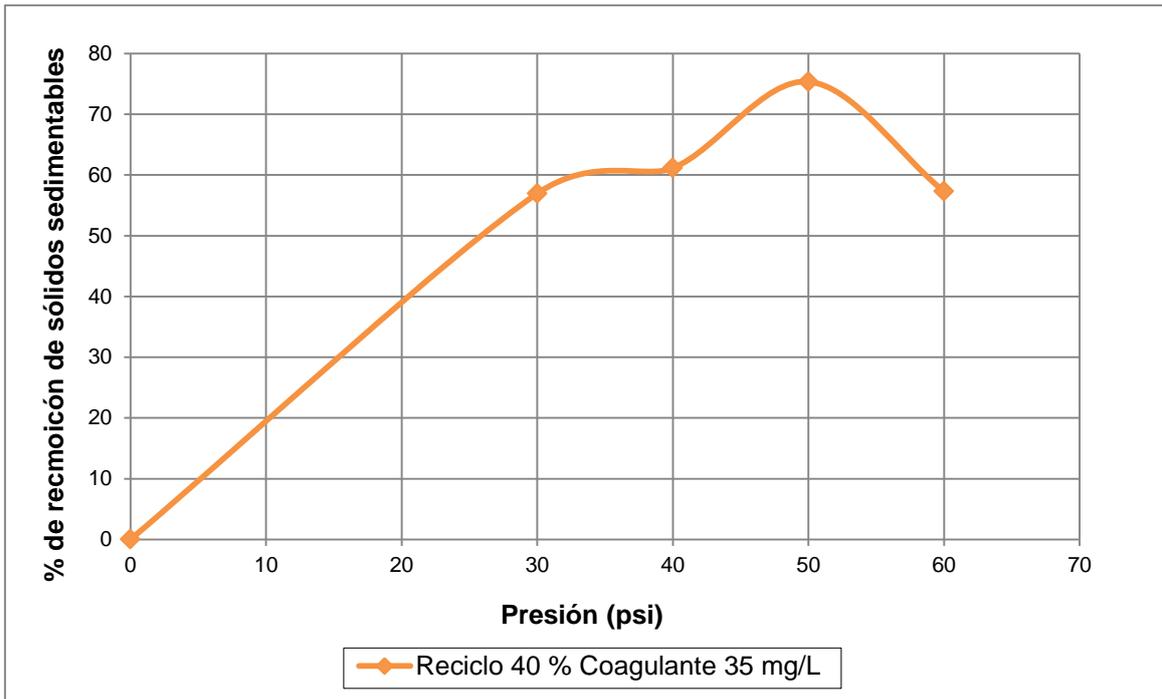


Figura 3.17. Remoción de sólidos sedimentables del efluente con respecto a la presión de operación

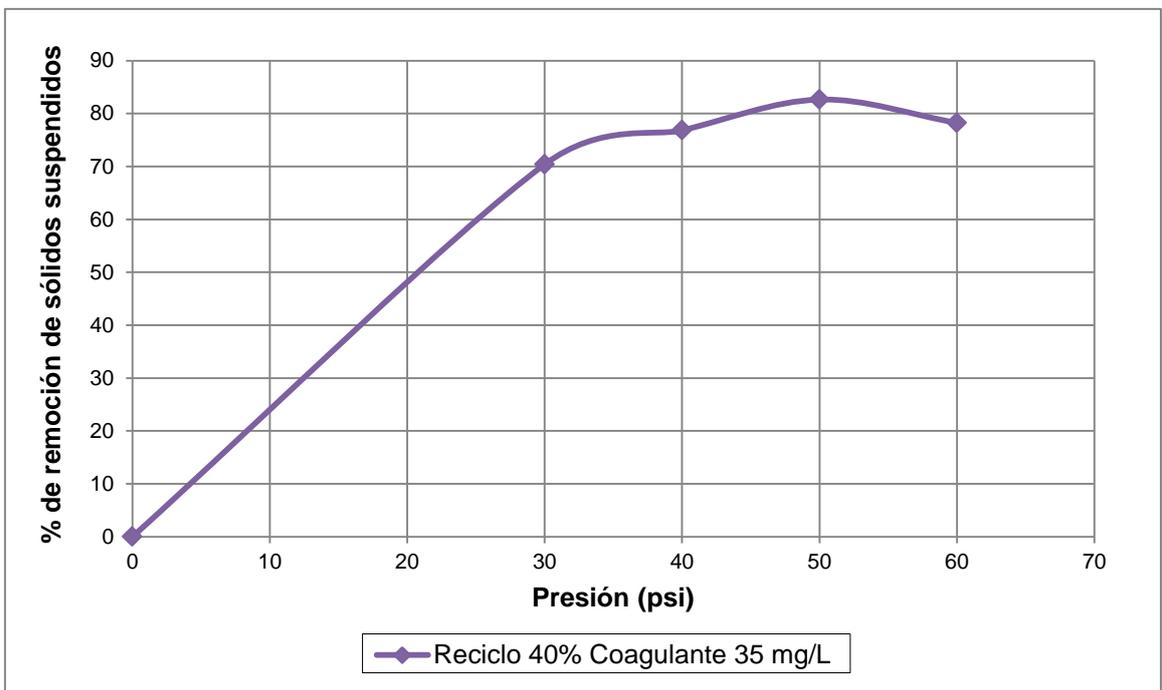


Figura 3.18. Remoción de sólidos suspendidos del efluente con respecto a la presión de operación

Debido a problemas ocasionados por el incremento de la presión en la cámara de saturación, la presión óptima que garantiza una generación de burbujas de tamaño ideal, que no afectan la eficiencia del sistema FAD en la remoción de los sólidos totales, disueltos y suspendidos corresponden a una presión de operación de 50 psi.

La Tabla 3.16 presenta el resumen de los porcentajes de remoción de los contaminantes, bajo las mejores de condiciones de operación establecidas.

Tabla 3.16. Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos a 50 psi, 40 % de reciclo y 35 mg/L

Parámetro	Unidad	% de Remoción
DQO	mg O ₂ /L	59,7
DBO ₅	mg O ₂ /L	58,4
Aceites y Grasas	mg/L	87,7
Sólidos Suspendidos	mg/L	82,6
Sólidos Totales	mg/L	73,8
Sólidos Sedimentables	mL/L	75,3

Los porcentajes de remoción obtenidos en comparación con los de la primera etapa, reflejan que los productos químicos incrementan la eficiencia del tratamiento y disminuyen la presión de operación de 60 psi a 50 psi, confirmando el estudio realizado por Féris et al. (2001), que indica que los productos químicos disminuyen la presión de operación al reducir la tensión superficial en el saturador y además que al operar con presiones bajas la operación del sistema de FAD es más segura y la saturación rápida.

3.3.2.4 Análisis de la relación A/S

La separación efectiva de los líquidos y sólidos del efluente, así como la concentración de los sólidos separados, depende de la generación suficiente de burbujas de aire por unidad de sólidos, lo cual se expresa por la relación aire a

sólidos (A/S), como kg de aire liberado por kg de sólidos suspendidos. (Rojas, 2000, p.345).

Los cálculos promedios de las repeticiones de la relación A/S para la segunda etapa con adición de coagulante químico se presentan en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Resultados de cálculo de valores de A/S para las diferentes presiones de operación, 30-60 psi y 40 % de reciclo

Reciclo (%)	Presión de trabajo (psi)	A/S	% de remoción de sólidos suspendidos del efluente (mg/L)
40	30	0,011	70,4
	40	0,016	76,8
	50	0,021	82,6
	60	0,026	78,3

El valor óptimo de A/S que permite una remoción del 82,6 % de sólidos suspendidos totales corresponde a 0,021. A valores de A/S como 0,026, la eficiencia del sistema FAD disminuye, debido a que la inyección de agua presurizada a 60 psi produce turbulencia y destruye los flóculos. Para valores bajos de A/S como 0,011, los flóculos no poseen la cantidad adecuada de aire para que puedan subir a la superficie y ser eliminados. Estudios realizados por Romero, (2000) indica que para relaciones de A/S altas se ha encontrado experimentalmente que la velocidad de aire es excesiva y causa destrucción del sobrenadante por efecto del esfuerzo cortante y de la turbulencia.

En la primera etapa sin coagulante químico se determinó un valor óptimo de A/S de 0,030, ahora con la adición de poli cloruro de aluminio el valor de A/S disminuyó a 0,021.

La Figura 3.19 representa los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos con respecto a la relación A/S, calculada con las presiones comprendidas entre 30- 60 psi, como lo indica la Tabla 3.17.

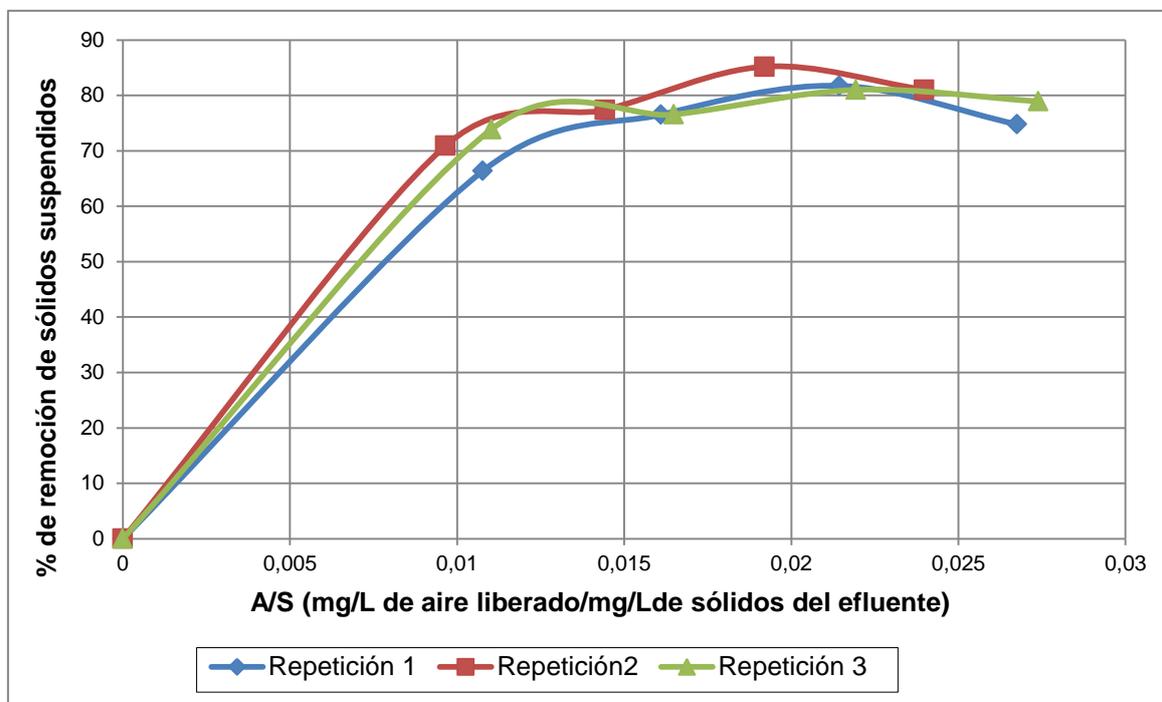


Figura 3.19. Remoción de sólidos suspendidos con respecto a valores de A/S en el sistema de flotación por aire disuelto para un reciclo del 40 %

Como se observa en la Figura 3.19, la relación de A/S aumenta con el incremento de la presión, lo cual da como resultado una mayor cantidad de aire disuelto en la celda de flotación. Se observa que para las tres repeticiones el valor de A/S favorece la remoción de sólidos suspendidos hasta una presión de operación de 50 psi, y que el punto de inflexión donde disminuye el porcentaje de remoción corresponde a una presión de 60 psi. Se requieren valores bajos de la variable A/S para lograr una adecuada remoción en el sistema de flotación por aire disuelto, a fin de lograr una buena distribución del tamaño de burbuja de aire, que hace contacto con los sólidos presentes en el agua residual. (Trujillo y Herrera, 1995, p.353).

El presente estudio permitió determinar que el mayor grado de clarificación y porcentajes de remoción se obtienen operando a una presión de 50 psi, 40 % de

reciclo y 35 mg/L de poli cloruro de aluminio. En comparación con otra fuente bibliográfica, "Tratamiento de Aguas de Producción por Flotación con Aire Disuelto" (Turris et al, 2011, p.211), el mayor porcentaje de remoción de aceites y grasas con un 90 % y de sólidos suspendidos con un 72 % se obtienen con una presión de 276 kPa (40 psi) y 40 % de reciclo. Por lo tanto, las mejores condiciones de operación determinadas experimentalmente para el tratamiento de flotación por aire disuelto para el agua residual de la Industria Láctea son coherentes, debido a que aguas industriales con alta carga contaminante de aceites y grasas, así como también de sólidos suspendidos presentan valores similares de condiciones de operación.

3.4 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE APLICACIÓN DE OTROS PROCESOS FÍSICOS Y QUÍMICOS AL SISTEMA D.A.F PARA DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE DE ACEITES Y GRASAS, DQO, DBO₅, (ST), (SDT), (SST)

3.4.1 NEUTRALIZACIÓN

Turris et al, (2011), señala que la efectividad de los productos químicos utilizados para incrementar la eficiencia del sistema de FAD, es afectada por el pH del agua residual. Por otro lado, Casas (2009), añade que la influencia del pH dentro de una planta de tratamiento es tanto química como biológica y que el control de este parámetro es necesario para asegurar que las aguas residuales no dañen las estructuras, equipos o cañerías de las industrias (p. 17). El análisis de la influencia del pH sobre el sistema de FAD se realiza con las mejores condiciones de operación correspondientes a 50 psi, 40 % de reciclo y 35 mg/L de poli cloruro de aluminio.

Los resultados obtenidos que permiten determinar el pH óptimo mediante la prueba de jarras se presenta en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Resultados de la prueba de jarras para una muestra con turbidez inicial de 169 (NTU), y pH de 6.4

N° de jarra	pH	Coagulante (mg/L)	Floculante (mL)	Turbidez (NTU)	Tamaño del floc
1	7	35	2	9,53	Mediano
2	8	35	2	8,62	Grande
3	9	35	2	10,11	Mediano

Se analizaron tres jarras, en las cuales se estableció mediante la dosificación de sosa cáustica un pH de 7, 8 y 9. Un pH de 8 se determinó como el óptimo para mejorar la eficiencia del sistema. La jarra N° 2 presenta los flóculos de mayor tamaño en comparación con el tamaño de floculos formados en las jarras N ° 1 y 3. Igualmente, la turbidez del agua es menor a un pH de 8 y por ende tiene mejor grado de clarificación que el resto de jarras.

Una vez determinado el pH óptimo, se presentan los resultados de porcentajes de remoción de los contaminantes presentes en el efluente con las condiciones de operación establecidas, como lo indica la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos para un pH de 8, 50 psi, 40 % de reciclaje y 35 mg/L

Parámetro	Unidad	% de Remoción
DQO	mg O ₂ /L	61,4
DBO ₅	mg O ₂ /L	60,4
Aceites y Grasas	mg/L	89,7
Sólidos Suspendidos	mg/L	83,9
Sólidos Totales	mg/L	75,6
Sólidos Sedimentables	mL/L	76,2

Como se observa en la Tabla 3.19 los valores de remoción son más altos en comparación con los resultados obtenidos en la Tabla 3.14, los cuales fueron medidos a un pH del efluente inicial comprendido entre 5 y 6. Entonces, se puede

afirmar que el control del pH antes de efectuar el pre tratamiento químico es importante, ya que permite mejorar la calidad del agua y disminuir aún más la carga contaminante.

3.4.2 FILTRACIÓN

La filtración es la operación final de clarificación de una planta de tratamiento de agua residual, que consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales a través de un medio poroso como el carbón activado y la zeolita. (Martín, Salcedo, y Font, 2011, p.14). El carbón activado es considerado el mejor adsorbente de uso general para la remoción de contaminantes, entre los que se incluyen: materia orgánica, sólidos suspendidos, sedimentables, color, olor, aceites y grasas. (Carbotecnia, 2004, p.1), mientras que la zeolita es una roca compuesta de aluminio, silicio y oxígeno que tiene gran porosidad natural que al igual que el carbón activado permite la remoción de contaminantes presentes en el agua residual. (EPA, 1999, p.1).

La Tabla 3.20 y 3.21 indican los resultados de porcentajes de remoción de los contaminantes obtenidos al tratar el efluente resultante por el filtro de carbón activado y zeolita, respectivamente.

Tabla 3.20. Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos para un pH de 8, 50 psi, 40 % de reciclo y 35 mg/L, filtro carbón activado

Parámetro	Unidad	% de Remoción
DQO	mg O ₂ /L	62,5
DBO ₅	mg O ₂ /L	62,6
Aceites y Grasas	mg/L	91,2
Sólidos Suspendidos	mg/L	88,6
Sólidos Totales	mg/L	80,4
Sólidos Sedimentables	mL/L	82,5

Tabla 3.21. Porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos para un pH de 8, 50 psi, 40 % de reciclaje y 35 mg/L, filtro zeolita

Parámetro	Unidad	% de Remoción
DQO	mg O ₂ /L	61,7
DBO ₅	mg O ₂ /L	61,4
Aceites y Grasas	mg/L	91,1
Sólidos Suspendidos	mg/L	87,9
Sólidos Totales	mg/L	80,2
Sólidos Sedimentables	mL/L	80,3

Como se observa la mayor eficiencia en remoción de los contaminantes se presenta cuando el efluente resultante es tratado por un filtro de carbón activado, ya que permite retener más la carga contaminante que el filtro de zeolita. Los procesos adicionales como la neutralización y la filtración permiten incrementar los porcentajes de remoción de los contaminantes como se observan en la respectivas Tablas 3.19 y 3.21.

3.5 RESULTADOS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (F.A.D) PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EL ORDEÑO Y LA CORPABE

El diseño propuesto de un sistema de flotación por aire disuelto, para el tratamiento del agua residual de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe consta básicamente de un tanque de flotación, cámara de presurización, una bomba centrífuga, y una válvula de inyección de aire. Los equipos dimensionados en el presente estudio son: el tanque de flotación y la cámara de presurización, el resto de componentes son seleccionados con base en los requerimientos del sistema.

3.5.1 CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN

Las condiciones óptimas requeridas para el cálculo de los parámetros del diseño del sistema de FAD determinadas experimentalmente se indican en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Condiciones óptimas para el cálculo de los parámetros de diseño del sistema de FAD determinadas experimentalmente

Parámetros	Unidad	Valor
Presión de operación	psi	50
Porcentaje de reciclo	%	40
Dosis de coagulante químico	mg/L	35

Los resultados de presión de operación, porcentaje de reciclo y dosis de coagulante químico corresponden a las condiciones que permitieron obtener el mayor porcentaje de remoción de los contaminantes presentes en el agua residual de la Industria en estudios anteriores.

3.5.2. CRITERIOS DE DISEÑO

Además de las condiciones óptimas de operación, se asumió criterios de diseño con base a bibliografía de unidades típicas de flotación por aire disuelto, que facilitan el cálculo de los parámetros de diseño del sistema. La Tabla 3.23 indica los criterios asumidos.

Tabla 3.23. Criterios asumidos para el cálculo de los parámetros del diseño del sistema de FAD

Parámetros	Unidad	Valor
Fracción de saturación, tanque de presurización	%	0,5
Tiempo de retención, Tanque de flotación	min	30
Tiempo de retención, Cámara de presurización	min	2
Carga superficial	m ³ /m ² *día	120
Factor de seguridad	-	1,35

La fracción de saturación asumida de 0,5, generalmente se adopta para el diseño de unidades típicas de flotación. Por igual, el tiempo de retención asumido de 30 minutos en el tanque de flotación, representa el tiempo requerido para lograr la separación óptima de los contaminantes y permitir obtener un alto grado de clarificación del efluente. Caso similar sucede con el tiempo de retención en el tanque de presurización considerado de 2 minutos, el mismo que corresponde al tiempo que debe permanecer el volumen de agua dentro del tanque para que alcance la concentración de aire disuelto requerido. Otro factor asumido es la carga superficial de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ que permite el cálculo del área del tanque de flotación. Y por último, un factor de seguridad de 1.35, que indica seguridad ante el fallo. (Crites y Tchobanoglous, 2002, pp. 229-230).

3.5.3 PARÁMETROS DE DISEÑO

3.5.3.1 Caudal recirculado presurizado

A partir del porcentaje de recirculación experimental obtenida del 40 % y un caudal del afluente a tratar de $500 \text{ m}^3/\text{día}$, se cálculo el caudal recirculado con la Ecuación [AX.1] descrita en el Anexo X.

Por lo tanto, para el sistema de tratamiento propuesto el caudal recirculado fue:

$$Q_R = 2,31 \frac{L}{S}$$

Fanda, señala que los sistemas que cuentan con un porcentaje de reciclo permiten ahorrar energía y evitar al máximo la posible destrucción de flóculos en el turbulento proceso de creación de las micro burbujas de aire (p. 2). Por igual, Ross et al. (2000), afirma que los sistemas que trabajan a flujo completo y utilizan productos químicos, exponen al flóculo formado a altas fuerzas de cizallamiento provocando su destrucción antes de la presurización y limitando de este modo la eficiencia del sistema (p. 1).

3.5.3.2 Solubilidad del aire

La solubilidad del aire en el agua se determinó con la fórmula de la Ley de Henry, que contempla que la concentración de un gas disuelto es función de su presión relativa. A partir de la presión de operación de 50 psi y una presión local atmosférica (Quito) de 10,4 psi, se calculó la solubilidad de saturación del aire con la Ecuación [1.1] en el apartado 1.2.2.3. Los respectivos cálculos se detallan en el Anexo [AX].

Solubilidad de saturación del aire a la presión de operación del tanque, C_T

$$C_T = 66.65 \frac{mL \text{ aire}}{L \text{ agua}}$$

Solubilidad de saturación del aire a la presión local atmosférica, C_L

$$C_L = 10.91 \frac{mL \text{ aire}}{L \text{ agua}}$$

3.5.3.3 Cantidad de aire liberado

La cantidad de aire liberado en el tanque de flotación, al reducir la presión a la presión atmosférica, se calculó a partir de la diferencia de solubilidades según la Ecuación [1.2] en el apartado 1.2.2.3. El respectivo cálculo se detalla en el Anexo [AX].

$$C_T - C_L = 22,42 \frac{mL \text{ aire}}{L \text{ agua}}$$

3.5.3.4 Relación aire/sólidos (A/S)

El valor de la relación entre la cantidad de aire y sólidos (A/S) para un sistema con recirculación, requerida para lograr un determinado grado de clarificación se determinó a partir de la Ecuación [1.6] del apartado 1.2.23. El cálculo respectivo se detalla en el Anexo [AX].

$$\frac{A}{S} = 0.021 \frac{\frac{mg}{L} \text{ de aire liberado por la despresurización}}{\frac{mg}{L} \text{ de sólidos suspendidos en el afluente}}$$

El parámetro más importante que influye en el diseño del sistema de flotación por aire disuelto, corresponde a la relación A/S. El valor correspondiente a 0,021 (mg/L de aire/mg/l de sólidos suspendidos), permite afirmar que el sistema de flotación presentará una buena eficiencia, ya que será capaz de producir las suficientes burbujas de aire para flotar sustancialmente todos los sólidos suspendidos presentes en el agua residual. El valor resultante de A/S se encuentra dentro del rango establecido, para el tratamiento de efluentes industriales mediante el proceso estudiado (0,01-0,2). Valores fuera de rango, determinan una cantidad deficiente o excesiva de aire, aspecto que afectaría el campo económico.

Por lo tanto, un cálculo acertado de la relación A/S abarca un ahorro económico entre el costo de los equipos y su manteniendo, así como la determinación de la calidad del efluente.

3.5.3.5 Cantidad de lodo producido

El lodo producido por los sólidos suspendidos contenidos en el efluente se calculó a partir de la Ecuación [AX.4].

$$m_{lodos} = 6,14 \frac{kg}{h}$$

3.5.3.6 Cantidad de coagulante químico dosificado

La cantidad de coagulante químico aplicada al agua cruda al ingreso del tanque de flotación, se calculó a partir de la Ecuación [AX.5].

$$m_{quimico} = 0,73 \frac{kg}{h}$$

3.5.4 DISEÑO DEL TANQUE DE FLOTACIÓN

3.5.4.1 Área superficial del tanque de flotación

El área superficial del tanque de flotación se calculó a partir de la Ecuación [AXI.1], con los datos detallados en la Tabla 3.22 y 3.23.

$$A_s = 5,83 m^2$$

3.5.4.2 Volumen del tanque de flotación (prisma rectangular)

El volumen total del tanque de flotación consta del volumen del prisma y de la pirámide rectangular como se observa en la Figura 3.20. Para su respectivo cálculo, se procede al dimensionamiento de la parte superior del tanque.

Para el volumen del prisma rectangular se consideró un tiempo de retención de 30 minutos y un factor de seguridad de 1,35. Los cálculos respectivos se detallan en la Ecuación [AXI.2].

$$V_{prisma} = 19,64 m^3$$

3.5.4.3 Ancho del tanque de flotación (prisma rectangular)

Una vez obtenido el volumen y el área superficial, el ancho del prisma rectangular se calculó a partir de la Ecuación [AXI.3] que se detalla en el Anexo XI.

$$A_{prisma} = 3,36 \text{ m}$$

3.5.4.4 Largo del tanque de flotación (prisma rectangular)

Para el cálculo del largo del prisma rectangular, se consideró una altura máxima de 1.2 m, la Ecuación [AXI.4] detalla el respectivo cálculo.

$$L_{prisma} = 4,87 \text{ m}$$

3.5.4.5 Volumen del tanque de flotación (pirámide rectangular)

El volumen de la pirámide rectangular que conforma una parte del volumen total del tanque de flotación se calculó a partir de la Ecuación [AXI.5] que se detalla en el Anexo XI.

$$V_{pirámide} = 2,3 \text{ m}^3$$

3.5.4.5 Volumen total del tanque de flotación

El volumen total del tanque de flotación se calculó a partir de la Ecuación [AXI.6].

$$V_{flot} = 21,94 \text{ m}^3$$

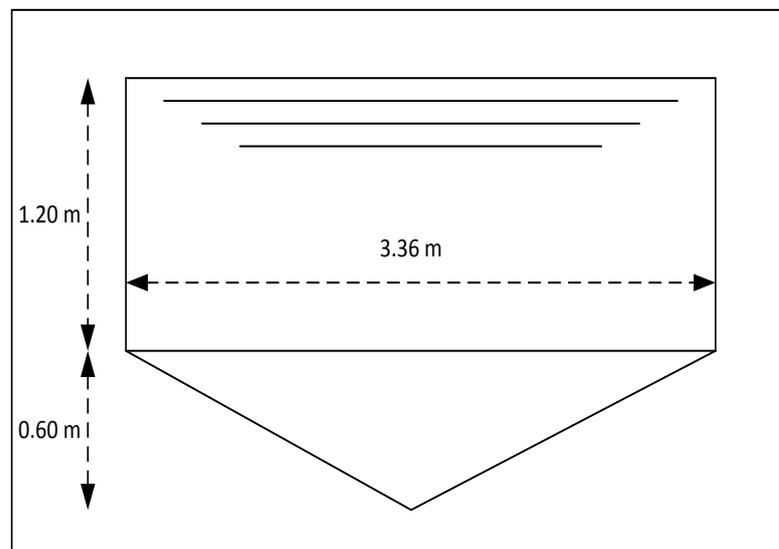
En la Tabla 3.24 se presenta un resumen de las dimensiones del tanque de flotación.

Tabla 3.24. Dimensiones del tanque de flotación

Dimensión	Unidad	Valor
Volumen total	m ³	21,94
Ancho	m	3,36
Largo	m	4,87
Altura	m	1,2

El tanque de flotación diseñado permite dar espacio y tiempo para que los sólidos y el resto de contaminantes viajen a la superficie, formen una capa de lodo lo suficientemente espesa y posteriormente sea removida con facilidad por el desnatador.

Las dimensiones calculadas del equipo se muestran en la Figura 3.19.

**Figura 3.20.** Dimensiones del tanque de flotación

3.5.5 DISEÑO DEL TANQUE DE PRESURIZACIÓN

3.5.5.1 Volumen del tanque de presurización

El volumen del tanque de presurización que depende del caudal de recirculación y el tiempo de retención en el tanque, se calculó a partir de la Ecuación [AXII.1] y datos detallados en la Tabla 3.23.

$$V_{pres} = 0,37 \text{ m}^3$$

3.5.5.2 Altura del tanque de presurización

Para el cálculo de la altura del tanque de presurización, que se detalla en la Ecuación [AXII.2], se consideró un diámetro igual a 0,60 m.

Por lo tanto la altura es:

$$h_{pres} = 1,3 \text{ m}$$

La Tabla 3.25 presenta un resumen de las dimensiones del tanque de presurización.

Tabla 3.25. Dimensiones del tanque de presurización

Dimensión	Unidad	Valor
Volumen	m ³	0,37
Diámetro	m	0,60
Altura	m	1,3

El tanque de presurización diseñado permite mezclar íntimamente el agua recirculada y el aire comprimido para crear la solución saturada requerida que permita la generación suficiente de burbujas de aire.

3.5.6 BOMBA DE RECIRCULACIÓN

La bomba que permite la conducción de agua recirculada hacia el tanque de flotación, corresponde a una bomba centrífuga trifásica marca THEBE TH-16 AL de 3 HP, 220 v, seleccionada con base al caudal de recirculación requerido de 8,33 m³/h. El respectivo catálogo se presenta en el Anexo XIII.

3.5.7 VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN

La selección adecuada de la válvula reductora de presión garantiza la formación de micro burbujas sin la creación de turbulencias en el volumen de agua del tanque de flotación. (Lehmann, 2000, p.167). Por lo tanto, se eligió una válvula reductora de presión marca EUROPE ITAP 143, de 2 plg en acero inoxidable, la cual permite la salida constante de agua saturada hacia el tanque donde se produce la separación de las fases.

3.5.8 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

La flotación por aire disuelto es un proceso que permite remover las partículas presentes en el agua residual haciéndolas flotar, por medio de la adhesión de diminutas burbujas de aire, las mismas que son generadas por la súbita reducción de presión en la corriente líquida saturada de aire.

En efecto, por medio de una bomba centrífuga (bomba de recirculación) de 3 HP, la cantidad de agua recirculada (40%) ingresa por la parte superior del tanque de presurización y permanece bajo presión un tiempo de retención asumido de 2 minutos permitiendo que la concentración de aire disuelto alcance su correspondiente valor de saturación. Luego el líquido saturado sale por la parte inferior del tanque hacia la conducción de salida en donde se encuentra ubicada una válvula reductora de presión. Posteriormente en el tanque de flotación, la mezcla del afluyente con el de recirculación, entran por la parte inferior para distribuirse en forma uniforme en todo el volumen del tanque. Cuando el flujo de la mezcla ingresa al tanque de flotación, comienza la despresurización a la presión

atmosférica y las burbujas de aire que se liberan de la solución, se elevan hacia la superficie recogiendo todo el material suspendido como sólidos, aceites y grasas. El tiempo de retención asumido en la unidad es de 30 minutos. El efluente clarificado es retirado por medio de un canal recolector ubicado en la salida del tanque, mientras que el material flotado que se acumula en la superficie de la unidad, formando una capa de lodo se remueve periódicamente mediante los raspadores superficiales, los cuales dirigen el lodo hacia un rebose de recolección de lodos. Los sólidos pesados que no logran subir a la superficie son diariamente desalojados del fondo del tanque por medio de una válvula de descarga. El aire provisto al tanque de presurización se realiza mediante un compresor de 7.5 HP. La dosificación del poli cloruro de aluminio (coagulante) se realiza en la tubería del agua cruda mientras ingresa a la unidad de flotación.

La adición de sosa acústica como proceso adicional (neutralización), se dosificaría en el agua cruda antes de la adición del coagulante químico. Por igual, el agua resultante de la unidad de flotación, sería tratada por un filtro de carbón activado, también establecido como un proceso adicional al sistema que ayuda a mejorar la calidad del agua.

La Figura 3.21 muestra el sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento de un caudal de $500 \text{ m}^3/\text{día}$ de la Industria Láctea El Ordeño y la Corpabe.

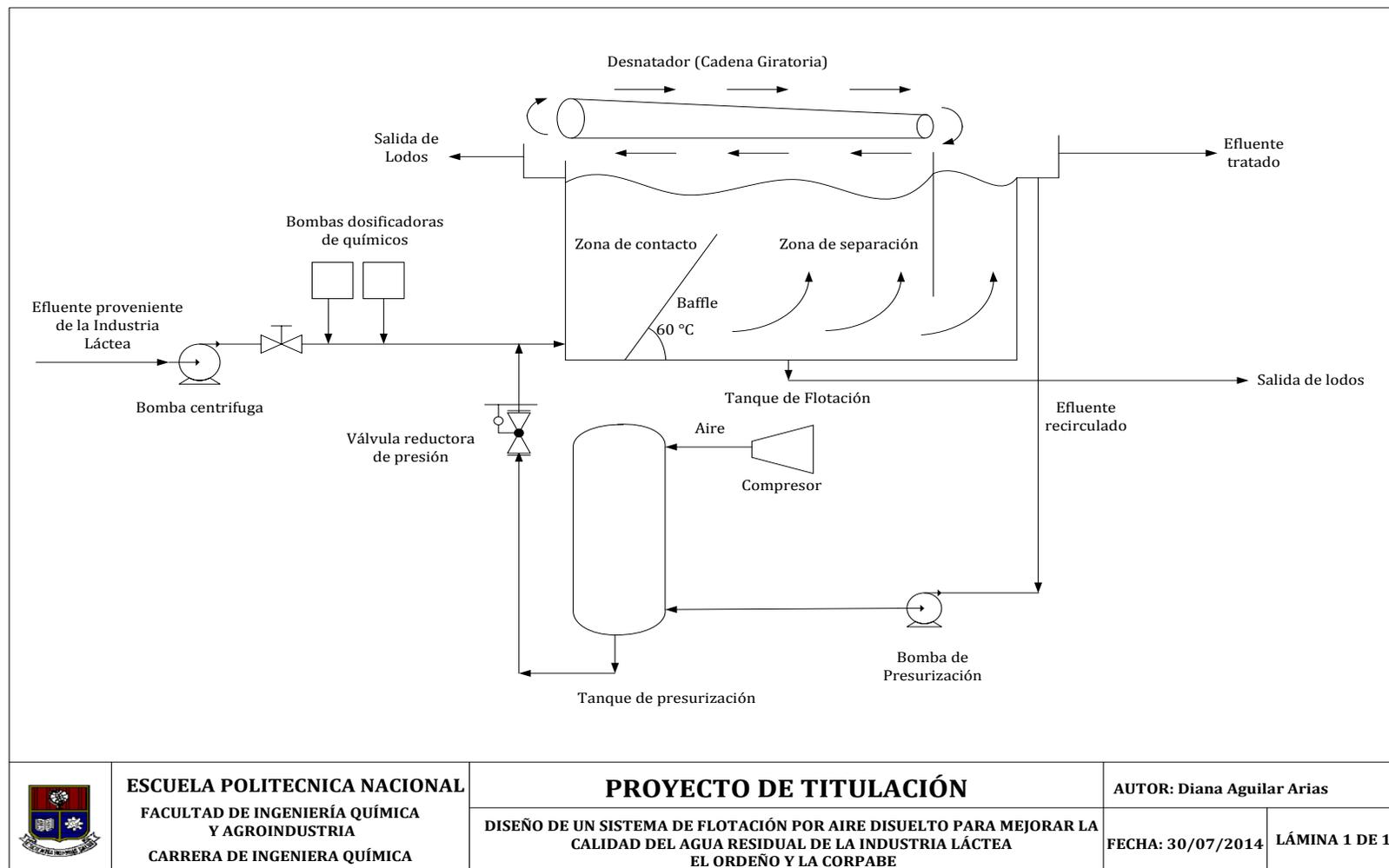


Figura 3.21. Diseño del sistema de flotación por aire disuelto (F.A.D) para el tratamiento del agua residual de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe

3.6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

3.6.1 COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

El costo de implementación del sistema FAD en las instalaciones de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe se presenta en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Resultados del costo de implementación del sistema de FAD

Parámetro	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
Ingeniería y diseño	-	10.000	10.000
Instalación y puesta en marcha	-	20.000	20.000
Equipos			
Tanque de flotación por aire disuelto, forma rectangular, construida en acero al carbón de 5 mm y 3 mm de espesor	1	40.000	40.000
Compresor de 7.5 HP	1	1.500	1.500
Bomba de presurización, trifásica de 3HP, 220 v	1	850	850
Tanque de presurización en acero inoxidable 316, de 5 mm de espesor	1	5.000	5.000
Sistema de recolección de lodos (cadena Giratoria)	1	5.000	5.000
Bombas dosificadoras, marca PULSAFEEDER, capacidad 30 GPD	2	405	810
Moto reductor de 2 PH trifásico, 4RPM	1	1.600	1.600
Materiales			
Válvula reductora de presión marca EUROPE ITAP 143, de 2 plg en acero inoxidable	1	140	140
Tablero eléctrico que incluye: relés térmicos, contactores, PLC o programador	1	8.000	8.000
Accesorios: válvulas, tubería, test, codos, reducciones, universal de 2plg en PVC, manómetros etc.	-	5.000	5.000
TOTAL			97.900

El costo total para la implementación del sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento del agua residual de la Industria Láctea es \$ 97.900. Los precios de cada equipo y materiales del sistema son valores vigentes en el mercado.

3.6.2 COSTO DE OPERACIÓN

El costo de operación se enfoca en el precio de los productos químicos requeridos para incrementar la eficiencia del proceso. Mediante la prueba de jarras se determinó que la dosificación óptima de coagulante químico es de 35 mg/L y de floculante igual a 0,5 mL. Las pruebas se realizaron en vasos de precipitación de 500 mL. Sobre la base de estos resultados, se determinó los kg de químico requerido para el tratamiento de un m³ de agua.

La Tabla 3.27 muestra el costo de m³ de agua tratada mediante el tratamiento de flotación por aire disuelto. Se establece el costo de los productos químicos con base a precios vigentes del mercado.

Tabla 3.27. Resultados del costo de operación del sistema de FAD

Parámetro	Cantidad	Unidad	Valor Unitario \$	Valor Total \$
Caudal	500	m ³ /día	-	-
Poli coluro de aluminio (sólido)	17,5	kg	2.20	38.5
Floculante (líquido)	1000	kg	0.60	300
TOTAL				338.50

$$\text{Costo de tratamiento por m}^3 \text{ de agua} = \frac{\$ 338.50}{500 \text{ m}^3/\text{día}} = 0.68 \$/\text{m}^3$$

$$\text{Costo de tratamiento por m}^3 \text{ de agua} = 0.68 \$/\text{m}^3$$

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- La caracterización de la muestra compuesta del efluente de la Industria Láctea el Ordeño y la Corpabe, permitió verificar que los parámetros fisicoquímicos analizados (pH, DQO, DBO₅, ST, SST y SS) se encuentran sobre los límites permitidos de acuerdo a la normativa ambiental vigente TULSMA
- El equipo de flotación por aire disuelto construido a escala laboratorio es factible, ya que permitió obtener las condiciones óptimas de operación (presión, porcentaje de reciclaje, dosis de coagulante químico) requeridas para el diseño del sistema propuesto.
- Debido a la gran eficiencia operativa del equipo, puede ser utilizado para realizar estudios de tratabilidad de efluentes con alto contenido de sólidos suspendidos, aceites y grasas.
- Las mejores condiciones de operación en el sistema de flotación por aire disuelto que permitieron obtener altos porcentajes de remoción de los contaminantes corresponden a una presión de 50 psi, 40 % de reciclaje y 35 mg/L de coagulante químico.
- La eficiencia de un sistema de flotación por aire disuelto depende principalmente del valor de la relación entre la cantidad de aire liberado por la despresurización y de sólidos presentes en el efluente (A/S) requerida para lograr un determinado grado de clarificación.
- La relación A/S con mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes y que produce una separación óptima fue de 0,021, trabajando a 50 psi y con un porcentaje de reciclaje del 40 %.

- A bajos valores de relación A/S en relación con el valor óptimo, los flóculos no poseen la cantidad adecuada de aire para producir la flotación, mientras que a elevados valores de A/S, la separación ineficiente de los sólidos se debe a la destrucción de los flóculos ocasionada por una liberación excesiva de agua presurizada.
- La dosificación previa del poli cloruro de aluminio (coagulante) aumenta la eficiencia del sistema de F.A.D (flotación por aire disuelto).
- El sistema propuesto con las mejores condiciones de operación mejora su eficiencia con la combinación del proceso de neutralización y filtración, que permitieron obtener porcentajes de remoción del 62,5 % de la DQO, 62,6 % de la DBO₅, 91,2 % de aceites y grasas, 88,6 % de sólidos suspendidos, 80,4 % de sólidos totales y un 82,5 % de sólidos sedimentables.
- El costo total calculado para la implementación de la alternativa de tratamiento del efluente generado por la Industria Láctea El Ordeño y la Corpabe fue de \$ 97.900, con un costo de \$0,68/m³ de efluente tratado.

4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar un tratamiento biológico posterior al tratamiento de flotación por aire disuelto para disminuir aún más la carga contaminante del DQO y el DBO₅.
- Realizar un control permanente del pH del efluente antes del ingreso hacia el tanque de flotación, ya que la efectividad de los productos químicos dependen de este factor.
- Para efluentes con valores de pH sobre 9, se recomienda dosificar ácido clorhídrico o ácido sulfúrico en el tanque de homogenización, para que los productos químicos actúen eficientemente en intervalos de pH comprendidos entre 7-9.
- Para subir el pH cuando se encuentre inferior a 7, se puede reemplazar la dosificación de sosa cáustica por cal, ya que realiza la misma función y es más económica.
- Para asegurar la saturación del aire, se recomienda realizar un control permanente de la temperatura del agua antes del ingreso al proceso de tratamiento, debido a que elevadas temperaturas la solubilidad del gas disminuye.
- Para los lodos generados en el tanque de flotación se recomienda la implementación de lechos de secado, además de una caracterización fisicoquímica, con el fin de determinar la factibilidad de la realización de un abono orgánico sintético.
- Se sugiere la implementación de un tanque de homogenización y rejillas antes del sistema del F.A.D para aumentar la eficiencia del sistema.

- Estudiar el efecto de una bomba multietapa de presión en reemplazo del tanque y bomba de presurización en la eficiencia de la generación de burbujas de aire.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA y WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (21va. ed.). Washington, Estados Unidos: APHA
2. American Water Works. (2002). *Calidad y Tratamiento del Agua: Manual de Suministros de Agua Comunitaria*. (5ta.ed.). Madrid: McGraw Hill
3. Andía, Y. (2000). Tratamiento de Agua. Coagulación y Floculación. Recuperado de <http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf> (Julio, 2014)
4. AINIA Instituto Tecnológico Agroalimentario. (1996). *Mejores Técnicas Disponibles en la Industria Láctea*. Recuperado de <http://www.prtr-es.es/data/images/la%20industria%20l%C3%A1ctea3686e1a542dd936f.pdf> (Diciembre, 2013).
5. BID. y ANDI. (1997). *Manual de Caracterización de Aguas Residuales Industriales*. (2da.ed.). Medellín, Colombia: Ideas Gráficas
6. Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2002). *Sistema de Manejo de Aguas Residuales para núcleos pequeños y descentralizados Tomo 2*. (1ra. ed.). Santa Fé de Bogotá, Colombia: McGraw – Hill
7. Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales en pequeñas Poblaciones*. (1era.ed.). Colombia: McGraw Hill
8. Casas, F. (2009). “*Caracterización de los Sistemas de Tratamiento de Riles*

en la Industria Lechera y Propuesta de Mejora". (Proyecto de titulación previo a la obtención de título de Ingeniero en Alimentos). Escuela de Ingeniería en Alimentos, Valdivia, Chile

9. Carbotecnia. Tratamiento de agua y aire. (2004). *El carbón activado en el tratamiento de aguas residuales*. Recuperado de <http://www.carbotecnia.info/PDF/boletines/AR-001.pdf> (Enero, 2014).
10. Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL). (2002). *Prevención de la contaminación de la Industria Láctea*: Barcelona: España
11. Corpabe. 2013. *Plan de manejo de riesgos para la producción y comercialización de leche líquida de la Corporación Ecuatoriana de Alimentos y Bebidas*. Mejía, Ecuador
12. EPA. (1999). *Boletín Técnico. Zeolita. Un Adsorbente Versátil de Contaminantes del aire*. Recuperado de <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/zeolits2.pdf> (Enero, 2014)
13. Ecuadorambiental. 2012. *Auditoría Ambiental de Cumplimiento para la producción y comercialización de leche en polvo de la Planta Industrial de la Sociedad Ganadera El Ordeño*. Mejía, Ecuador
14. Féris, L. Gallina, C y Rubio, J. (2001). Optimizing dissolved air flotation design and saturation. *Water Science and Technology*, 43(8), 145-157.
15. Forero, J. Díaz, J. y Blandón, V. (1999). Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), 67-75 Recuperado de

<http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n5/v1n5a06.pdf> (Enero, 2014)

16. Hendricks, D. (2006). Flotation. *Water Treatment Unit Processes. Physical and Chemical*. (pp. 233-247). USA: Taylor & Francis Group
17. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2006). *Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y Conservación de muestras*. Recuperado de http://www.grupoquimicomarcos.com/downloads/medios_de_preservacion_de_muestras.pdf (Enero, 2014).
18. Lehman, A. (2000). *Manual de Diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales*. (2da.ed.). Colombia: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
19. Laboratorio de la Dirección Nacional de Medio Ambiente. (1996). *Manual de Procedimientos Analíticos para Aguas y Efluentes*. Recuperado de http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinamica.pdf (Enero, 2014).
20. MetCalf, E. (1977). *Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales*. (3ra.ed.). Madrid: Labor S.A
21. MetCalf, E. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. (3ra. ed.). Madrid: McGraw Hill
22. Méndez, R. Novelo, A. Coronado, V. Castillo, E. y Sauri. M. (2008). Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación por aire disuelto. *Redalyc*. 12(1), 14.

23. Ministerio del Ambiente. (2011). *Estudio para conocer los Potenciales Impactos Ambientales y Vulnerabilidad relacionada con las sustancias Químicas y Tratamiento de Desechos Peligrosos en el Sector Productivo del Ecuador*. Recuperado de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART11.pdf> (Enero, 2014).
24. Ministerio del Ambiente. (2005). Texto Unificado de Legislación y Saneamiento Medioambiental (TULSMA). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso Agua*. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6078/36/LIBRO%20VI%20Anexo%201%20Normas%20Recurso%20Agua.pdf> (Diciembre, 2013).
25. Martín, I. Salcedo, R y Font, R. (2011). *Mecánica de Fluidos. Tema 5. Operaciones separación sólido-fluido*. Recuperado de http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/11/tema5_operaciones%20separacion.pdf (Enero, 2014)
26. Nalco. (1989). *Manual del Agua. Su naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones*. (1era.ed.). México:McGrawHill.
27. Nemerow, N. y Dasgupta, A. (1998). Flotación. *Tratamiento de Vertidos Industriales Peligrosos*. (pp. 136). Madrid: Díaz de Santos S.A
28. Pacururu, A. (2011). *Plan de Manejo Ambiental para la Industria Láctea "Productos San Salvador"*. (Proyecto de titulación previo a la

obtención de título de Ingeniero Biotecnólogo Ambiental). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

29. Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. (1era.ed.). Barcelona: Reverté
30. Romero, J. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de Diseño*. (1era.ed.). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería
31. Ross, C. Smith, B, Valentine, G y Environmental Treatment Systems. (2000). Rethinking Dissolved Air Flotation (DAF) Design for Industrial Pretreatment. Recuperado de <http://www.etsenvironmental.com/wp-content/uploads/rethinkingDAF.pdf> (Junio, 2014).
32. Rojas, R. (2002). *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Curso Internacional "Gestión de Tratamiento de Aguas Residuales". Lima. Perú. Recuperado de <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/ARESIDUAL2012-2/fundamentoaguasresiduales.pdf> (Enero, 2014).
33. Rojas, C. Rincón, N. Díaz, A. Colina, G. Behling, E. Chacín, E. y Fernández, N. (2008). Evaluación de una unidad de flotación con aire disuelto para el tratamiento de aguas aceitosas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Zulia*. 31(1), Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702008000100007&script=sci_arttext (Febrero, 2014).
34. Sainz, A. (2005). *Tecnologías para la Sostenibilidad: Procesos y Operaciones Unitarias en Depuración de Aguas Residuales*.

(1era.ed.). Madrid: Fundación EOI

35. Salas, G. (2003). Proceso de Flotación por Aire Disuelto en el Tratamiento del Agua Residual de Bombeo en la Industria de harina de pescado. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química* 6(1), 60.
36. Torres, C. (2006). *Procedimiento para la Prueba para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)*. Recuperado de <http://www.utp.ac.pa/documentos/2011/pdf/PCUTP-CIHH-LSA-226-2006.pdf> (Diciembre, 2013)
37. Tapia, Arturo. y Cázares, Enrique. (2009). *Comparación de los modelos cinéticos para Flotación con aire disuelto*. Recuperado de <http://www.arturotapia.com/Ingenieria/ArticuloDAF.pdf> (Enero, 2014).
38. Turris, A. Yabroudi, S. Valbuena, B. Gutierrez, C. Cárdenas, C. Herrera, L. y Rojas, C. (2011). Tratamiento de Aguas de Producción por Flotación con Aire Disuelto. *Interciencia*, 36(3), 211-218. Recuperado de http://www.interciencia.org/v36_03/211.pdf (Febrero, 2014)
39. Trujillo, A. y Herrera, L. (1995). Desarrollo de una unidad de piloto de flotación con aire disuelto. Evaluación de los parámetros de diseño. *Instituto de Investigaciones Petroleras*, 18(3), 343-354. Recuperado de <http://www.revistas.luz.edu.ve/index.php/rtz/article/viewFile/6222/597> 3(Diciembre, 2013)
40. Velázquez, M. y Ordorica, M. (2009). *Ácidos, Bases, pH y Soluciones*

Reguladoras. Recuperado de <http://www.bioquimica.dogsleep.net/Teoria/archivos/Unidad24.pdf>(Diciembre, 2013)

41. Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I. Teoría. Tomo I.* Recuperado de <http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/620/1/BVCI0000570.pdf> (Enero, 2014)
42. Veall, F. (1993). Sistema de tratamiento primario (físico). *Estructura y funcionamiento de mataderos medianos en países de desarrollo.* (pp. 162-163). Roma, Italia.
43. Wang, L. Fahey, E. y Wu, Z. (2005). Dissolved Air Flotation. *Physicochemical Treatment.* (pp. 431-493). Totowa, New Jersey: Humana Press

ANEXOS

ANEXO I

**VELOCIDAD ASCENSIONAL DE BURBUJAS DE AIRE EN
FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA**

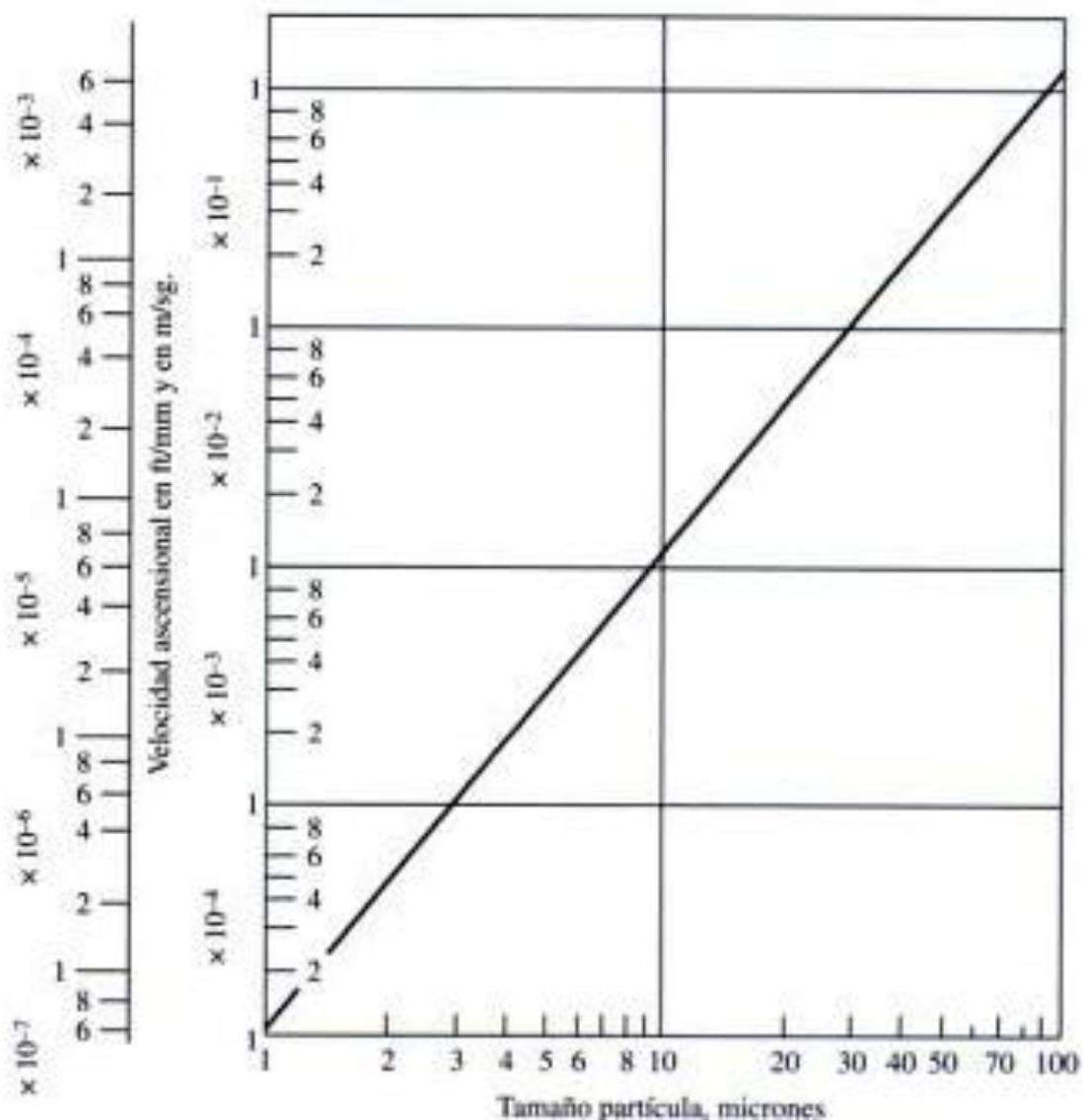


Figura AI.1. Velocidad ascensional de burbujas de aire en función del tamaño de la partícula
(Nemerow y Dasgupta, 1998, p. 137)

ANEXO II

DETERMINACIÓN DE ACEITES Y GRASAS CON BASE EN EL MÉTODO APHA 5520 B

a. Procedimiento

- Se homogenizó la muestra codificada agitando su envase y se descargó una alícuota en un vaso de precipitación adecuado.
- Se realizó una dilución 1:10 donde se colocó 5 mL de muestra a un balón aforado de 50 mL, después se agregó agua destilada al balón hasta su marca y se homogenizó la mezcla agitando unos segundos.
- Se colocó 300 mL de la muestra a un embudo de separación de 500 mL.
- Se colocó 5 mL de ácido sulfúrico 14.5 N contenido en un botellón a la muestra contenida en el embudo de separación, utilizando una pipeta graduada de 5 mL
- Se colocó 25 mL de hexano contenido en un botellón a la muestra contenida en el embudo de separación, utilizando una pipeta graduada de 25 mL
- Se homogenizó la mezcla agitando unos segundos y se sacó los gases contenidos en el embudo
- Se dejó reposar la emulsión contendida en el embudo de separación.
- Se descargó la fase inferior formada en el embudo de separación a un vaso de precipitación adecuado. Previo a este paso, se sacó la tapa del embudo de separación para que no se forme vacío al interior del embudo.
- Se colocó un balón tarado sobre un vaso de precipitación, bajo el embudo de separación.
- Se descargó la muestra contenida en el embudo de separación por medio del orificio pequeño con algodón al balón tarado abriendo la llave del embudo.
- Se colocó el balón en el rota vapor sujetando con una pinza.

- Se encendió el rota vapor, y se reguló la velocidad de rotación a la mitad; y la temperatura a 60° C (se evaporó el hexano).
- Se evaluó el resultado pesando el balón en la balanza analítica.
- Se determinó el contenido de aceites y grasas de cada muestra aplicando las Ecuaciones [AI.1]

$$\frac{mg \text{ aceites y grasas}}{L} = \frac{A - B * 1000}{mL \text{ de muestra}} \quad [AI.1]$$

Donde:

A = Peso inicial del balón tarado (g)

B = Peso final del balón tarado (g)



Figura AII.1. Resultados de la medida de aceites y grasas en el efluente

ANEXO III

DETERMINACIÓN DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) CON BASE EN EL MÉTODO APHA 5210 B

a. Procedimiento

- Se homogenizó la muestra codificada agitando su envase y se descargó una alícuota en un vaso de precipitación adecuado
- Se seleccionó la muestra de análisis de acuerdo Tabla All.2.
- Se reguló el pH de la muestra contenida en el vaso a 7, con Hidróxido de Sodio contenido en un vaso de precipitación adecuado y papel indicador de pH.
- Se llenó el volumen de muestra seleccionado en la Tabla All.1, de la muestra contenida en el vaso de precipitación a una probeta graduada adecuado al volumen de muestra seleccionado.
- Se transfirió la muestra contenida en la probeta a un frasco oscuro de análisis de DBO₅.
- Se agregó 3 gotas de KOH al capuchón negro de análisis de DBO. El KOH sirve para inhibir otra sustancia que no sea CO₂
- Se introdujo el agitador magnético al interior del frasco, y se coloca el capuchón negro y azul sobre el frasco
- Se encendió pulsando los dos botones del capuchón azul y se anotó el número de capuchón.
- Se introdujo el frasco en el termostato
- Finalmente se sacó el frasco del termostato al término de 5 días, y se presionó el botón de lectura del capuchón azul.
- El resultado del capuchón se multiplicó por el factor de la muestra seleccionada, y se determinó el DBO₅ como mg O₂/L.
- El capuchón azul de análisis de DBO lee la cantidad de CO₂ que se desprende de las bacterias al interior del frasco.

Tabla AIII.1. Selección de la cantidad de muestra del efluente con respecto al rango de medido del DBO₅

Rango (mg O ₂ /l DBO)	Muestra (mL)	Factor	Gotas de Inhibidor de Bacterias Nitrificante
0 – 40	428	1	10
0 – 80	360	2	10
0 - 200	244	5	5
0 - 400	157	10	5
0 – 8000	94	20	3
0 - 2000	56	40	3
0 - 4000	21,7	100	1

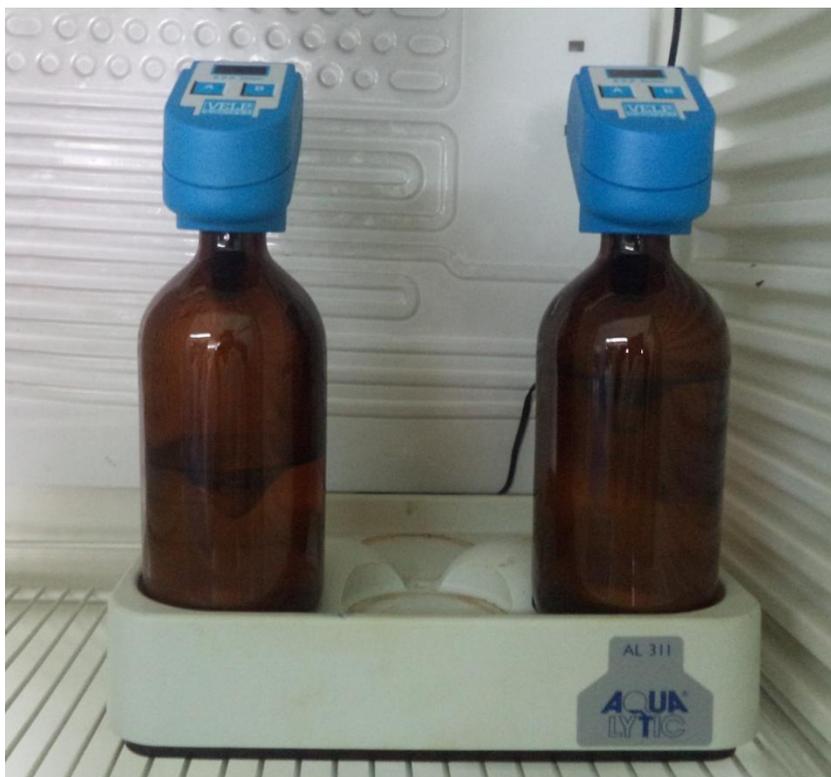


Figura AIII.1. Equipo para la medida del DBO₅

ANEXO IV

DETERMINACIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) CON BASE EN EL MÉTODO APHA 5210 B

a. Procedimiento

- Se homogenizó la muestra codificada agitando su envase.
- Se encendió el reactor de DQO para encubar el vial con la muestra.
- Se pipeteó 2 mL de la muestra contenida en el frasco a un vial, utilizando una pipeta graduada de 2 mL y se homogenizó la mezcla agitando unos segundos.
- El vial con la muestra se colocó en el reactor de DQO por 120 minutos a 150°C para que se realice la reacción de oxidación
- Se sacó los viales del reactor de DQO y se colocaron en una porta viales para ser enfriados a temperatura ambiente.
- Se colocó el vial identificado como blanco para encerar el equipo HACH.
- Se colocó el vial con la muestra analizada y se realizó la lectura en el equipo HACH.
- El resultado final se multiplicó por el factor de la dilución y se obtiene la medida de DQO como mg O₂/L.

ANEXO V

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES CON BASE EN EL MÉTODO APHA 2540 B

a. Procedimiento

- Se homogenizó la muestra codificada agitando su envase y se descargó una alícuota en un vaso de precipitación adecuado.
- Se pesó un crisol en la balanza analítica KERN, utilizando una pinza y se etiquetó.
- Se colocó el crisol en el baño maría, utilizando una pinza.
- Se llenó 100 mL de la muestra contenida en el vaso de precipitación al crisol etiquetado que se encuentra en el baño maría, utilizando una probeta graduada.
- Se dejó que el crisol se seque completamente en el baño maría por evaporación
- Se introdujo el crisol en la estufa por dos horas, utilizando una pinza.
- Se colocó los crisoles en el desecador por media hora, utilizando una pinza.
- Se sacó el crisol del desecador y se pesó en la balanza analítica KERN, utilizando una pinza.
- El resultado final se determinó como mg/l de sólidos totales, mediante la Ecuación [AIV.1]

$$\frac{\text{mg sólidos totales}}{L} = \frac{A - B * 1000}{\text{mL de muestra}} \quad \text{[AIV.1]}$$

Donde:

A = Peso inicial del crisol (g)

B = Peso final del crisol (g)

ANEXO VI

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES CON BASE EN EL MÉTODO APHA 2540 F

a. Procedimiento

- Se homogenizó la muestra codificada agitando su envase y se descargó una alícuota en un vaso de precipitación adecuado.
- Se llenó la muestra contenida en el vaso a un cono Inhoff hasta la marca 1000 mL.
- Se dejó en reposo la muestra contenida en el cono por 45 minutos y se agitó con una varilla para que se precipiten las partículas pegadas a las paredes.
- Se dejó por 15 minutos adicionales hasta que se complete una hora.
- Las partículas precipitadas en el fondo del cono nos dan el resultado de sólidos sedimentables el mL/L



Figura AVI.1. Cono de sedimentación

ANEXO VII

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS CON BASE EN EL MÉTODO APHA 2540 F

a. Procedimiento

- Se homogenizó la muestra codificada agitando su envase y se descargó una alícuota en un vaso de precipitación adecuado.
- Se realizó la filtración descargando la muestra sobre un embudo con papel filtro colocado en una porta embudos. Para mayor rapidez de filtrado se realizó la filtración al vacío, utilizando el papel filtro de porosidad adecuada y bombas de vacío.
- Se pesó un crisol en la balanza analítica KERN, utilizando una pinza.
- Se colocó el crisol en el baño maría.
- Se llenó 100 mL de la muestra contenida en el vaso de precipitación al crisol etiquetado que se encuentra en el baño maría, utilizando una probeta graduada adecuada hasta la marca 100 mL.
- Se dejó secar el crisol en el baño maría por evaporación.
- Se introdujo el crisol en la estufa por dos horas, utilizando una pinza y luego se colocaron los crisoles en el desecador por media hora.
- Se sacó el crisol del desecador y se pesó en la balanza analítica KERN, utilizando una pinza.
- Se determinó el resultado de Sólidos Disueltos mediante la siguiente Ecuación [AVII.1].

$$\frac{\text{mg sólidos disueltos}}{L} = \frac{A - B * 1000}{\text{mL de muestra}} \quad \text{[AVII.1].}$$

Donde:

A = Peso inicial del crisol (g)

B = Peso final del crisol (g)

ANEXO VIII

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE JARRAS

a. Procedimiento

- Se colocó en cinco jarras de 500 mL el efluente problema.
- Se homogenizó las muestras por un intervalo de 10 minutos.
- Se agregó la dosis de coagulante en el siguiente orden: 30, 35, 40, 45, y 50 mg/L.
- Se agitó las muestras por 1 minuto, girando las paletas a una velocidad de 100 RPM.
- Inmediatamente, se agregó 2 mL de floculante en cada jarra.
- Se disminuyó la velocidad de agitación a 30 RPM, durante 3 minutos.
- Finalmente, se determinó la turbidez y velocidad de sedimentación en cada jarra.



Figura AVIII.1. Equipo de jarras

ANEXO IX
NORMA AMBIENTAL TULSMA PARA DESCARGAS A UN
RECEPTOR DE AGUA DULCE

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehídos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml		Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de	TPH	mg/l	20,0

Figura AIX.1. Norma Ambiental TULSMA para descargas a un receptor de agua dulce

Figura AIX.1. Norma Ambiental TULSMA para descargas a un receptor de agua dulce
(continuación...)

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	15
Organoclorados totales	Concentración de organoclorados totales	mg/l	0,05
Organofosforados totales	Concentración de organofosforados totales.	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		5-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Sedimentables		ml/l	1,0
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	100
Sólidos totales		mg/l	1 600
Sulfatos	SO ₄ ⁼	mg/l	1000
Sulfitos	SO ₃	mg/l	2,0
Sulfuros	S	mg/l	0,5
Temperatura	°C		< 35
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,0
Vanadio		mg/l	5,0
Zinc	Zn	mg/l	5,0

ANEXO X

CÁLCULO DE PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

- **Caudal recirculado presurizado**

El caudal recirculado se calculó con base al porcentaje de reciclo que se detalla en la Tabla 3.22 y para un caudal de 500 m³/día.

$$Q_R = Q * \% R \quad [AX.1]$$

$$Q_R = 500 \frac{m^3}{día} * \frac{40}{100}$$

$$Q_R = 5,79 \frac{L}{s} * 0,4$$

$$Q_R = 2,31 \frac{L}{s}$$

Donde:

Q_R : caudal recirculado presurizado (L/s)

Q : caudal de ingreso al sistema de flotación (L/s)

R : porcentaje de reciclo (%)

- **Solubilidad del aire**

La solubilidad del aire en agua a la presión de operación y presión local atmosférica se calculó a partir de la Ecuación [1.1] en el apartado 1.2.2.3.

Solubilidad de saturación del aire a la presión de operación del tanque igual a 50 psi (3123,59 mmHg) y con una presión de vapor del agua a 30 °C igual a 31,8 mmHg, C_T

$$C_T = C * \frac{P_T - P_V}{760 - P_V} \quad [\text{AX.2}]$$

$$C_T = 15.7 \frac{\text{mL aire}}{\text{L agua}} * \frac{3123,59 - 31,8}{760 - 31,8}$$

$$C_T = 66.65 \frac{\text{mL aire}}{\text{L agua}}$$

Donde:

C_T : solubilidad del aire en agua, a la presión absoluta (mL aire/L de agua)

C : solubilidad del aire en agua, a presión de una atmosfera (mL aire/L de agua)

P_T : presión absoluta del aire (mmHg)

P_V : presión de vapor del agua (mmHg)

Solubilidad de saturación del aire a la presión local atmosférica de Quito igual a 10,7 psi (537,84 mmHg), C_L

$$C_L = C * \frac{P_L - P_V}{760 - P_V} \quad [\text{AX.3}]$$

$$C_L = 15.7 \frac{\text{mL aire}}{\text{L agua}} * \frac{537,84 - 31,8}{760 - 31,8}$$

$$C_L = 10.91 \frac{\text{mL aire}}{\text{L agua}}$$

Donde:

C_L : solubilidad del aire en agua, a la presión absoluta P_L (mL aire/L de agua)

C : solubilidad del aire en agua, a presión de una atmosfera (mL aire/L de agua)

P_L : presión local atmosférica (mmHg)

P_V : presión de vapor del agua (mmHg)

- **Cantidad de aire liberado**

La cantidad de aire liberado en el tanque de flotación, se calculó a partir de la diferencia de solubilidades según la ecuación [1.2] en el apartado 1.2.2.3.

$$C_T - C_L = C * \frac{f * P_T - P_V - P_L - P_V}{760 - P_V} \quad [1.2]$$

$$C_T - C_L = 15.7 \frac{\text{mL aire}}{\text{L agua}} * \frac{0.5 * 3123,59 - 31,8 - 537,84 - 31,8}{760 - 31,8}$$

$$C_T - C_L = 22,42 \frac{\text{mL aire}}{\text{L agua}}$$

- **Relación aire/sólidos (A/S)**

Para determinar el valor de A/S bajo las condiciones descritas en la Tabla 3.22 se calculó a partir de la Ecuación [1.6]. Además se requieren de condiciones determinadas a una temperatura de 30 °C detalladas en la Tabla [AX.1], [AX.2] y [AX.3].

Tabla AX.1. Densidad del aire a una atmósfera

Temperatura ° C	Densidad mg/L
0	1,293
2	1,284
4	1,274
5	1,270
6	1,265
8	1,256
10	1,247
12	1,238
14	1,230
15	1,226
16	1,221
18	1,213
20	1,205
22	1,196
24	1,188
25	1,184
26	1,180
28	1,173
30	1,165
35	1,146
40	1,127

Tabla AX.2. Presión de vapor del agua

Temperatura ° C	Presión de vapor mmHg
0	4,6
2	5,3
4	6,2
6	7,1
8	8,2
10	9,2
12	10,7
14	12,1
15	12,8
16	13,6
18	15,2
20	17,6
22	20,0
24	22,7
25	23,8
26	25,4
28	27,8
30	31,8
40	55,4

Tabla AX.3. Condiciones requeridas para el cálculo del parámetro A/S a una temperatura de 30 °C

Parámetro	Unidad	Valor
C	solubilidad de saturación del aire a una atmósfera (mL/L)	15,7
d	densidad de aire a las condiciones del problema (mg/mL)	0,82
f	fracción de aire disuelto a la presión absoluta de operación	0,5
P_T	presión absoluta de operación (mmHg)	3123,59
P_V	presión de vapor del agua a la temperatura de operación (mmHg)	31,8
P_L	presión local atmosférica (mmHg)	537,84
S_o	concentración de sólidos suspendidos del afluente (mg/mL)	356
Q_R	caudal recirculado presurizado (L/s)	2,31
Q	caudal de ingreso al sistema de flotación (L/s)	5,78

$$\frac{A}{S} = \frac{C * d * Q_R * f * P_T - P_V - P_L - P_V}{S_o * Q * 760 - P_V} \quad [1.6]$$

$$\frac{A}{S} = \frac{15.7 \frac{mL \text{ aire}}{L \text{ agua}} * 0.82 \frac{mg}{L} * 2.31 \frac{L}{s} * 0.5 * 3123.59 - 31.8 - 537.84 - 31.8}{356 \frac{mg}{L} * 5.78 * 760 - 31.8}$$

$$\frac{A}{S} = 0.021$$

- **Cantidad de lodo producido**

El lodo producido por los sólidos suspendidos contenidos en el efluente se calculó a partir de la Ecuación [AX.4].

$$m_{lodos} = S_o - S_f * Q \quad [AX.4]$$

$$m_{lodos} = 356 \frac{mg}{L} - 61.3 \frac{mg}{L} * 20833,33 \frac{L}{h}$$

$$m_{lodos} = 294.7 \frac{mg}{L} * \frac{0.001 \text{ kg}}{1000 \text{ mg}} * 20833,33 \frac{L}{h}$$

$$m_{lodos} = 6,14 \frac{kg}{h}$$

Donde:

m_{lodos} : cantidad de lodos producidos (Kg/h)

S_o : concentración de sólidos suspendidos a la entrada (mg/L)

- S_f : concentración de sólidos suspendidos en la salida (mg/L)
 Q : caudal de ingreso al sistema de flotación (L/h)

- **Cantidad de coagulante químico dosificado**

La cantidad de coagulante químico aplicada al efluente al ingreso del tanque de flotación se calculó a partir de la Ecuación [AX.5].

$$m_{quimico} = Q * C_Q \quad [AX.5]$$

$$m_{quimico} = 20,83 \frac{m^3}{h} * 35 \frac{g}{m^3}$$

$$m_{quimico} = 729,05 \frac{g}{h} * \frac{1 kg}{1000 g}$$

$$m_{quimico} = 0,73 \frac{kg}{h}$$

Donde:

- $m_{quimico}$: Cantidad de coagulante químico (kg/h)
 Q : caudal de ingreso al sistema de flotación (m³/h)
 C_Q : concentración de coagulante químico (g/m³)

ANEXO XI

DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE FLOTACIÓN DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

- **Área superficial del tanque de flotación**

El área superficial del tanque de flotación se calculó a partir de la Ecuación [AXI.1] del Anexo XI.

$$A_s = \frac{Q + Q_R}{C_s} \quad \text{[AXI.1]}$$

$$A_s = \frac{500 \frac{m^3}{día} + 199,58 \frac{m^3}{día}}{120 \frac{m^3}{m^2 * día}}$$

$$A_s = 5,83 m^2$$

Donde:

A_s : área superficial del tanque de flotación (m^2)

Q : caudal de ingreso al sistema de flotación ($m^3/día$)

Q_R : caudal recirculado presurizado ($m^3/día$)

C_s : carga superficial ($m^3/m^2*día$)

- **Volumen del tanque de flotación (prisma rectangular)**

El volumen total del tanque de flotación consta del volumen del prisma y de la pirámide rectangular como se observa en la Figura [AXI.1].

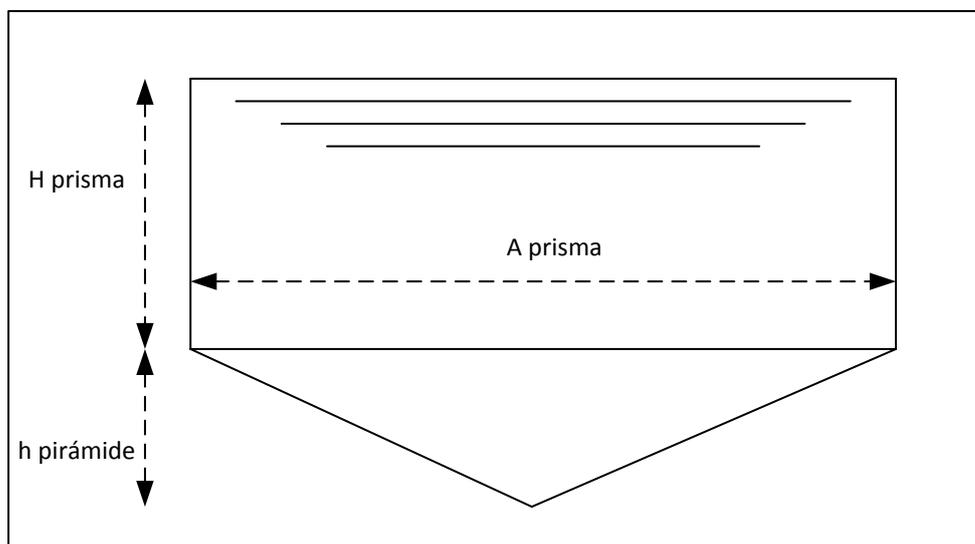


Figura AXI.1. Forma del tanque de flotación

Para el volumen del prisma rectangular se consideró un tiempo de retención de 30 minutos y un factor de seguridad de 1,35. Los cálculos respectivos se detallan en la Ecuación [AXI.2].

$$V_{prisma} = Q + Q_R * t_{flot} * f \quad [AXI.2]$$

$$V_{prisma} = 500 \frac{m^3}{día} + 199,58 \frac{m^3}{día} * 0,0208 día * 1,35$$

$$V_{prisma} = 19,64 m^3$$

Donde:

V_{prisma} : volumen del prisma rectangular (m^3)

Q : caudal recirculado presurizado ($m^3/día$)

Q_R : caudal de ingreso al sistema de flotación ($m^3/día$)
 t_{flot} : tiempo de retención en el tanque de flotación (día)

- **Ancho del tanque de flotación (prisma rectangular)**

Una vez obtenido el volumen y el área superficial del tanque, el ancho del prisma rectangular se calculó a partir de la Ecuación [AXI.3].

$$A_{prisma} = \frac{V_{prisma}}{A_S} \quad [AXI.3]$$

$$A_{prisma} = \frac{19,64 \text{ m}^3}{5,83 \text{ m}^2}$$

$$A_{prisma} = 3,36 \text{ m}$$

Donde:

A_{prisma} : ancho del prisma rectangular (m)

V_{prisma} : volumen del prisma rectangular (m^3)

A_S : área superficial del tanque de flotación (m^2)

- **Largo del tanque de flotación (prisma rectangular)**

El largo del prisma rectangular se calculó a partir de la Ecuación [AXI.4]. La altura máxima del tanque se consideró de 1.2 m.

$$V_{prisma} = A_{prisma} * H_{prisma} * L_{prisma} \quad [AXI.4]$$

$$19,64 \text{ m}^3 = 3,36 \text{ m} * 1,2 \text{ m} * L_{prisma}$$

$$L_{prisma} = 4,87 \text{ m}$$

Donde:

L_{prisma} : largo del prisma rectangular (m)

A_{prisma} : ancho del prisma rectangular (m)

V_{prisma} : volumen del prisma rectangular (m^3)

H_{prisma} : altura del prisma rectangular (m)

- **Volumen del tanque de flotación (pirámide rectangular)**

El volumen de la pirámide rectangular se calculó a partir de la Ecuación [AXI.5] Se consideró una altura de 0,60 m para su dimensionamiento.

$$V_{piramide} = \frac{A_{base} * h_{piramide}}{3} \quad \text{AXI.5]$$

$$V_{piramide} = \frac{(3,36 \text{ m})^2 * 0,60 \text{ m}}{3}$$

$$V_{piramide} = 2,3 \text{ m}^3$$

Donde:

$V_{piramide}$: volumen de la pirámide rectangular (m^3)

A_{base} : área de la base (m^2)

$h_{piramide}$: altura (m)

- **Volumen total del tanque de flotación**

El volumen total del tanque de flotación se calculó a partir de la Ecuación [AXI.6]

$$V_{flot} = V_{prisma} + V_{piramide}$$

[AXI.6]

$$V_{flot} = 19,64 \text{ m}^3 + 2,3 \text{ m}^3$$

$$V_{flot} = 21,94 \text{ m}^3$$

Donde:

V_{tflot} : volumen total del tanque de flotación (m^3)

V_{prisma} : volumen del prisma rectangular (m^3)

$V_{piramide}$: volumen de la pirámide rectangular (m^3)

ANEXO XII

DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE PRESURIZACIÓN DEL SISTEMA FAD

- **Volumen del tanque de presurización**

El volumen del tanque de presurización que depende del caudal de recirculación y el tiempo de retención en el tanque, se calculó a partir de la Ecuación [AXII.1].

$$V_{pres} = Q_R * t_{pres} * f \quad [AXII.1]$$

$$V_{pres} = 2,31 \frac{L}{s} * \frac{1m^3}{1000 L} * 120 s * 1,35$$

$$V_{pres} = 0,37 m^3$$

Donde:

V_{pres} : volumen del tanque de presurización (m^3)

Q_R : caudal recirculado presurizado (L/s)

t_{pres} : tiempo de retención en el tanque de presurización (s)

f: factor de seguridad

- **Altura del tanque de presurización**

Se consideró un diámetro del tanque de presurización igual a 0,60 m. La Ecuación [AXII.2] detalla el respectivo cálculo.

$$V_{pres} = \pi * r^2 * h \quad [AXII.2]$$

$$0,37 m^3 = \pi * 0,30 m^2 * h$$

$$h = 1,3 \text{ m}$$

Donde:

V_{pres} : volumen del tanque de presurización (m^3)

r : radio del tanque de presurización (m)

h : altura del tanque de presurización (m)

