

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL**



TESIS:

**“REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS EN UNA CELDA DE
FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTOS Y EVALUACIÓN DEL
EFECTO PRODUCIDO POR LA UTILIZACIÓN DEL
SULFATO DE ALUMINIO $Al_2(SO_4)_3$ ”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

LUIS FELIX GUERRA CCORA

ASESOR:

Dra. Ing. ROSA ELENA YAYA BEAS (Ph.D.)

LIMA - PERU

2020

DEDICATORIAS

A Dios por permitirme llegar hasta donde estoy.

A mis padres y hermanos por su constante apoyo y respaldo durante mi formación personal y profesional.

A mi novia y mis hijas porque son la motivación que día a día me impulsa a salir adelante.

*A mi compañero de profesión y amigo Ing. Álvaro Espinoza Vigo, que en paz descanse y de Dios goce.
¡Algún día nos volveremos a encontrar!*

AGRADECIMIENTO

A mi asesora Dra. Ing. Rosa Elena Yaya Beas, por brindar sus conocimientos y experiencia para el mejor desarrollo de mi tesis.

A la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería por brindar acceso al Laboratorio de Investigación del Agua y permitir la utilización de sus equipos.

A la empresa Ingenieros Consultores en Agua y Saneamiento, por proveer el acceso a sus instalaciones y permitir la utilización de sus equipos.

Al Bach. Ing. Química Oscar López Artica, quien, en base a su experiencia, brindó permanentemente sugerencias para el muestreo y análisis de aceites y grasas en aguas residuales.

A Juan Gutierrez Chavez, quién, a través de DISAL, permitió la provisión de aguas residuales provenientes de una industria alimentaria.

A Max Jiménez Vilcayauri, por facilitar la provisión de aguas residuales provenientes de establecimientos de comida.

A Kremlin Cornejo Osorio y Miguel Cueva por brindarme asistencia en el montaje del prototipo y en las actividades complementarias de mi tesis.

IV

ÍNDICE

DEDICATORIAS	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE	IV
DEFINICIONES	IX
ABREVIATURAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIV
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	2
2.1. ANTECEDENTES	2
2.2. JUSTIFICACIÓN	3
2.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2.4. OBJETIVOS	5
2.4.1. OBJETIVO GENERAL	5
2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.5. HIPÓTESIS	5
2.6. VARIABLES DEL ESTUDIO	5
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	6

3.1.	SISTEMAS DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF).....	7
3.1.1.	CELDA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO	10
3.1.2.	RELACION AIRE UTILIZADO/ACEITES Y GRASAS (A/G) EN UNA CELDA DE FLOTACION POR AIRE DISUELTO (DAF)	12
3.2.	OTROS PROCESOS Y OPERACIONES INVOLUCRADOS POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.....	15
3.2.1.	MEZCLA RÁPIDA	15
3.2.2.	COAGULACIÓN	15
3.2.3.	FLOCULACIÓN	18
3.2.4.	SEDIMENTACIÓN.....	19
3.3.	PRESENCIA DE ACEITES Y GRASAS EN AGUAS RESIDUALES.....	21
3.3.1.	ACEITES Y GRASAS EN ESTADO LIBRE.....	21
3.3.2.	ACEITES MECÁNICAMENTE EMULSIONADAS.....	21
3.3.3.	ACEITES QUÍMICAMENTE ESTABILIZADAS.....	21
3.3.4.	ACEITE QUÍMICAMENTE EMULSIONADAS	22
3.3.5.	ACEITES Y GRASAS ADHERIDAS.....	22
CAPÍTULO 4. MARCO NORMATIVO		23
4.1.	NORMAS APLICABLES.....	23
4.2.	NORMAS REFERENCIALES.....	24
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....		26
5.1.	AGUAS RESIDUALES UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN.....	26
5.1.1.	ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES	26
5.1.2.	PROTOCOLO DE MUESTREO	32

VI

5.1.3. MUESTRAS UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN	33
5.2. PROTOTIPOS EXPERIMENTALES	34
5.2.1. CELDA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO	34
5.2.2. PRUEBA DE JARRAS	36
5.3. OPERACIÓN DE LOS PROTOTIPOS	38
5.3.1. CELDA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO	38
5.3.2. PRUEBA DE JARRAS	40
5.4. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	42
5.4.1. ETAPA PRELIMINAR: DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CELDA DE FLOTACIÓN.....	44
5.4.2. PRIMERA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA ENTRE CANTIDAD DE AIRE UTILIZADO Y CANTIDAD DE ACEITES Y GRASAS A TRATAR.....	45
5.4.3. SEGUNDA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO $Al_2(SO_4)_3$ COMO COAGULANTE	47
5.5. PARÁMETROS OPERACIONALES.....	50
5.5.1. ACEITES Y GRASAS	50
5.5.2. TURBIEDAD	52
CAPÍTULO 6. RESULTADOS.....	53
6.1. ETAPA PRELIMINAR: DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CELDA DE FLOTACIÓN.....	53
6.2. PRIMERA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA ENTRE CANTIDAD DE AIRE UTILIZADO Y CANTIDAD DE ACEITES Y GRASAS A TRATAR.....	57

VII

6.2.1. RELACIÓN A/G Y A/Go PARA CADA MUESTRA.....	59
6.2.2. VALORES ÓPTIMOS A/Go, %Ro y PT' PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ACEITES Y GRASAS (G).....	69
6.3. SEGUNDA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO Al ₂ (SO ₄) ₃ COMO COAGULANTE	71
6.3.1. DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE MEDIANTE PRUEBA DE JARRAS (REFERENCIAL).....	71
6.3.2. DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE MEDIANTE LA CELDA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO	74
6.3.3. RELACIÓN ÓPTIMA A/Go (CON USO DE COAGULANTE).....	77
6.3.4. EFECTO PRODUCIDO POR EL USO DE COAGULANTE EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS.....	79
CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
7.1. PRIMERA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA ENTRE CANTIDAD DE AIRE UTILIZADO Y CANTIDAD DE ACEITES Y GRASAS A TRATAR.....	81
7.1.1. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN PT' y G.....	81
7.1.2. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN %Ro y G.....	82
7.1.3. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN A/Go y G	82
7.2. SEGUNDA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO Al ₂ (SO ₄) ₃ COMO COAGULANTE	89
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
8.1. CONCLUSIONES	90

VIII

8.2. RECOMENDACIONES	92
CAPÍTULO 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	98

DEFINICIONES

EMULSIÓN: Para la presente investigación se denomina emulsión al sistema formado y estabilizado por la presencia de agua y aceites y grasas.

SOLUCIÓN SUPERSATURADA: Es la mezcla homogénea del agua o agua residual con aire a presiones superiores a la presión atmosférica, dentro del tanque de presurización.

MEZCLA AGUA – AIRE: Es la solución supersaturada, obtenida en el tanque de presurización y liberada hacia el tanque de flotación.

PERIODO DE RETENCIÓN: Es el tiempo que una emulsión permanece en un reactor.

TANQUE DE PRESURIZACIÓN: Dispositivo hermético que permite la formación de una solución sobresaturada por la inyección de aire a presiones superiores a la presión atmosférica.

TANQUE DE FLOTACIÓN: Dispositivo que permite la descarga libre de la mezcla agua – aire, proveniente de un tanque de presurización.

CELDA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO: Sistema a escala de laboratorio que permite la simulación de la operación unitaria de flotación por aire disuelto.

PROTOCOLO DE MUESTREO: Conjunto de pautas que rigen el procedimiento de toma de muestras de aguas residuales.

ESTABLECIMIENTO DE COMIDA: Para la presente investigación se refiere a los restaurantes, cuya oferta alimenticia presenta, predominantemente, alto contenido de aceites y grasas.

INDUSTRIA ALIMENTARIA: Para la presente investigación se refiere a empresas dedicadas a la producción de alimentos preparados y precocidos.

ABREVIATURAS

DAF	Dissolves Air Flotation
SST	Sólidos Suspendidos Totales
A/S	Relación entre cantidad de Aire utilizado y Sólidos Suspendidos Totales en el afluente
A/So	Relación óptima entre cantidad de Aire utilizado y Sólidos Suspendidos Totales en el afluente
DBO5	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
A/G	Relación entre cantidad de Aire utilizado y Aceites y grasas en el afluente
A/Go	Relación óptima entre cantidad de Aire utilizado y Aceites y grasas en el afluente
VMA	Valores Máximos Admisibles
LMP	Límites Máximos Permisibles
ECA	Estándares de Calidad Ambiental

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Flotación por aire disuelto con presurización parcial del afluente.....	7
Figura 2	Flotación por aire disuelto con presurización total del afluente	8
Figura 3	Flotación por aire disuelto con presurización de la recirculación.....	8
Figura 4	Muestra de aguas residuales producidas artificialmente	28
Figura 5	Puntos de muestreo de establecimientos de comida	29
Figura 6	Punto de muestreo: Ingreso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales - Industria Alimentaria.....	30
Figura 7	Punto de muestreo: Cámara de bombeo de aguas residuales de la zona de producción de alimentos y embutidos – Industria Alimentaria	31
Figura 8	Celda de flotación: Tanque de Presurización.....	34
Figura 9	Celda de flotación: Tanque de Flotación.....	35
Figura 10	Celda de flotación: Compresor de aire.....	35
Figura 11	Esquema de celda de flotación por aire disuelto.....	36
Figura 12	Prueba de jarras	37
Figura 13	Diagrama de flujo de operación de la celda de flotación	39
Figura 14	Diagrama de flujo de operación de la prueba de jarras para determinación de dosis óptima de coagulante	41
Figura 15	Diagrama de flujo de la investigación	43
Figura 16	Determinación de condiciones de operación de la celda de flotación	99
Figura 17	Comparación visual de la muestra efluente y afluente de la celda de flotación (sin coagulante).....	99
Figura 18	Descarga de la mezcla agua – aire en el tanque de flotación	100
Figura 19	Ensayos en la prueba de jarras	101
Figura 20	Formación de flóculos en la prueba de jarras	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Presión de vapor de agua y solubilidad del aire en agua a presión atmosférica para diferentes valores de temperatura ambiente.....	14
Tabla 2	Normatividad legal vigente exigible al contenido de aceites y grasas de los efluentes de diferentes actividades.....	24
Tabla 3	Estándares de calidad ambiental (ECAs) de agua para la concentración de aceites y grasas.....	25
Tabla 4	Densidad del aceite vegetal.....	27
Tabla 5	Muestras de aguas residuales utilizadas en la investigación	33
Tabla 6	Código de color para la determinación de las condiciones iniciales de operación de la celda de flotación.....	54
Tabla 7	Resultados de etapa preliminar	55
Tabla 8	Rango de valores de presión y volumen de trabajo de la celda de flotación y su funcionamiento.....	55
Tabla 9	Muestra N° 1: Datos Iniciales.....	59
Tabla 10	Muestra N° 1: Resultados.....	59
Tabla 11	Muestra N° 2: Datos Iniciales.....	60
Tabla 12	Muestra N° 2: Resultados.....	60
Tabla 13	Muestra N° 3: Datos Iniciales.....	61
Tabla 14	Muestra N° 3: Resultados.....	61
Tabla 15	Muestra N° 4: Datos Iniciales.....	62
Tabla 16	Muestra N° 4: Resultados.....	62
Tabla 17	Muestra N° 5: Datos Iniciales.....	63
Tabla 18	Muestra N° 5: Resultados.....	63
Tabla 19	Muestra N° 6: Datos Iniciales.....	64
Tabla 20	Muestra N° 6: Resultados.....	64
Tabla 21	Muestra N° 7: Datos Iniciales.....	65
Tabla 22	Muestra N° 7: Resultados.....	65
Tabla 23	Muestra N° 8: Datos Iniciales.....	66
Tabla 24	Muestra N° 8: Resultados.....	66
Tabla 25	Muestra N° 9: Datos Iniciales.....	67
Tabla 26	Muestra N° 9: Resultados.....	67
Tabla 27	Muestra N° 10: Datos Iniciales.....	68
Tabla 28	Muestra N° 10: Resultados.....	68
Tabla 29	Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT' para cada muestra.....	69
Tabla 30	Muestra N° 11: Resultados prueba de jarras	71

XIII

Tabla 31	Muestra N° 12: Resultados prueba de jarras	72
Tabla 32	Muestra N° 11: Resultados celda de flotación (con coagulante)	74
Tabla 33	Muestra N° 12: Resultados celda de flotación (con coagulante)	75
Tabla 34	Muestra N° 11: Datos iniciales	77
Tabla 35	Muestra N° 11: Resultados	77
Tabla 36	Muestra N° 12: Datos iniciales	78
Tabla 37	Muestra N° 12: Resultados	78
Tabla 38	Efecto producido por el uso de coagulante en la celda de flotación	79
Tabla 39	Comparación de aproximación de funciones matemáticas para la correlación A/Go vs G.....	85
Tabla 40	Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson.....	87
Tabla 41	Aproximación de la relación A/Go vs G a una función hiperbólica	88
Tabla 42	Valores críticos "R" de Pearson	102
Tabla 43	Resultados A/G determinados en la investigación	103

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Relación aire sólidos A/S y SST efluente.....	6
Gráfico 2	Esquema de funcionamiento de la celda de flotación por aire disuelto ..	11
Gráfico 3	Condiciones iniciales de operación de la celda de flotación.....	56
Gráfico 4	Muestra N° 1: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	59
Gráfico 5	Muestra N° 2: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	60
Gráfico 6	Muestra N° 3: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	61
Gráfico 7	Muestra N° 4: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	62
Gráfico 8	Muestra N° 5: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	63
Gráfico 9	Muestra N° 6: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	64
Gráfico 10	Muestra N° 7: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	65
Gráfico 11	Muestra N° 8: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	66
Gráfico 12	Muestra N° 9: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	67
Gráfico 13	Muestra N° 10: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	68
Gráfico 14	Valores óptimos: A/Go y PT' en función de G.....	69
Gráfico 15	Valores óptimos: A/Go y %Ro en función de G.....	70
Gráfico 16	Muestra N° 11: Dosis óptima de coagulante (prueba de jarras).....	72
Gráfico 17	Muestra N° 12: Dosis óptima de coagulante (prueba de jarras).....	73
Gráfico 18	Muestra N° 11: Dosis óptima de coagulante mediante celda de flotación por aire disuelto	75
Gráfico 19	Muestra N° 12: Dosis óptima de coagulante mediante celda de flotación por aire disuelto	76
Gráfico 20	Muestra N° 11: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	77
Gráfico 21	Muestra N° 12: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'.....	78
Gráfico 22	Efecto producido por el uso de coagulante en la concentración de aceites y grasas del efluente.....	79
Gráfico 23	Efecto producido por el uso de coagulante en la eficiencia de remoción de aceites y grasas.....	80
Gráfico 24	Correlación A/Go vs G, función exponencial.....	83
Gráfico 25	Correlación A/Go vs G, función lineal	83
Gráfico 26	Correlación A/Go vs G, función logarítmica	84
Gráfico 27	Correlación A/Go vs G, función polinómica.....	84
Gráfico 28	Correlación A/Go vs G, función potencial	85
Gráfico 29	Forma general de la función hiperbólica	86
Gráfico 30	Comparación de la relación A/Go vs G con una función hiperbólica	88

RESUMEN

La presente investigación evalúa un sistema de flotación por aire disuelto (DAF) para la remoción específica de aceites y grasas y el efecto que produce, en la eficiencia de remoción, el uso de sulfato de aluminio como coagulante. Las pruebas se realizaron en dos etapas, con un prototipo de celda de flotación por aire disuelto pre calibrado.

En la primera etapa de la investigación (sin uso de coagulante), se alcanzó eficiencias de remoción de hasta el 90%, dependiendo de la concentración de aceites y grasas del afluente y la relación A/G utilizada. Sin embargo, existe un valor óptimo A/Go, a partir del cual, el incremento de la eficiencia de remoción, requiere un incremento exagerado de la relación A/G, y, en consecuencia, mayores costos de implementación a escala real del sistema planteado.

También se observó que la relación A/Go obtenida decrece y tiende al valor de 0.041, cuando la concentración de aceites y grasas del afluente supera y se aleja de los 500 mg/L, por otro lado, aumenta abruptamente, en la medida de que dicha concentración es inferior y se aleja de los 500 mg/L. Asimismo, la eficiencia óptima de remoción de aceites y grasas (%Ro) crece en forma directa a la concentración de aceites y grasas, manteniéndose siempre por encima del 70% para aguas residuales con más de 500 mg/L y disminuyendo drásticamente, por debajo del 70%, para concentraciones menores a 500 mg/L.

La utilización del sulfato de aluminio como coagulante, a dosis adecuadas, incrementó la eficiencia de remoción de aceites y grasas, inclusive, a dosis óptimas, se alcanzaron eficiencias de remoción cercanas al 90%. Por otro lado, la presión óptima de trabajo, es de 50 psi, siempre que se utilice el sulfato de aluminio como coagulante, contrariamente a lo que ocurre cuando no se utiliza coagulante, en donde la presión óptima de trabajo varía entre 40 y 65 psi.

El funcionamiento óptimo del prototipo planteado de celda de flotación por aire disuelto, requiere presiones de trabajo de entre 40 y 70 psi y volúmenes de trabajo de entre 1.75 y 1.80 litros. Para presiones de trabajo menores a 40 psi, no es posible la descarga completa de la mezcla agua – aire, mientras que para presiones de trabajo mayores a 70 psi la mezcla agua – aire se reestabiliza y genera rebalse.

ABSTRACT

The present investigation evaluates a dissolved air flotation system (DAF) for the specific removal of oils and greases and the effect that the use of aluminum sulfate as a coagulant has on the removal efficiency. The tests were conducted in two stages, with a pre-calibrated dissolved air flotation cell prototype.

In the first stage of the investigation (without the use of a coagulant), removal efficiencies of up to 90% were achieved, depending on the concentration of tributary oils and fats and the A/G ratio used. However, there is an optimal A/Go value, from which, the increase in removal efficiency requires an exaggerated increase in the A/G ratio, and, consequently, higher costs of real-scale implementation of the proposed system.

It was also observed that the A/Go ratio obtained decreases and tends to the value of 0.041, when the concentration of tributary oils and fats exceeds and moves away from 500 mg/L, on the other hand, it increases abruptly, as This concentration is lower and away from 500 mg/L. Likewise, the optimal efficiency of oil and fat removal (% Ro) increases directly to the concentration of oils and fats, always staying above 70% for wastewater with more than 500 mg/L and decreasing dramatically, below 70%, for concentrations less than 500 mg/L.

The use of aluminum sulfate as a coagulant, at adequate doses, increased the efficiency of removing oils and fats, even, at optimal doses, removal efficiencies close to 90% were achieved. On the other hand, the optimal working pressure is 50 psi, provided that aluminum sulfate is used as a coagulant, contrary to what happens when a coagulant is not used, where the optimal working pressure varies between 40 and 65 psi.

Optimal operation of the proposed dissolved air flotation cell prototype requires working pressures between 40 and 70 psi and working volumes between 1.75 and 1.80 liters. For working pressures less than 40 psi, the complete discharge of the water-air mixture is not possible, while for working pressures greater than 70 psi the water-air mixture is stabilized and generates an overflow.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El alto contenido de aceites y grasas en las aguas residuales industriales vertidas a un cuerpo receptor o a los sistemas de alcantarillado sanitario, causa problemas al medio ambiente, por exceder su capacidad de auto purificación y perjudica a las plantas de tratamiento de aguas residuales, porque estos han sido diseñados para tratar efluentes domésticos y no industriales.

La remoción de sólidos y aceites y grasas de un efluente, generalmente se realiza en forma conjunta con procesos y operaciones unitarias de transferencia de sólidos (sedimentación, flotación), aun cuando la remoción del primero favorezca la remoción del segundo, el comportamiento de ambos contaminantes es muy diferente a la acción de un sistema de tratamiento, esto es especialmente notorio cuando los aceites y grasas de un efluente se encuentran en presencia de agentes tensoactivos o productos desengrasantes.

Las investigaciones existentes sobre procesos y operaciones de transferencia de sólidos, relacionan las constantes de diseño (por ejemplo, la tasa de sedimentación de sólidos en sistemas de clarificación y la relación óptima de aire y sólidos en sistemas de flotación) con la características cualitativas y cuantitativas de los sólidos presentes en el agua a tratar y la eficiencia de remoción. Por ello, es importante realizar investigaciones que determinen constantes de diseño que consideren la concentración de aceites y grasas en el agua a tratar y la eficiencia de remoción obtenida en el proceso u operación realizada; más aún, teniendo en cuenta que, en la práctica, se utilizan únicamente trampas de grasa, precedidos de rejillas o tamices de sólidos, como sistemas de tratamiento de aceites y grasas.

CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES

El sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ es actualmente utilizado como coagulante en el tratamiento de agua para consumo humano y en el tratamiento de aguas residuales industriales. Por su parte, Las celdas de flotación por aire disuelto son ampliamente utilizadas para determinar la relación óptima entre cantidad de aire utilizado y sólidos suspendidos totales (A/So) para lograr eficiencias altas de remoción de sólidos suspendidos totales (SST).

En primer lugar Azevedo y Reali, luego de experimentar en celdas de flotación por aire disuelto (con recirculación y utilizando cloruro férrico como coagulante), con muestras cuyas concentraciones promedio fueron de 1750 mg/L de SST, 2550 mg/L de DBO5 y 6000 mg/L de DQO, obtuvieron que la presión óptima de trabajo en la cámara de saturación es de 450 kPA (64 PSI), con lo cual se logró remover hasta un 90% de SST, además encontraron que la dosis óptima de cloruro férrico es 40 mg/L y el porcentaje óptimo de recirculación es 50%.

Por otro lado, Forero, Díaz y Blandón (ICP - Colombia 1999), luego de experimentar con aguas residuales provenientes de la industria del petróleo y gas en una celda de flotación, encontraron que, la presión optima de trabajo es de 45 PSI, con lo cual alcanzaron eficiencias de remoción superiores al 60%, con picos de 95%, del contenido inicial de aceites y grasas, además se encontró que cuando la presión excede a 55 PSI, la estabilidad de los sobrenadantes se ve afectada por la turbulencia, con lo cual la eficiencia de remoción disminuye.

En cuanto a la relación óptima Cantidad de Aire Utilizado y Aceites y Grasas (A/Go) no se encontró información significativa, sin embargo, Trujillo y Herrera (Universidad de Zulia - Venezuela) encontraron que la relación A/S óptima en una unidad piloto de flotación por aire disuelto es de 0.06.

De las investigaciones mencionadas se observa que las celdas de flotación pueden alcanzar eficiencias de remoción de aceites y grasas superiores al 60% para aguas residuales provenientes de la industria del petróleo y gas.

2.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a que Forero, Díaz y Blandón (ICP - Colombia 1999), evaluaron una celda de flotación para aguas residuales provenientes de la industria del petróleo y gas, es necesario investigar e implementar sistemas de flotación por aire disuelto (Dissolved Air Flotation - DAF), con fines de remoción de aceites y grasas para aguas residuales provenientes de la industria alimentaria, y evaluar el efecto que produce el uso del sulfato de aluminio (como coagulante). Todo ello, a fin de viabilizar los costos de tratamiento y optimizar las inversiones en sistemas, que utilicen la flotación entre sus procesos u operaciones.

2.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento poblacional del área urbana del país (1.14% entre los censos del Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI 2007 y 2017), ha generado el aumento de empresas dedicadas a la elaboración de productos orgánicos (como precocidos, derivados de la leche, mataderos, entre otras) y abastecimiento de comida rápida (como pollerías, pizzerías, entre otros), éstas dan origen a grandes caudales de aguas residuales, que son descargadas a la red de alcantarillado pública o a un cuerpo receptor (fuente natural de agua); el mayor porcentaje de estas aguas no son tratadas, generando graves daños a la infraestructura sanitaria o contaminando los cuerpos de agua. Por lo antes expuesto, el organismo de fiscalización ambiental (OEFA) y las Empresas prestadoras de servicios de agua y saneamiento (EPS) vienen aplicando penalidades (como cierre de la actividad y cobro de multas) a las empresas e industrias que no cumplen la normatividad vigente en sus descargas, por lo cual, se ven forzadas a buscar alternativas para dar solución a la disposición de sus aguas residuales.

Considerando la eficiencia potencial de los sistemas de flotación por aire disuelto para la remoción de aceites y grasas y la consecuente necesidad de conocer el costo efectividad de su uso, la presente investigación, busca determinar la eficiencia de remoción de aceites y grasas, la relación óptima entre aire utilizado y cantidad de aceites y grasas (A/G) a tratar y el efecto producido por la utilización del sulfato de aluminio en el afluente del sistema (mediante mezcla rápida y floculación en una prueba de jarras).

Dicha relación A/G refleja a su vez el costo beneficio de utilizar un sistema de flotación por aire disuelto (DAF) para la remoción de aceites y grasas, el costo del sistema se expresa en base a la cantidad de aire a utilizar respecto a la cantidad de contaminante a tratar (A/G) y el beneficio se expresa en la eficiencia de remoción obtenida para cada valor de la relación A/G, por otro lado la dosis óptima de coagulante determinará la conveniencia de su uso. Finalmente se brindará información sólida para el diseño de Sistemas de Flotación por Aire disuelto con fines de remoción de aceites y grasas.

2.4. OBJETIVOS

2.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinación de la relación óptima entre cantidad de aire utilizado y cantidad de aceites y grasas a tratar (A/Go) para un sistema de flotación por aire disuelto (DAF).
- Evaluación del efecto en la remoción de aceites y grasas por la utilización del sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante en una celda de flotación por aire disuelto (DAF).

2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio, mediante pruebas de jarras.
- Establecer las eficiencias de remoción respecto a diferentes valores de Aire Utilizado / Aceites y Grasas.
- Establecer el rango de presiones, la presión óptima y el volumen óptimo de trabajo del tanque de presurización.

2.5. HIPÓTESIS

Empleando un valor óptimo de la relación AIRE/ACEITES Y GRASAS (A/Go), la flotación por aire disuelto remueve más del 60% de Aceites y Grasas. Asimismo, el uso del sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ mejora el proceso, incrementando la eficiencia de remoción de aceites y grasas.

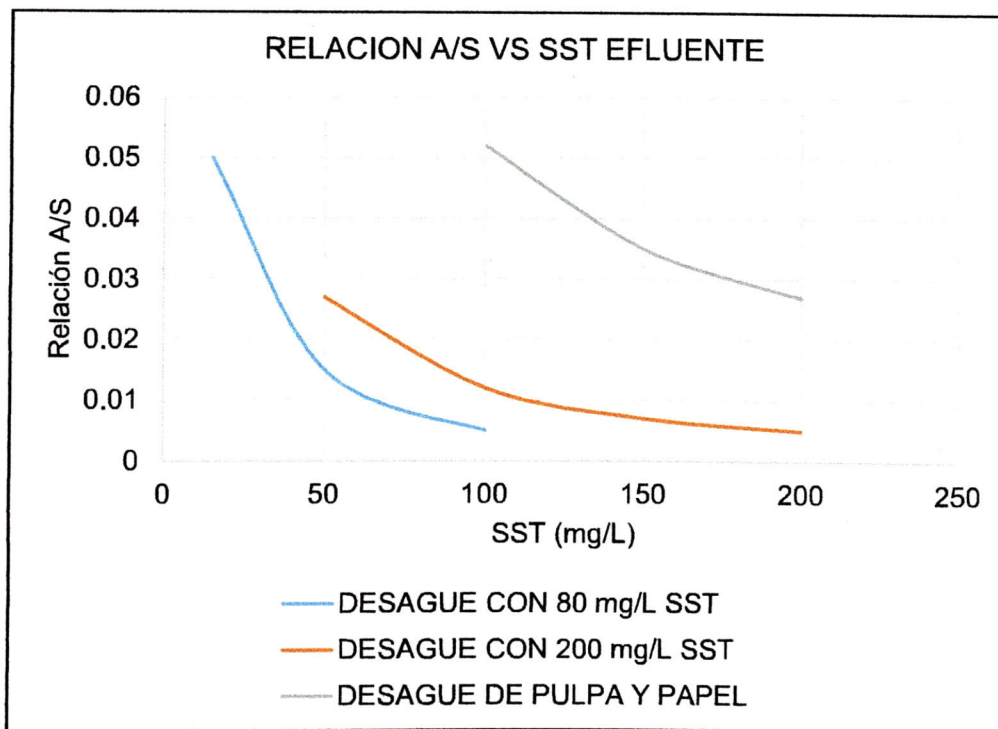
2.6. VARIABLES DEL ESTUDIO

- Variables Independientes: Dosis de Coagulante (D), Presión de Trabajo (PT)
- Variables Dependientes: Eficiencia de remoción de aceites y grasas (%R), Relación Aire/Aceites y grasas (A/G)
- Variables Intervinientes: Concentración de Aceites y Grasas, Temperatura (T)

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

La flotación es una operación unitaria utilizada para la separación de emulsiones, las partículas sólidas presentes en una fase líquida se separan mediante el mecanismo de adherencia y el mecanismo de entrampamiento, con lo cual la separación no depende del tamaño o densidad relativa de las partículas, sino de las propiedades superficiales de las partículas. De esta forma es posible el ascenso a la superficie de las partículas con densidad mayor a la del líquido, además la fuerza de empuje de las burbujas gaseosas facilita también la separación de emulsiones y aceites.

La eficiencia de separación depende de la generación suficiente de burbujas de aire por unidad de sólidos tratados, lo cual se expresa como la relación aire a sólidos (A/S), es decir para cada valor de A/S existe un grado de separación determinado experimentalmente, por ende, existe un valor de A/S₀ conocido como óptimo.



*Procesos y operaciones unitarias, material de clase Ing. Otto Rosasco
 Universidad Nacional de Ingeniería – Facultad de Ingeniería Ambiental, Lima*
Gráfico 1 Relación aire sólidos A/S y SST efluente

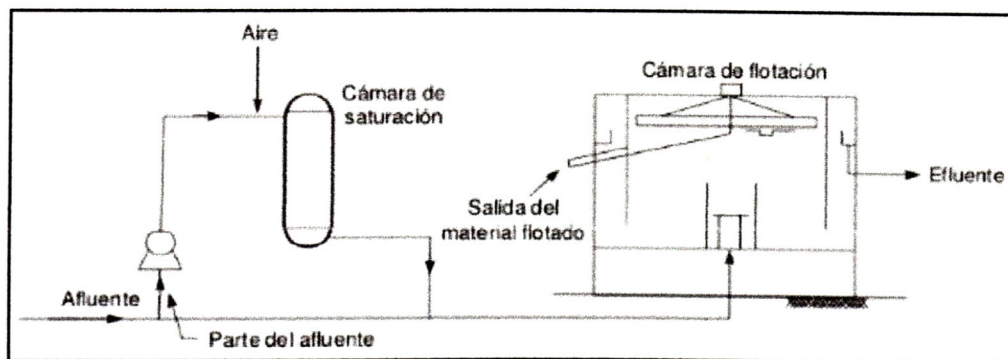
3.1. SISTEMAS DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)

En la flotación por aire disuelto (DAF), las burbujas son producidas como resultado de la precipitación de un gas proveniente de una solución supersaturada con el gas. Esto se consigue introduciendo el agua residual en un tanque de retención cerrado, al cual se le agrega aire para su presurización, posteriormente se le permite salir a presión atmosférica y liberar el gas en exceso del de saturación. De esta manera se reduce la densidad de los materiales en suspensión, principalmente materiales grasosos.

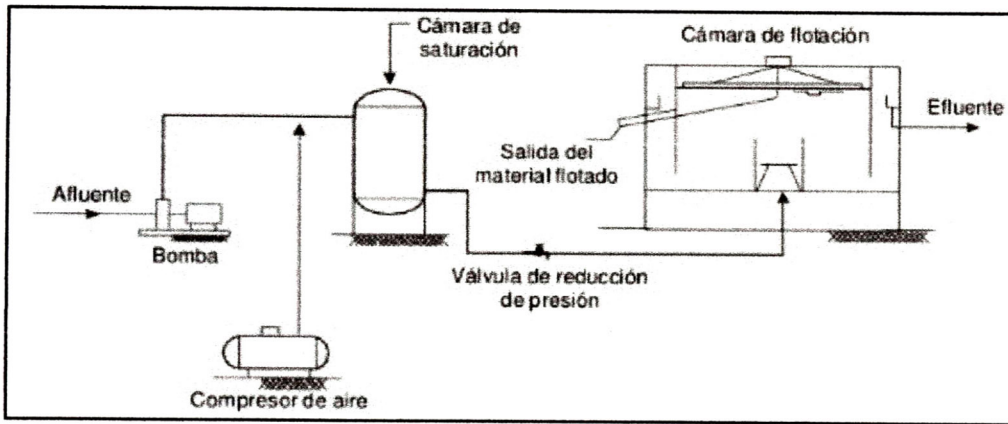
En sistemas pequeños o a escala de laboratorio, todo el afluente se presuriza mediante una bomba de 35 a 70 psi y todo el afluente se retiene en un tanque de presión para lograr la disolución del aire. Posteriormente el afluente ingresa al tanque de flotación, donde el aire se desprende de la solución, en burbujas pequeñas. En instalaciones de mayor tamaño una parte del afluente (20 - 120%) se recircula, se presuriza y se semisatura con aire. Luego se mezcla con el flujo principal justo antes del Tanque de flotación.

En algunos casos se utiliza químicos (coagulantes y polímeros) para mejorar la eficiencia de remoción del sistema.

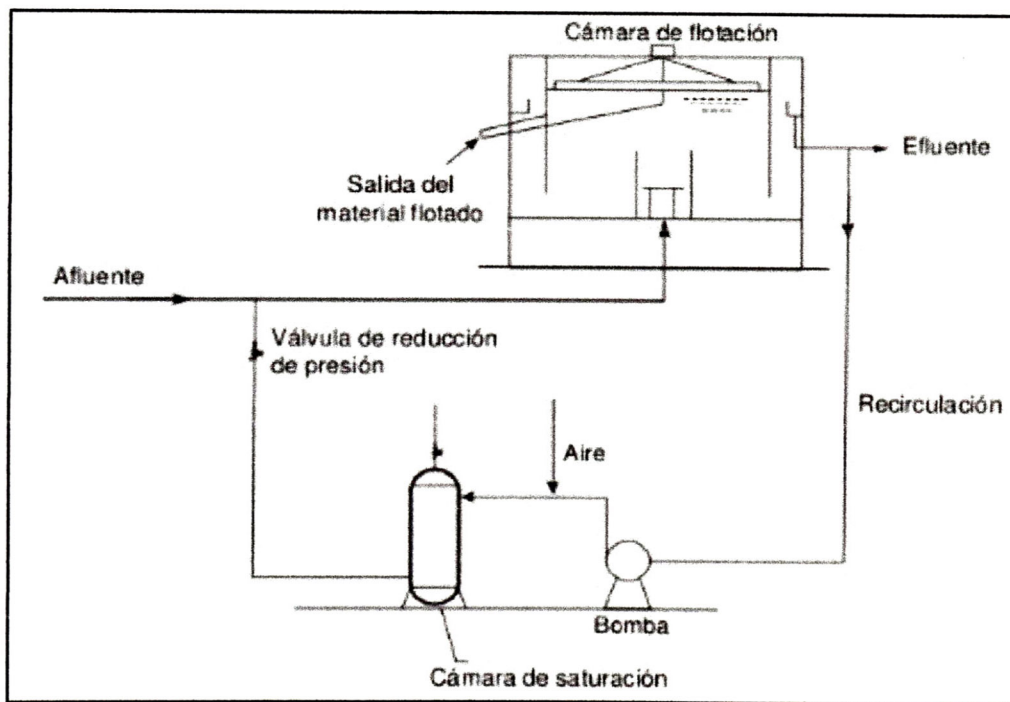
Existen 03 tipos de sistemas de flotación por aire disuelto esquematizados a continuación:



Gestión de Aguas y Residuos (GEDAR), Flotación por aire disuelto.
Figura 1 Flotación por aire disuelto con presurización parcial del afluente



Gestión de Aguas y Residuos (GEDAR), Flotación por aire disuelto.
Figura 2 Flotación por aire disuelto con presurización total del afluente



Gestión de Aguas y Residuos (GEDAR), Flotación por aire disuelto.
Figura 3 Flotación por aire disuelto con presurización de la recirculación

Entre las ventajas de la flotación podemos citar:

- Grasas y Sólidos pueden ser removidos en una sola unidad.
- El diseño permite altas tasas de flujo, mayores cargas superficiales y periodos de retención cortos, con lo cual presentan menores requerimientos de espacio y menor costo.
- La presencia de Oxígeno Disuelto (OD) y el corto periodo de retención, disminuye la presencia de olores.
- En procesos de coagulación química, hace posible que se requiera menos coagulante, dado que la flotación no exige un floc pesado.

Entre las desventajas de la flotación podemos citar:

- En instalaciones grandes, el equipo adicional requerido supone costos elevados de operación y mantenimiento, que podrían resultar más caros que otros procesos.
- La operación puede resultar complicada.

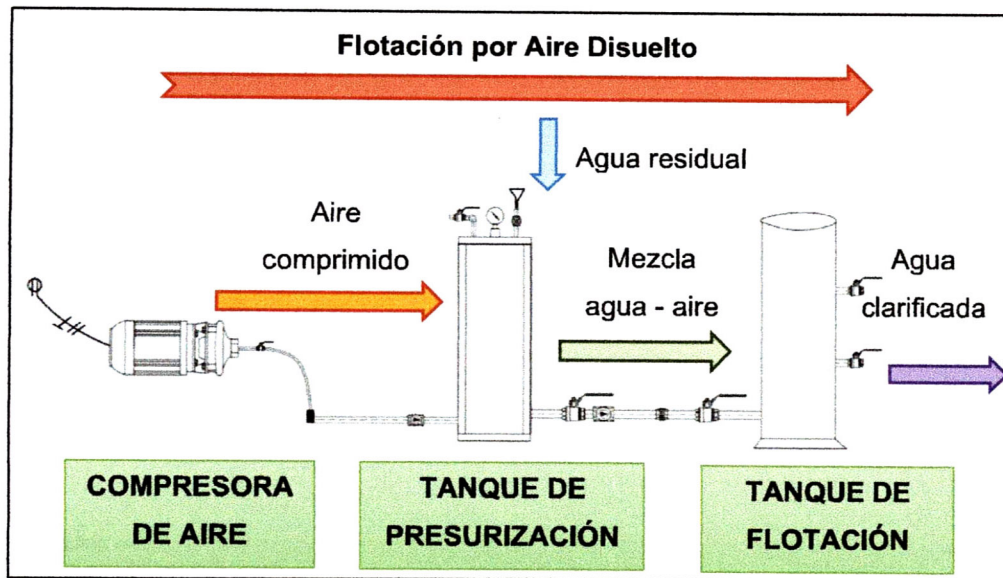
3.1.1. CELDA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

En las unidades de flotación por aire disuelto (DAF), el valor de aire/sólidos (A/S) es variable en función de cada tipo de suspensión, para evaluar la relación óptima de A/S se utilizan celdas de flotación de laboratorio, la cual está constituida generalmente por un tanque o cámara de presión de 1 litro de capacidad, un tubería de ingreso de aire, un compresor de 80 psi, un conducto de salida con una válvula para controlar la velocidad, un manómetro y una probeta de 1 litro que funcionará como tanque de flotación.

El procedimiento experimental es el siguiente:

- Se llena la cámara con un litro de agua residual.
- Se introduce el aire a la cámara hasta obtener la presión de trabajo predefinida.
- Se agita la mezcla en la cámara a presión durante 01 minuto y se deja reposar durante 03 minutos para conseguir la saturación de la mezcla, siempre manteniendo la presión de trabajo.
- Se transfiere el contenido a la probeta controlando la velocidad con ayuda de la válvula.
- Se permite la separación por un periodo de 10 a 20 minutos, luego se muestrea el agua clarificada con ayuda de un sifón o una salida inferior.
- Se analizan las concentraciones de Sólidos, Aceites y grasas, turbiedad o concentración orgánica según sea el caso.
- Se calcula la relación A/S o A/G.
- Se repite el ensayo, variando la concentración de contaminante al inicio o la presión de trabajo, para obtener valores óptimos de A/S o A/G.
- Si se utilizarán compuestos químicos promotores de flotación, se debe agregar a la cámara antes de la presurización, para procurar la mezcla.

En la siguiente figura se muestra el esquema de una celda de flotación:



Basado en Metcalf & Eddy (Ingeniería de aguas residuales, pág. 280, España 1995).

Gráfico 2 Esquema de funcionamiento de la celda de flotación por aire disuelto

3.1.2. RELACION AIRE UTILIZADO/ACEITES Y GRASAS (A/G) EN UNA CELDA DE FLOTACION POR AIRE DISUELTO (DAF)

Para calcular la cantidad de aire utilizado, deberemos calcular la cantidad de aire presente en el tanque de presurización y la cantidad de aire en condiciones normales en el tanque de flotación.

Según la ley de Henry, la concentración de un gas disuelto es función de su presión relativa. Entonces:

$$C' = C * \left(\frac{P' - P_v}{760 - P_v} \right) \dots\dots\dots (Ecuación 1)$$

Donde:

C' = Solubilidad del aire en agua, a la presión absoluta P', en mL/L.

P' = Presión absoluta del Aire, en mmHg.

C = Solubilidad del aire en agua, a la presión de 1atm = 760mmHg.

P_v = Presión de vapor del agua, en mmHg.

760 = corresponde a la presión de 1atm concordante a C.

De la expresión anterior se puede obtener la solubilidad del aire en el Tanque de Presurización (CT) y en el Tanque de Flotación (CL).

$$CT = C * f * \left(\frac{PT - P_v}{760 - P_v} \right) \dots\dots\dots (Ecuación 2)$$

$$CL = C * \left(\frac{PL - P_v}{760 - P_v} \right) \dots\dots\dots (Ecuación 3)$$

Donde:

CT = Solubilidad del aire en agua, a la presión de trabajo del tanque PT, en mL/L.

PT = Presión de trabajo del tanque, en mmHg.

f = Fracción de saturación alcanzada en el tanque de presurización, 0.5-0.8.

CL = Solubilidad del aire en agua, a la presión atmosférica local PL, en mL/L.

PL = Presión atmosférica local (Absoluta), en mmHg.

La cantidad de aire liberado, al reducir la presión hasta la presión atmosférica local, se cuantifica a partir de la diferencia de solubilidades del aire a la presión de trabajo en el tanque y a la presión de trabajo local. Con lo cual obtenemos:

$$CT - CL = C * \left(\frac{f * (PT - Pv) - (PL - Pv)}{760 - Pv} \right) \dots\dots \text{(Ecuación 4)}$$

Si deseamos obtener la cantidad de aire liberado en mg/L, solamente debemos multiplicar la ecuación anterior por la densidad del aire (d) a las condiciones de presión y temperatura del lugar. Finalmente dividimos la cantidad de aire liberado (utilizado) en mg/L con la cantidad de aceites y grasas en el afluente y obtendremos la relación AIRE UTILIZADO/ACEITES Y GRASAS (A/G).

$$\frac{A}{G} = \frac{C * d * [f * (PT - Pv) - (PL - Pv)]}{G(760 - Pv)} \dots\dots \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

PT = Presión de trabajo del tanque, en mmHg.

f = Fracción de saturación alcanzada en el tanque de presurización, 0.5-0.8.

PL = Presión atmosférica local (Absoluta), en mmHg.

C = Solubilidad del aire en agua, a la presión de 1atm = 760mmHg.

Pv = Presión de vapor del agua, en mmHg.

760 = Corresponde a la presión de 1atm concordante a C.

d = Densidad del aire a las condiciones locales de presión y temperatura.

G = Concentración de Aceites y Grasas en el afluente, en mg/L

La ecuación anterior, fue obtenida tomando como referencia lo desarrollado en el libro: "Tratamiento de Aguas Residuales" de Jairo Romero Rojas, en donde se obtiene una ecuación parecida, cuando el parámetro a analizar son los sólidos suspendidos totales en el afluente (S). Dicha ecuación se cita a continuación:

$$\frac{A}{S} = \frac{C * d * [f * (PT - Pv) - (PL - Pv)]}{S(760 - Pv)} \dots\dots \text{(Ecuación 6)}$$

Los valores de "C" y "Pv", dependen únicamente de la temperatura, por lo cual en la siguiente tabla se observa dichos valores en función de la temperatura.

Tabla 1 Presión de vapor de agua y solubilidad del aire en agua a presión atmosférica para diferentes valores de temperatura ambiente

Temperatura ambiente		Solubilidad del aire en agua a 1 atm	Presión de vapor del agua		
T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)
0	273	29.2	0.09	4.6	0.06
5	278	25.7	0.13	6.5	0.09
10	283	22.8	0.18	9.2	0.13
15	288	20.6	0.25	12.8	0.17
20	293	18.7	0.34	17.6	0.24
25	298	17.1	0.46	23.8	0.32
30	303	15.7	0.61	31.8	0.43

Jairo Romero, 1999

R. S. Ramalho, 1996

La densidad del aire (d) en mg/mL depende de la temperatura (T) y de la presión atmosférica local (PL) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$d = \frac{1.293}{1 + 0.00367 * T} * \left(\frac{PL}{760}\right) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 7)}$$

En consecuencia, para la determinación de la relación A/G de una muestra específica, es necesario, conocer inicialmente, las condiciones locales de presión atmosférica y temperatura ambiente.

3.2. OTROS PROCESOS Y OPERACIONES INVOLUCRADOS POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE

A continuación, se brindan conceptos sobre los procesos u operaciones adicionales a la flotación, que se presentan en la celda de flotación cuando se utiliza el sulfato de aluminio como coagulante. Estos conceptos y definiciones están, en su mayoría, basados en los “Manuales de Tratamiento de agua para consumo humano – Plantas de Filtración Rápida” (L. Cánepa, 2004).

3.2.1. MEZCLA RÁPIDA

Se denomina Mezcla Rápida a las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con el propósito de que las reacciones de coagulación se den en condiciones óptimas.

3.2.2. COAGULACIÓN

Las aguas residuales, así como el agua, pueden contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles, entre estas últimas destacan las partículas coloidales, microorganismos, entre otros. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua o agua residual, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación (o flotación) y filtración.

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

- El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, entre otros. El proceso se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta última, las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras de mayor tamaño, denominadas flocúlos, estas pueden ser removidas con mayor eficiencia en la unidad de decantación.

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas de tratamiento.

MECANISMOS DE COAGULACIÓN PREDOMINANTES

La coagulación mediante sales inorgánicas se produce predominantemente por dos mecanismos: 1) Adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide, lo que provoca la neutralización de la carga, y 2) Coagulación de barrido, en la que se producen las interacciones entre el coloide y el hidróxido precipitado. Ambos se detallan a continuación:

➤ Coagulación por adsorción

Cuando se agrega sulfato de aluminio o sales de fierro al agua en condiciones especiales de dosis de coagulante y pH, se forma una serie de especies solubles hidrolizadas.

En el caso del sulfato de aluminio, las especies hidrolizadas que se forman son Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_4$, las cuales son tomadas a menudo para representar todo el sistema.

Este mecanismo es denominado neutralización de carga (también se lo llama de desestabilización-adsorción). Cuando la cantidad de coloides presente en el agua es grande, la distancia entre ellos es pequeña. Por lo tanto, es mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización es menor, así como el potencial zeta resultante.

➤ Coagulación por barrido

Con dosis de alúmina suficientemente altas, se forma un precipitado de hidróxido de aluminio que físicamente arrastra de la suspensión a las partículas coloidales, por lo que se denomina coagulación de barrido.

En este mecanismo, la coagulación de las partículas coloidales en el tratamiento del agua es controlada principalmente por la química del hidróxido de aluminio y sus especies hidrolíticas precursoras.

Este tipo de coagulación se presenta normalmente cuando el agua es clara y el porcentaje de partículas coloidales es pequeño. En este caso, las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de hidróxido de aluminio.

Debido a que la distancia entre las partículas es mayor, las fuerzas de atracción son menores y se requiere mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlas, lo que aumenta el potencial zeta y el tiempo de reacción, que puede llegar hasta 7 segundos.

SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE

Puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo. Su fórmula teórica es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Su concentración se define en general, por su contenido en alúmina, expresada en Al_2O_3 , es decir, 17% aproximadamente.

El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH varía entre 2 y 3,8; según la relación molar sulfato/alúmina. Por esta razón, su almacenamiento debe hacerse en un lugar seco, libre de humedad. Es necesario tener en cuenta esta tendencia ácida para la preparación de las soluciones y los empaques para su distribución, y emplear, por lo general, materiales de plástico.

3.2.3. FLOCULACIÓN

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten (o floten) con mayor eficiencia.

MECÁNICA DEL PROCESO

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte: 1) Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido. 2) Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento. 3) Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Cuando el coagulante se dispersa en la masa de agua y desestabiliza las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial. Recién cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN

Los principales factores que influyen en la eficiencia de la floculación son: La naturaleza de la muestra, las variaciones del caudal, la intensidad de agitación, el tiempo de floculación, y el número de compartimentos de la unidad.

3.2.4. SEDIMENTACIÓN

Se entiende por sedimentación a la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno físico, donde se remueve las partículas más densas, por lo tanto, se estudian las propiedades de caída de las partículas en el agua.

Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

➤ Sedimentación de partículas discretas

Son aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

➤ Sedimentación de partículas floculentas

Son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de la partícula discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad), sí cambian durante la caída.

Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación floculación y la filtración rápida.

➤ Sedimentación por caída libre e interferida

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal. Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SEDIMENTACIÓN

Los principales factores que influyen en el proceso de sedimentación o decantación son: 1) La calidad del agua; 2) Condiciones hidráulicas en la zona de entrada, en la zona de sedimentación, y en la zona de salida de la unidad; 3) Factores externos (acondicionamiento previo, prácticas operacionales y factores ambientales), que paradójicamente son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador.

3.3. PRESENCIA DE ACEITES Y GRASAS EN AGUAS RESIDUALES

Los aceites y grasas, se presentan de diversas formas en las aguas residuales, por lo tanto, su facilidad de remoción depende directamente del origen de las aguas residuales y de la forma en la que se presentan. De acuerdo a la forma en la que se presentan en las aguas residuales, podemos clasificar los aceites y grasas en:

3.3.1. ACEITES Y GRASAS EN ESTADO LIBRE

Se refiere a los aceites y grasas que rápidamente se elevan a la superficie bajo condiciones de calma.

Las trampas de grasas convencionales y los recuperadores de grasa industriales son utilizados principal para remover y/o recuperar esta forma de aceites y grasas debido a su facilidad de remoción y/o recuperación.

En general, la mayoría de aceites y grasas presentes en las aguas residuales provenientes de restaurantes pertenece a este grupo.

3.3.2. ACEITES MECÁNICAMENTE EMULSIONADAS

Se forma a partir de la agitación mecánica de aceite en agua hasta el punto que las gotas de aceite preformadas se rompen en pequeñas gotas de 10 – 20 micras. Las altas temperaturas y el uso de aceites vegetales líquidos promueven la formación de aceite mecánicamente emulsionadas. Las gotas se estabilizan sin la presencia de agentes tensoactivos.

La separación de estos aceites puede lograrse por sí misma con altos tiempos de retención y bajas cargas superficiales en los separadores y/o trampas de grasa, sin embargo, puede resultar complicado debido a problemas de espacio.

3.3.3. ACEITES QUÍMICAMENTE ESTABILIZADAS

Producida por agente tensoactivos (Detergentes y otros), el cual proporciona mayor estabilidad debido a la interacción agua/aceite. Presentan tamaños menores a 5 micras.

La separación de estos aceites es indiferente del tiempo de residencia y se necesitan unidades de tratamiento especial para su separación (aditivos químicos, flotación, etc.). Este tipo de aceite se presenta en grandes proporciones en aguas residuales provenientes de establecimientos de comida.

3.3.4. ACEITE QUÍMICAMENTE EMULSIONADAS

En este caso el aceite no se presenta en forma discreta, más bien en forma emulsionada (disuelta). Lógicamente el aceite no se puede disolver en el agua, por ello solamente se presentan disueltas por la utilización de compuestos de desengrasado que son solubles tanto en aceite como en agua (por lo tanto, su capacidad de ser desengrasantes). Dado que muchos desengrasantes son disolventes clorados y productos químicos fuertes, se recomienda que estos compuestos no sean utilizados, por lo tanto, su presencia en las aguas residuales es limitada.

3.3.5. ACEITES Y GRASAS ADHERIDAS

Esta forma de aceite se presenta cuando el aceite en forma líquida se adhiere a los sedimentos, virutas y otros materiales particulados presentes en las aguas residuales, su remoción depende del tamaño de las mismas.

CAPÍTULO 4. MARCO NORMATIVO

En la actualidad se tienen múltiples normas nacionales referentes a la descarga de aguas residuales domésticas e/o industriales, sin embargo, no se puede afirmar que sean suficientes para cubrir todos los aspectos relacionados a la contaminación por efluentes con alto contenido de aceites y grasas. No obstante, es imperativo el cumplimiento de dichas normativas.

4.1. NORMAS APLICABLES

Se incluyen las normas exigibles, en cuanto al contenido de aceites y grasas, a las descargas de aguas residuales domésticas e/o industriales a nivel nacional.

- Valores máximos admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario: Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA.
- Límites Máximos Permisibles para efluentes de los establecimientos industriales pesqueros de consumo humano directo e indirecto: Decreto Supremo N° 010-2018-MINAM.
- Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas: Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.
- Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (PTAR): Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.
- Límites Máximos Permisibles (LMP) de efluentes Líquidos para el sub-sector hidrocarburos: Decreto Supremo N° 037-2008-PCM.
- Límites máximos permisibles (LMP) para la Industria de Harina y Aceite de Pescado y Normas Complementarias: Decreto Supremo N° 010-2008-PRODUCE.

- Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel: Decreto Supremo N° 003-2002-PRODUCE.

Tabla 2 Normatividad legal vigente exigible al contenido de aceites y grasas de los efluentes de diferentes actividades.

Ítem	Norma	Entidad que aprueba	Valor Máximo VMA / LMP (mg/L)	Aplicable a:
1	Decreto Supremo N° 021-2009	MVCS	100	Descargas en el sistema de alcantarillado sanitario
2	Decreto Supremo N° 010-2018	MINAM	350	Efluentes de la industria pesquero
3	Decreto Supremo N° 010-2010	MINAM	16	Efluentes de las actividades minero - metalúrgicas
4	Decreto Supremo N° 003-2010	MINAM	20	Efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas
5	Decreto Supremo N° 037-2008	PCM	20	Efluentes Líquidos para el sub sector hidrocarburos
6	Decreto Supremo N° 010-2008	PRODUCE	20	Efluentes de la industria de harina y aceite de pescado
7	Decreto Supremo N° 003-2002	PRODUCE	15	Efluentes de las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel

Elaboración propia

4.2. NORMAS REFERENCIALES

Aun cuando las normas aplicables regulan la calidad de los efluentes y/o descargas de aguas residuales y/o industriales, ello no garantiza el perjuicio a la calidad del agua del cuerpo receptor, es por ello que el Ministerio del Ambiente, a través del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM aprueba los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua, los cuales exigen ciertos parámetros que garanticen la calidad de un cuerpo de agua, según la categoría (uso) a la que pertenecen.

Por lo cual es importante, además del cumplimiento de los VMA o LMP, asegurar que la descarga no modifique la calidad del cuerpo de agua exigida en los ECA, para ello, aunque no existe normativa; la Autoridad Nacional del Agua publicó (en agosto del 2017) la Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua.

Tabla 3 Estándares de calidad ambiental (ECAs) de agua para la concentración de aceites y grasas

Ítem	Categoría	Subcategoría	ECA (mg/L)	
1	1. Poblacional y Recreacional	A. Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable	A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	0.5
2		A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	1.7	
3		A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	1.7	
4	1. Poblacional y Recreacional	B. Aguas superficiales destinadas para recreación	B1: Contacto primario	Ausencia de película visible
5		B2: Contacto secundario	No aplica	
6	2. Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales	C1: Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino costeras		1.0
7		C2: Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras		1.0
8		C3: Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino costeras		2.0
9		C4: Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas		1.0
10	3. Riego de vegetales y bebida de animales	D1: Riego de vegetales		5.0
11		D2: Bebida de animales		10.0
12	4. Conservación del ambiente acuático	E1: Lagunas y Lagos		5.0
13		E2: Ríos		5.0
14		E3: Ecosistemas costeros y marinos		5.0

Elaboración propia

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

5.1. AGUAS RESIDUALES UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN

Para lograr los objetivos de la presente investigación, fue necesario realizar gestiones con distintas empresas que estén dispuestos a brindar el acceso a sus instalaciones y al muestreo de sus aguas residuales, estas empresas debían incluir, dentro de sus procesos, alta producción de aceites y grasas, por las facilidades de acceso y muestreo, se consideró las aguas residuales provenientes de establecimientos de comida e industria alimentaria como fuentes principal de muestras para la investigación.

Adicionalmente, para la primera etapa de la investigación, se utilizó aguas residuales artificiales producidos en casa, la diversidad de fuentes permitió contar con distintos valores de aceites y grasas en el agua residual cruda, favoreciendo de esta manera la evaluación estadística de la investigación.

5.1.1. ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES

La investigación considera la utilización de tres (03) fuentes de aguas residuales con alto contenido de aceites y grasas, las cuales son:

a) Producción Artificial

Ingredientes

- Agua Potable.
- Aceite vegetal y/o residuos de aceite proveniente de la fritura de alimentos.
- Aguas residuales de lavado de utensilios de cocina.

Materiales

- Cocina a gas.
- Olla metálica de 40 litros de capacidad.
- Utensilios de cocina.
- Materiales de limpieza: Detergente, esponjas, lava vajillas, etc.
- Balde de plástico de 20 litros.

- Probeta de 100ml.
- Agua Potable.
- 05 litros de aguas residuales de lavado de utensilios de cocina.
- Aceite vegetal o residual (tanto como se requiera para lograr, aproximadamente, la concentración predeterminada).

Preparación

Se llenó la olla con 35 litros de agua potable, 05 litros de aguas residuales de lavado de utensilios y la cantidad requerida de aceite vegetal o residual, por ejemplo, si se para una muestra de 400 mg/L de aceites y grasas debe agregarse $400\text{mg/L} \times 40 \text{ L} = 16$ gramos de aceite al 100% de pureza. Para determinar el volumen de aceite a añadir se debe conocer la densidad del aceite, para lo cual se utilizó la siguiente tabla:

Tabla 4 Densidad del aceite vegetal

Aceite	Densidad Kg/m³ a 40°C	Densidad g/mL a 40°C
Ricino	933	0.933
Girasol	903	0.903
Colza	903	0.903
Soya	897	0.897

C. Rodríguez, F. Lafargue, J. Sotolongo, A. Rodríguez, J. de Assuncao, 2012

Para efectos prácticos se considera 1g/ml para determinar el volumen de aceite a agregar, dado que la concentración requerida solo es aproximada, de esta manera, en el ejemplo antes citado, la cantidad de aceite a agregar es de 16 ml.

Posteriormente, se enciende la cocina hasta hervir durante 45 a 60 minutos la emulsión, la cual se formará por las altas temperaturas y por la agitación mecánica realizada cada 5 minutos con ayuda de una cuchara o cucharón. Finalmente se deja enfriar y sedimentar (pasivamente) la emulsión durante 2 horas, quedando lista para la realización de pruebas.

Cabe indicar, que solamente se utilizarán 20 litros como muestra para el desarrollo de pruebas, de esta manera, se busca evitar la inclusión de natas y sedimentos formados por las condiciones de tranquilidad, establecidas previamente.

Lugar de preparación

Vivienda del tesista: Jr. San Agustín N° 275 – Surquillo. Coordenadas 279 670E y 8 659 860N (UTM WGS84 Zona 18L).

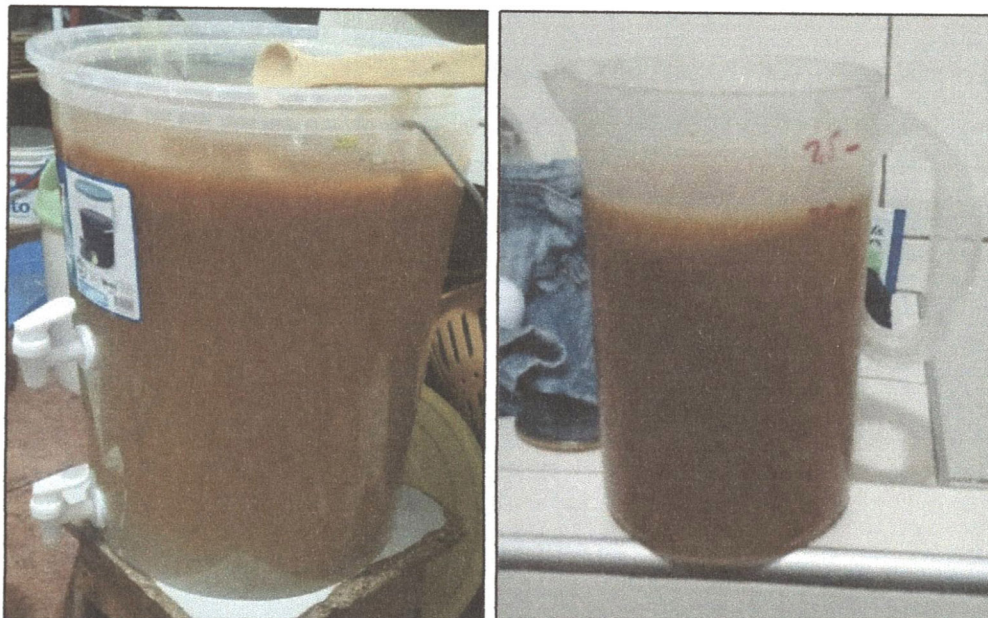


Figura 4 Muestra de aguas residuales producidas artificialmente

b) Establecimientos de Comida

Actividad

La segunda muestra a utilizar proviene de dos (02) establecimientos de comida, cuyas actividades son la venta minorista de pollos a la brasa, parrilladas, entre otros platos característicos de las pollerías de la ciudad de Lima.

Punto de muestreo

Trampa de grasa de los efluentes de cocina, justo antes de la caja de conexión de desagüe, a la salida del establecimiento de comida.

Ubicación

- Establecimiento de comida N° 1: Av. Alfredo Mendiola 3461, Urb. Panamericana Norte - Los Olivos, coordenadas 275 275E y 8 673 192N (UTM WGS84 Zona 18L).
- Establecimiento de comida N° 2: Av. Gerardo Unger 1003 - San Martín de Porres, coordenadas 276 555E y 8 670 910N (UTM WGS84 Zona 18L).



*A la izquierda: Trampa de grasa de establecimiento de comida N° 1.
A la derecha: Trampa de grasa de establecimiento de comida N° 2.*
Figura 5 Puntos de muestreo de establecimientos de comida

c) Industria Alimentaria

Actividad

- Producción mayorista de alimentos para distribución a supermercados de la ciudad de Lima.
- Producción, envasado y distribución de embutidos, lácteos y otros para abastecer a los supermercados de la ciudad de Lima.

- Recepción, almacenamiento, etiquetado y distribución de productos de terceros para abastecer a los supermercados de la ciudad de Lima.

Punto de muestreo

Cisterna de la estación de bombeo de aguas residuales de la zona de producción de alimentos y embutidos del centro industrial e ingreso de la planta de tratamiento de aguas residuales del centro industrial.

Ubicación

Lotización Nievería lote 6 - Lurigancho Chosica, coordenadas 292 275E y 8 672 735N (UTM WGS84 Zona 18L).



Figura 6 Punto de muestreo: Ingreso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales - Industria Alimentaria

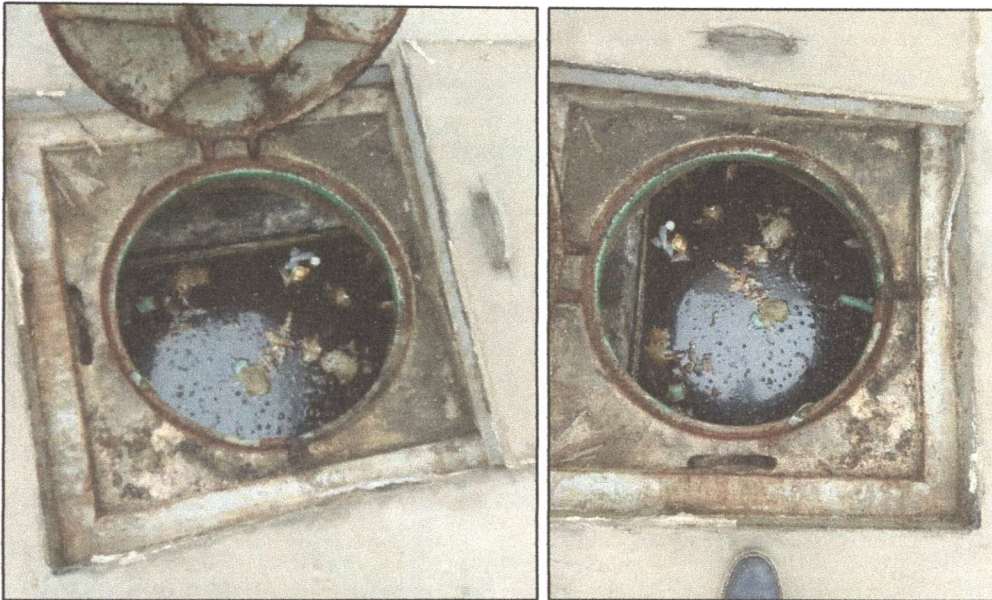


Figura 7 Punto de muestreo: Cámara de bombeo de aguas residuales de la zona de producción de alimentos y embutidos – Industria Alimentaria

5.1.2. PROTOCOLO DE MUESTREO

Materiales

- 02 mandiles de laboratorio.
- 02 cubrebocas.
- 02 pares de guantes de látex.
- 01 trozo de madera de 0.30 x 0.10 metros.
- 02 galoneras de 5 galones cada uno.
- 01 jarra de 3 litros de capacidad.
- 01 embudo de plástico de 0.30 metros de diámetro.
- 01 cinta teflón.
- 01 colador de 0.30 metros de diámetro
- Bolsas de plástico de color negro.

Procedimiento

- Visitar las instalaciones del punto de muestreo entre las 8 y 9 horas, con el objetivo de realizar el muestreo a las 10 de la mañana aproximadamente.
- Utilizar los mandiles de laboratorio, cubrebocas y guantes para evitar la contaminación del muestreador.
- Retirar las tapas de acceso y realizar la inspección inicial del punto de monitoreo, posteriormente, debe limpiarse (hacer a un lado o retirar) las natas y sólidos flotantes presentes en el espejo de agua de la trampa de grasa o cisterna de aguas residuales, para ello se utilizarán el trozo de madera y el colador, los residuos retirados deben disponerse en las bolsas de plástico.
- Llenar las galoneras, con ayuda de la jarra y del embudo, hasta el 90% de la capacidad de las mismas y tapar las galoneras asegurando su hermeticidad con el uso de la cinta teflón en la unión roscada tapa - galonera.
- Reestablecer las condiciones iniciales limpiando el alrededor del punto de muestreo y tapando el acceso a las mismas. Finalmente disponer los residuos en las bolsas de plástico, de acuerdo a las indicaciones del proveedor.

5.1.3. MUESTRAS UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN

Las muestras utilizadas en la presente investigación varían por su origen (descritos en el ítem 5.1.1.) y por el grado de concentración de aceites y grasas de las mismas. A continuación, se detallan las muestras utilizadas en cada etapa de la investigación, identificando el origen y la concentración de aceites y grasas de cada una de ellas; comparada con lo estipulado en el decreto supremo D.S. 021-2009-VIVIENDA "Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario".

Tabla 5 Muestras de aguas residuales utilizadas en la investigación

Etapa de la Investigación	Muestra N°	Origen de la Muestra	Aceites y Grasas de la Muestra (G)	Aceites y Grasas de según VMAs
Primera Etapa: Determinación de la relación óptima entre cantidad de aire utilizado y cantidad de aceites y grasas a tratar (A/G)	1	Producción Artificial	1332.00	100.00
	2	Producción Artificial	1418.00	100.00
	3	Producción Artificial	709.00	100.00
	4	Producción Artificial	1028.00	100.00
	5	Establecimiento de Comida N° 1	1256.00	100.00
	6	Establecimiento de Comida N° 1	1389.50	100.00
	7	Establecimiento de Comida N° 2	846.50	100.00
	8	Establecimiento de Comida N° 2	453.50	100.00
	9	Establecimiento de Comida N° 2	677.50	100.00
	10	Producción Artificial	254.50	100.00
Segunda Etapa: Evaluación del efecto en la remoción de aceites y grasas por la utilización del sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante	11	Industria Alimentaria	228.00	100.00
	12	Industria Alimentaria	824.00	100.00

Elaboración propia

5.2. PROTOTIPOS EXPERIMENTALES

5.2.1. CELDA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

Para llevar cabo la investigación se ha construido un prototipo basado en la celda de flotación por aire disuelto planteado por Metcalf & Eddy (Ingeniería de aguas residuales, pág. 280, España 1995), el cual consta de:

- Tanque de Presurización: Hecho de acero inoxidable de 10 cm de diámetro interno y 25 cm de altura (02 litros de capacidad), diseñado para soportar presiones de hasta 100 psi. Cuenta con 01 manómetro con escala de 0 a 100 psi, tubería de ingreso de agua residual con 01 válvula compuerta de $\frac{1}{2}$ ", tubería de purga con 01 válvula compuerta de $\frac{1}{2}$ ", tubería de descarga suave de la mezcla agua – aire al tanque de flotación con 01 válvula compuerta tipo globo, 01 válvula check de y unión universal de $\frac{1}{2}$ "; y tubería de ingreso de aire de $\frac{1}{2}$ " que cuenta con una válvula check de $\frac{1}{2}$ " y 01 conexión especial a la manguera de polietileno de $\frac{1}{4}$ ", proveniente del compresor.

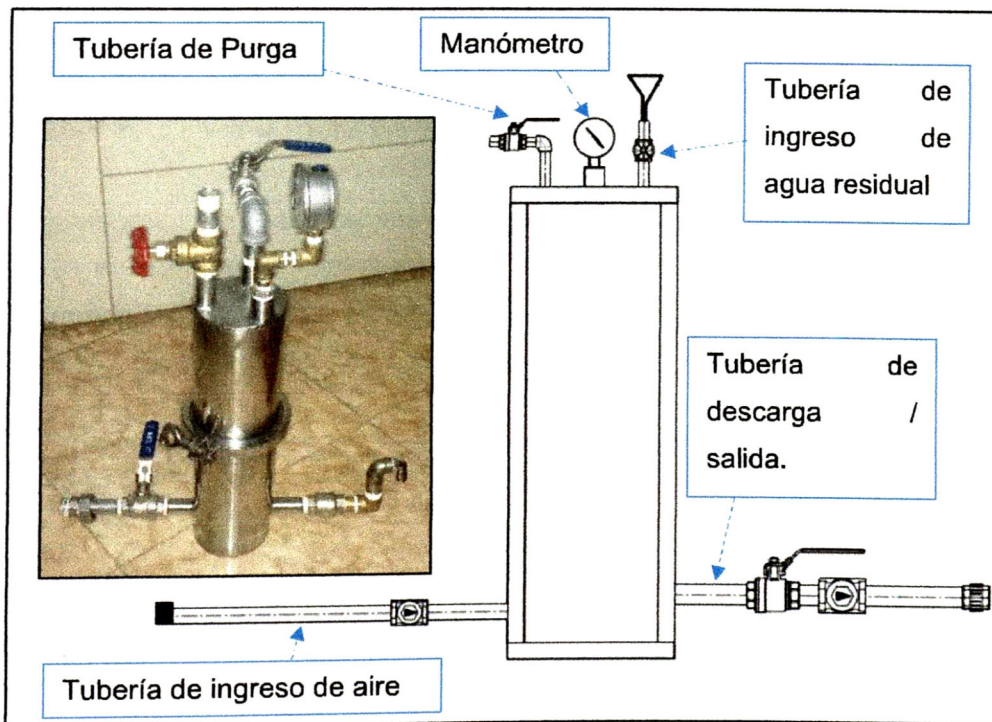


Figura 8 Celda de flotación: Tanque de Presurización

- Tanque de Flotación: Probeta de polietileno graduada de 03 litros de capacidad. Cuenta con tubería de ingreso con una válvula de globo de ½" para permitir el ingreso de la mezcla agua – aire, la cual esta provista de 01 conexión con unión universal de ½", 01 válvula compuerta tipo globo de ½" y 01 válvula check de ½". Asimismo, cuenta con un sistema de muestreo para el agua clarificada situado a altura media baja y media alta.

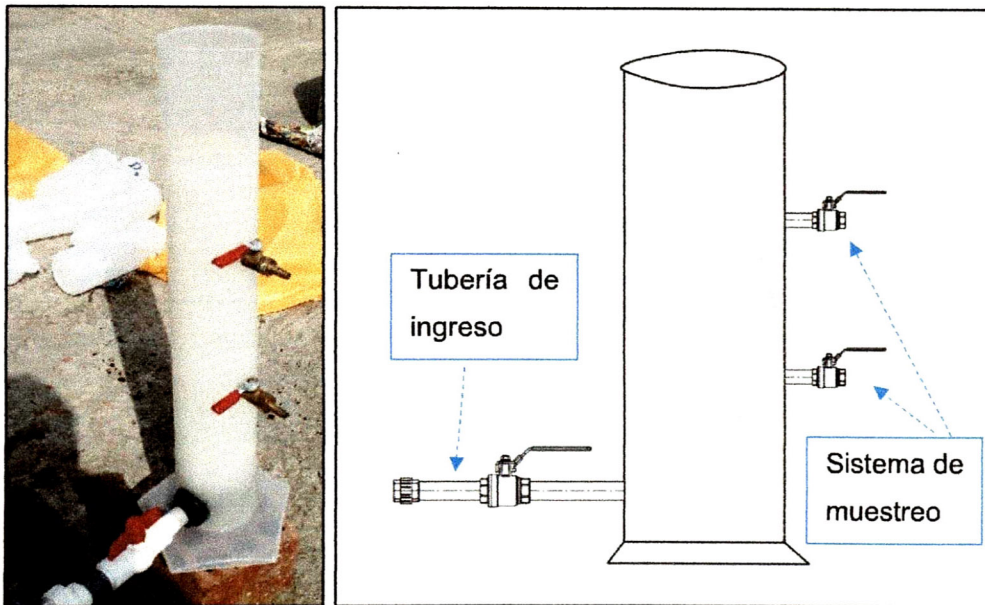


Figura 9 Celda de flotación: Tanque de Flotación

- Compresor de Aire: Potencia 01 HP, provisto de una tubería de salida de ¼", 01 manómetro de control de 0 - 100 psi, 01 válvula reguladora de presión (rango 0 - 100 psi), 01 válvula compuerta de ¼" y 01 manguera de polietileno de ¼" para conexión al tanque de presurización

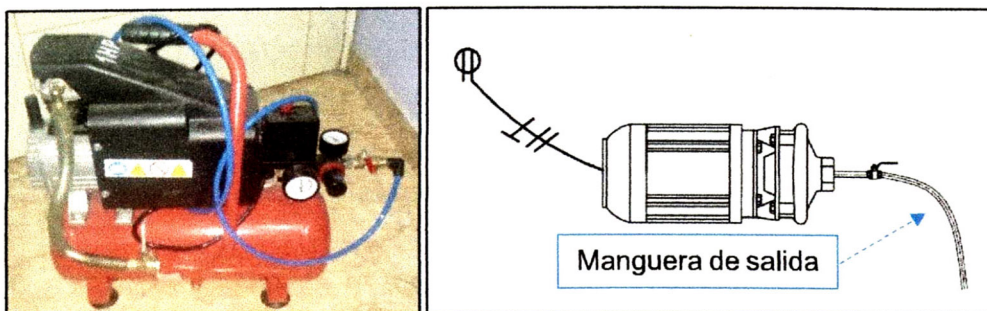


Figura 10 Celda de flotación: Compresor de aire

A continuación, se observa el esquema completo de la celda de flotación por aire disuelto:

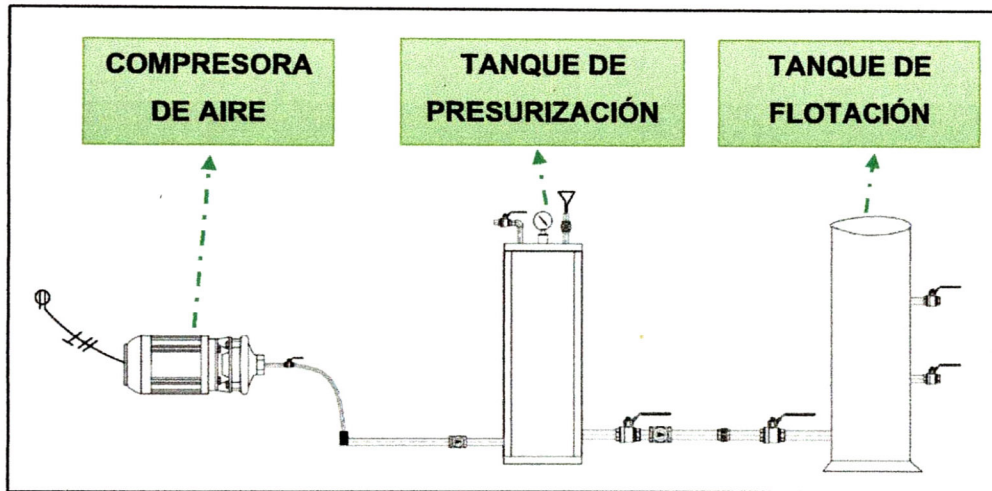


Figura 11 Esquema de celda de flotación por aire disuelto

5.2.2. PRUEBA DE JARRAS

Para la segunda parte de la presente investigación, se utilizó el laboratorio y el equipo de prueba de jarras de la empresa Ingenieros Consultores en Agua y Saneamiento, la cual facilitó la determinación del rango referencial de dosis de sulfato de aluminio a utilizar en la celda de flotación, a través de la simulación de mezcla rápida, floculación y flotación – sedimentación. La prueba de jarras está compuesta por:

- Equipo automático provisto de 06 agitadores mecánicos y 06 paneles de retroiluminación.
- 06 jarras graduadas de acrílico de 02 litros de capacidad cada una, provistas de sistema de muestreo directo.
- Display de control de velocidad, frecuencia, tiempo de retención, etc.
- Equipos de laboratorio: 01 balanza analítica y 01 turbidímetro Hatch.
- Reactivos: Sulfato de aluminio en seco.

- Materiales de laboratorio: 02 pipetas de 10 ml, 02 pipetas de 1ml, 01 pera de goma para pipetas, 06 jeringas, 06 vasitos de 25 ml, guantes de látex, 01 matraz Erlenmeyer de 100 ml, 01 vaso precipitado de 50ml, 01 probeta de 100 ml, 01 embudo de vidrio, materiales de limpieza, entre otros.



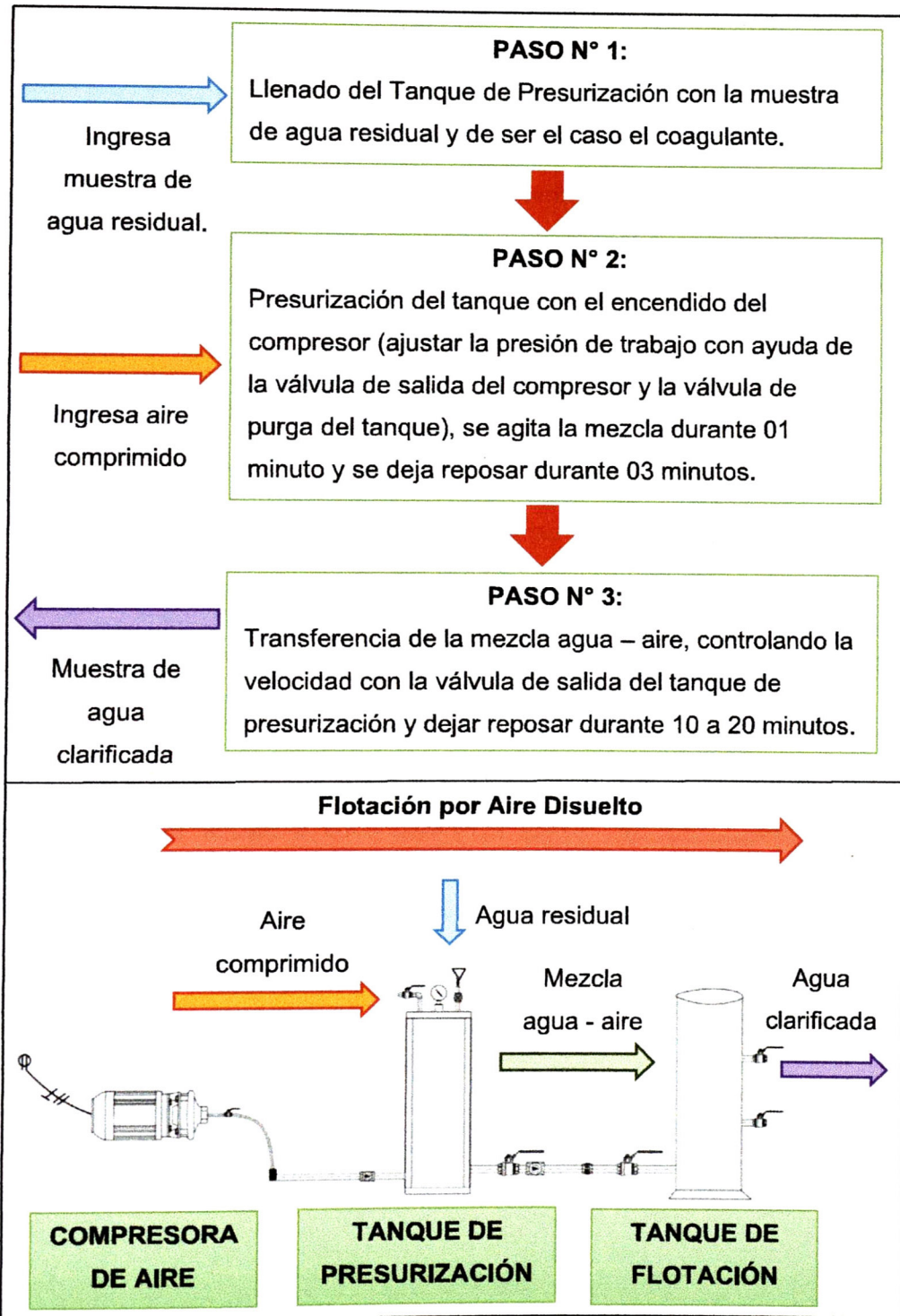
Arriba: Equipo de prueba de jarras utilizado.
Abajo – a la izquierda: Jarra y accesorios.
Abajo – a la derecha: Display de control.
Figura 12 Prueba de jarras

5.3. OPERACIÓN DE LOS PROTOTIPOS

5.3.1. CELDA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

La operación del prototipo se basó en lo propuesto por Metcalf & Eddy por Metcalf & Eddy (1995) en su texto Ingeniería de aguas residuales (pág. 280).

- Llenar el tanque de presurización con el volumen de muestra equivalente al volumen de trabajo del tanque (determinado en la etapa preliminar de la presente investigación).
- Ajustar la válvula reguladora de presión del compresor a 2 o 3 psi por encima de la presión requerida en el tanque de presurización, considerar que existe pérdida de carga entre el compresor y el tanque de presurización.
- Encender el compresor hasta obtener la presión de trabajo predefinida en el tanque de presurización.
- Se agita la mezcla en el tanque de presurización durante 01 minuto y se deja reposar durante 03 minutos para conseguir la saturación de la mezcla, siempre manteniendo la presión de trabajo, con ligeros ajustes en la válvula reguladora de presión del compresor.
- Se transfiere el contenido a la probeta controlando la velocidad con ayuda de la válvula.
- Se permite la separación por un periodo de 10 a 20 minutos, luego se muestrea el agua clarificada con ayuda de un sifón o una salida inferior.
- Si se utilizarán compuestos químicos promotores de flotación (coagulantes), se debe agregar al tanque antes de la presurización, para procurar la mezcla.



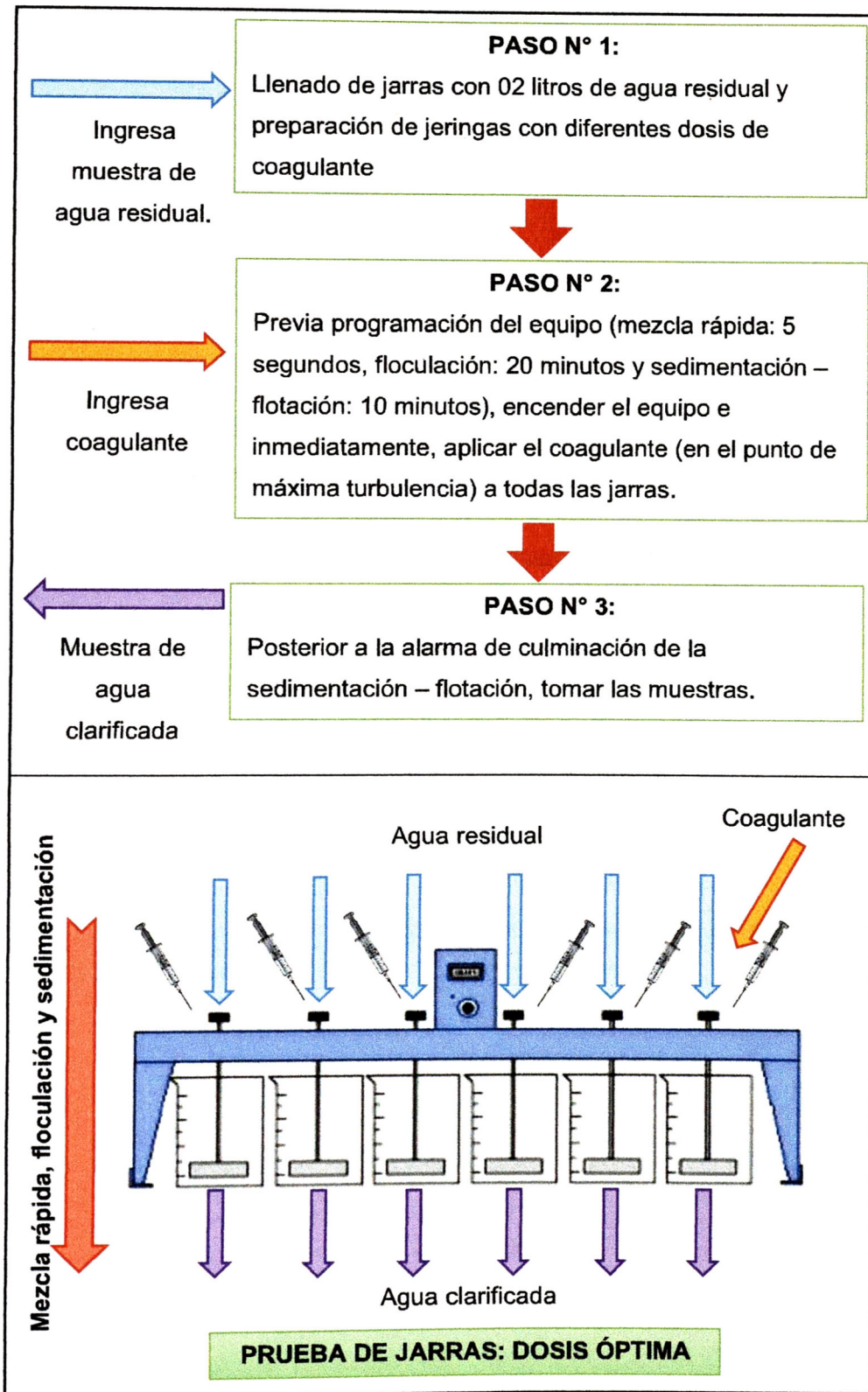
Basado en Metcalf & Eddy (Ingeniería de aguas residuales, pág. 280, España 1995).

Figura 13 Diagrama de flujo de operación de la celda de flotación

5.3.2. PRUEBA DE JARRAS

Para estas pruebas se utilizó el procedimiento de Determinación de la dosis óptima de coagulante establecido por la Ing. Lidia Cánepa de Vargas en los Manuales de Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida, Manual I: Teoría, Capítulo 11: Criterios para la selección de los procesos y parámetros óptimos de las unidades (pág. 240), el cual simula los procesos de mezcla rápida, floculación y sedimentación – flotación a escala de laboratorio.

- Llenar las 06 jarras con 01 a 02 litros de muestra.
- Colocar las cantidades del coagulante que se va a aplicar a las jarras, en cada vasito mediante una pipeta. Succione el contenido de cada vasito con la jeringa.
- Programar el equipo según: mezcla rápida a 300 rpm durante 05 segundos, floculación a 40 rpm durante 20 minutos y sedimentación a 0 rpm durante 10 minutos.
- Encender el equipo e inmediatamente aplicar, en forma simultánea, el coagulante a todas las jarras. Para que la mezcla rápida sea bien simulada, el coagulante debe aplicarse en el punto de máxima turbulencia.
- Una vez el equipo haya culminado la etapa de sedimentación – flotación, proceder a la toma de muestras.



Elaboración propia

Figura 14 Diagrama de flujo de operación de la prueba de jarras para determinación de dosis óptima de coagulante

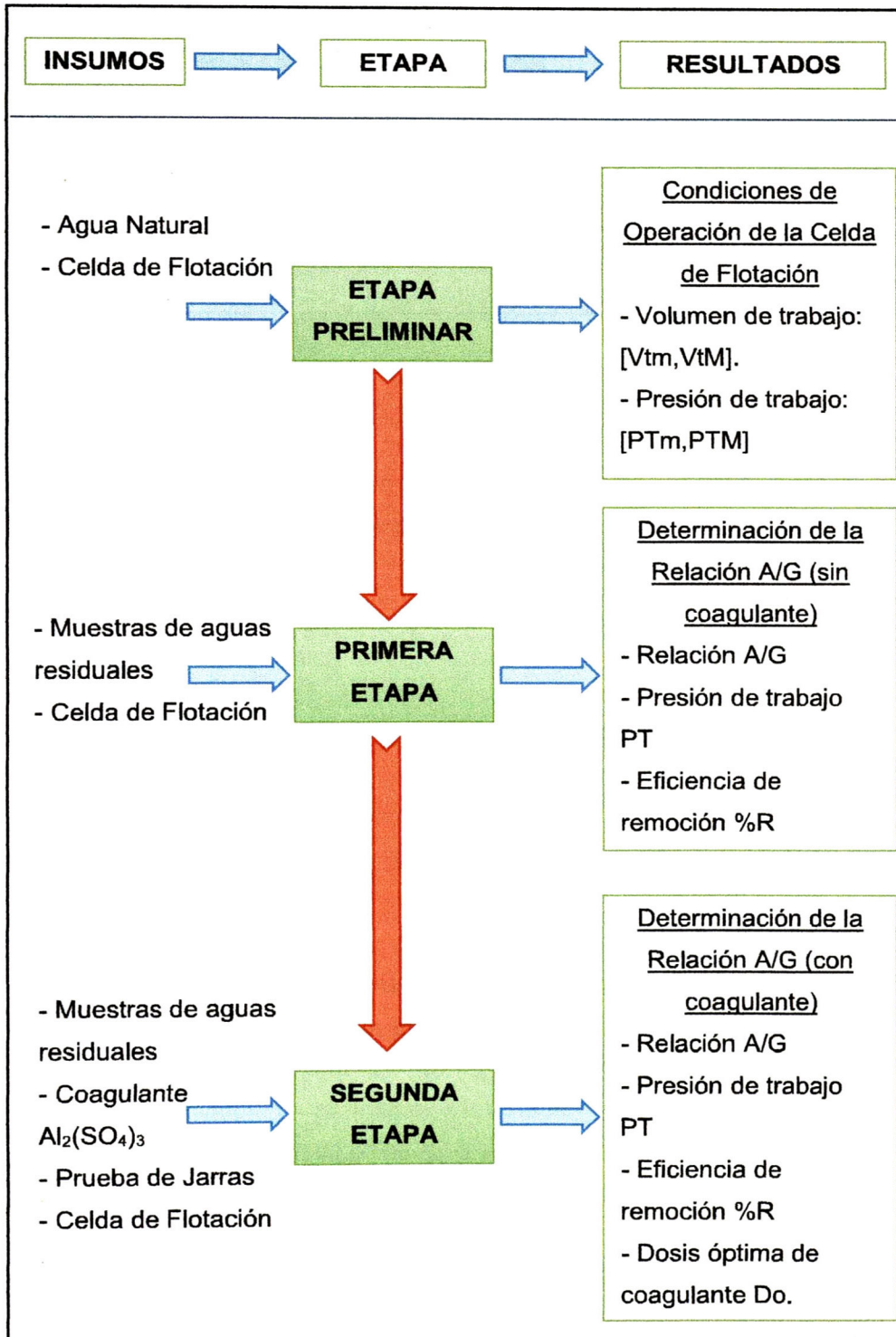
5.4. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

Además de las 02 etapas de investigación, fue necesario la ejecución de una etapa preliminar que permita determinar las condiciones de operación de la celda de flotación (volumen y presión de trabajo) utilizando agua potable como afluente.

Posteriormente, con los datos obtenidos en la etapa preliminar, y utilizando muestras de aguas residuales, se realizaron las pruebas correspondientes a la primera etapa de la investigación, las cuales brindaron información sólida (relación A/G, eficiencia de remoción %R, etc.) del comportamiento de la celda de flotación para distintos grados de concentración de aceites y grasas en el afluente. Asimismo, en esta etapa, se verificaron las condiciones de operación de la celda de flotación, determinados en la etapa preliminar.

Finalmente, en la segunda etapa de la investigación se realizaron pruebas en la celda de flotación, con el uso de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) como coagulante, previamente fue necesario determinar un rango preliminar de la dosis de coagulante, con el uso de pruebas de jarras. Esta etapa permitió cuantificar el efecto que produce el sulfato de aluminio en la remoción de aceites y grasas, a través de una celda de flotación por aire disuelto.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo con los insumos utilizados y resultados obtenidos en cada etapa de la investigación:



Elaboración propia

Figura 15 Diagrama de flujo de la investigación

5.4.1. ETAPA PRELIMINAR: DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CELDA DE FLOTACIÓN

Objetivos

- Determinación del rango de presiones PT y presión óptima de trabajo PT' de la celda de flotación.
- Determinación del volumen óptimo de trabajo Vt de la celda de flotación.

Materiales

- Prototipo de celda de flotación.
- Agua potable o ligeramente mezclada con detergente.
- Cronómetro.

Procedimiento

Para cada presión de trabajo entre 30 y 80 psi (considerar incrementos de 5 a 10 psi):

- Determinar el volumen de trabajo entre 1.6 y 2 litros (considerando incrementos de 0.05 litros).
- Poner en marcha la operación de la celda de flotación y analizar cualitativamente la descarga para determinar la velocidad del flujo (lenta, normal o rápida), el tipo de flujo (gradualmente variado – permanente, rápidamente variado – permanente o variado – no permanente), el volumen descargado (parcial, total o rebalse) y las características de las burbujas formadas (homogénea no heterogénea y constante o variable).
- Se repite el ensayo, variando el volumen de muestra a utilizar hasta lograr una descarga de velocidad normal, un flujo gradualmente variado – permanente, una descarga total y formación de burbujas homogéneas y contantes.
- Finalmente determinar el volumen óptimo, el rango de presiones y la presión óptima de trabajo para la celda de flotación.

5.4.2. PRIMERA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA ENTRE CANTIDAD DE AIRE UTILIZADO Y CANTIDAD DE ACEITES Y GRASAS A TRATAR

Objetivos

- Determinación de la relación óptima A/Go para cada muestra analizada.
- Determinación de la eficiencia de remoción de aceites y grasas (%Ro) y la presión de trabajo (PT') para la relación óptima A/Go de cada muestra analizada.

Materiales

- Prototipo de celda de flotación.
- Muestras de aguas residuales.
- Cronómetro.

Procedimiento

Para cada muestra de aguas residuales:

- Preparar el volumen de muestra determinado en la etapa preliminar de la investigación y seleccionar la presión de trabajo entre 30 y 80 psi (considerar incrementos de 5 a 10 psi).
- Poner en marcha la operación de la celda de flotación.
- Se repite el ensayo, variando la presión de trabajo, se obtendrá una muestra de agua clarificada por cada ensayo.
- Se analizan la concentración aceites y grasas de todas las muestras de agua clarificada y del agua residual cruda.
- Se calcula la relación A/G para cada ensayo.
- Se grafican los valores de relación A/G (eje "X"), eficiencia de remoción (eje "Y") y presión de trabajo (eje "Y" secundario), a partir del cual se obtienen los

valores óptimos: relación A/Go, eficiencia de remoción %Ro y presión de trabajo PT' correspondiente a la muestra de agua residual analizada.

Finalmente, con los valores óptimos obtenidos para cada muestra analizada se grafica la cantidad de aceites y grasas de cada muestra (eje "X"), la relación óptima A/Go (eje "Y") y la eficiencia de remoción %Ro (eje "Y" secundario), obteniendo la curva que relaciona la relación óptima A/Go y el grado de contaminación del afluente.

5.4.3. SEGUNDA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO $Al_2(SO_4)_3$ COMO COAGULANTE

Objetivos

- Determinación de la dosis óptima (D_{jo}) de coagulante mediante prueba de jarras.
- Determinación de la dosis óptima de coagulante mediante la celda flotación (D_o).
- Determinar el efecto producido por el uso de coagulante en la eficiencia de remoción de aceites y grasas.

Materiales

- Equipo de prueba de jarras
- Prototipo de celda de flotación.
- Muestras de aguas residuales.
- Sulfato de aluminio al 5% (coagulante)
- Cronómetro.

Para cada muestra de aguas residuales:

DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE MEDIANTE PRUEBA DE JARRAS

- Seleccionar seis (06) cantidades iniciales de dosis de coagulante.
- Poner en marcha la operación de la prueba de jarras. Se obtendrán 06 muestras de agua residual clarificada (01 por cada jarra).
- Se mide la turbiedad T_b de cada muestra de agua residual clarificada y del agua residual cruda.

- Se grafica la dosis de coagulante D_j (eje "X"), turbiedad T_b (eje "Y") y eficiencia de remoción de turbiedad $\%R_t$ (eje "Y" secundario), a partir del cual, se obtiene la dosis óptima de coagulante (D_{jo}) mediante prueba de jarras. De ser necesario se realizarán más ensayos de pruebas de jarras hasta obtener datos fiables para obtener la dosis óptima de coagulante.

DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE MEDIANTE LA CELDA FLOTACIÓN

- Seleccionar las cantidades iniciales de dosis de coagulante, considerando la gráfica determinada en el paso anterior.
- Para cada valor de dosis de coagulante D (incluir una prueba sin uso de coagulante): Poner en marcha la operación de la celda de flotación considerando el volumen y presión óptimos determinados en la etapa preliminar. Se obtendrá una muestra de agua clarificada por cada ensayo.
- Se analizan la concentración aceites y grasas de todas las muestras de agua clarificada y del agua residual cruda.
- Se grafica dosis de coagulante D (eje "X"), concentración de aceites y grasas del efluente G' (eje "Y") y eficiencia de remoción de aceites y grasas $\%R$ (eje "Y" secundario), a partir del cual se obtiene la dosis óptima de coagulante D_o , mediante la celda de flotación. De ser necesario se realizarán más ensayos en la celda de flotación hasta obtener datos fiables para obtener la dosis óptima de coagulante.

RELACIÓN ÓPTIMA A/ G_o (CON USO DE COAGULANTE)

- Para cada valor de presión de trabajo entre 40 y 70 psi (tomar incrementos de 10 psi): Poner en marcha la operación de la celda de flotación considerando el volumen óptimo determinado en la etapa preliminar y la dosis óptima de coagulante determinado en el paso anterior. Se obtendrán 4 muestras de agua clarificada por cada ensayo.
- Se analizan la concentración aceites y grasas de todas las muestras de agua clarificada.

- Se calcula la relación A/G para cada ensayo.
- Se grafican los valores de relación A/G (eje "X"), eficiencia de remoción (eje "Y") y presión de trabajo (eje "Y" secundario), a partir del cual se obtienen los valores óptimos de: relación A/Go, eficiencia de remoción %Ro y presión de trabajo PT' correspondiente a la muestra de agua residual analizada.

EFFECTO PRODUCIDO POR EL USO DE COAGULANTE EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS

- Poner en marcha la operación de la celda de flotación considerando el volumen óptimo determinado en la etapa preliminar y la presión óptima determinado en el paso anterior (Relación óptima A/Go con uso de coagulante), además no considerar adición de coagulante.
- Se analiza la concentración aceites y grasas de la muestra de agua clarificada.
- Se calcula la relación A/G y la eficiencia de remoción del ensayo.
- Comparar las eficiencias de remoción de aceites y grasas al utilizar la celda de flotación con y sin coagulante.

5.5. PARÁMETROS OPERACIONALES

5.5.1. ACEITES Y GRASAS

La eficiencia de remoción de los procedimientos utilizados en la primera y segunda etapa de la investigación, se determina con la medición de la concentración de aceites y grasas antes y después de cada procedimiento. Su determinación se realizó considerando lo estipulado por la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency) para la determinación de aceites y grasas en "Method 1664, Revision B n-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated n-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non-polar Material) by Extraction and Gravimetry" (EPA-821-R-10-001), el cual es el método estándar utilizado en el país por todos los laboratorios acreditados por INACAL. El análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de Investigación del Agua de la Facultad de Ingeniería Ambiental, utilizando el Método de Extracción de Soxhlet, el cual es validado por la EPA, como un método modificado de bajo costo.

Materiales utilizados:

- Ácido Clorhídrico concentrado.
- Hexano Comercial, con punto de ebullición de 65° a 67°
- Pipeta
- Probeta 250ml
- Vaso de precipitado de 250 ml
- Papel Whatman N°40
- Embudo Buchner
- Matraz Kitasato
- Luna de reloj
- Pinza para capsulas
- Pinza para papel filtro
- Balón de vidrio o matraz bola
- Equipo de extracción Soxhlet
- Bomba de vacío
- Equipo de Destilación
- pH metro
- Plancha eléctrica

- Horno eléctrico
- Desecador
- Balanza analítica

Procedimiento

- Acondicionar el balón de vidrio en el horno eléctrico a una temperatura de 103-105°C durante 30 minutos.
- Enfriar en el desecador y pesarlo (Pi).
- Acidificar 200 ml de muestra (Vol.) hasta un pH menor a 2ml en un vaso de precipitado 250 ml.
- Colocar el filtro Whatman en el embudo Buchner e iniciar con el filtrado de la muestra.
- Doblar cuidadosamente el papel filtro y colocarlo en la luna de reloj.
- Limpiar suavemente con otro pedazo de papel filtro, bañado en Hexano, el vaso de precipitado donde se acidifico la muestra y el embudo Buchner.
- Colocar dicho pedazo de papel filtro en la misma luna de reloj.
- Llevar la luna de reloj al horno a una temperatura de 103-105°C durante 20 minutos para el secado del filtro.
- Retirar la luna de reloj del horno y colocar el papel filtro dentro del equipo de extracción.
- Colocar el balón en la parrilla de calentamiento e instalar el equipo de extracción Soxhlet.
- Agregar el hexano en el cuerpo de extracción, hasta que este se vierta al balón de vidrio. Por precaución, el volumen debe ser mayor al necesario para que se dé el ciclo de extracción.

- Prender la parrilla de extracción a 100°C por cuatro horas. El tiempo se dará inicio del ciclo de extracción (evaporación del metano).
- Al finalizar el ciclo, retirar el balón de vidrio con todo el hexano para su destilación.
- Terminada la destilación, mediante el cual se recupera parte del hexano, llevar el balón al horno a una temperatura de 103-105°C durante 15 minutos.
- Llevar el balón de vidrio en el horno eléctrico a una temperatura de 103-105°C durante 20 minutos.
- Llevar a desecador para su enfriamiento.
- Pesar el balón de vidrio (Pf).
- Para determinar la concentración de aceites y grasas se obtiene a través de la siguiente fórmula (considerar Vol. = 200 ml):

$$\text{Aceites y grasas} = \frac{Pf - Pi}{Vol.} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 8)}$$

5.5.2. TURBIEDAD

Se realizó la medición de la turbiedad por el método nefelométrico, con el uso de un (01) turbidímetro de la marca Hatch, en el afluente y efluentes del procedimiento de determinación de la dosis óptima de coagulante mediante prueba de jarras, estas mediciones sirvieron como aproximación y línea base para la determinación de la dosis óptima de coagulante en la celda de flotación.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1. ETAPA PRELIMINAR: DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA CELDA DE FLOTACIÓN







Previo al funcionamiento de la celda de flotación con aguas residuales, fue necesario la determinación de las condiciones iniciales de volumen y presión de trabajo que garanticen que el prototipo simule la flotación por aire disuelto en forma óptima.

Dado que la determinación de los parámetros de operación de la celda es cualitativa (debido a la imposibilidad de medir exactamente las características del flujo en el prototipo), se planteó un código de color que permita identificar y diferenciar el resultado de la operación de cada prueba realizada. Dicho código considera 04 características del procedimiento de operación de la celda de flotación:

- Velocidad de descarga: puede ser lenta, rápida o normal, solo en caso de esta última, la celda de flotación funciona adecuadamente.
- Tipo de flujo: debido a la geometría variable, en dirección del flujo, del prototipo de celda de flotación, el flujo siempre será variado, asimismo, dependiendo del comportamiento de la descarga en el tiempo, puede ser permanente o no permanente. La celda de flotación funciona adecuadamente cuando el flujo es variado y permanente, pero alcanza su funcionamiento óptimo cuando el flujo es gradualmente variado y permanente.
- Descarga: puede ser parcial o total, según se logre la descarga parcial o total, de la mezcla agua aire del tanque de presurización. Asimismo, se puede generar rebalse, cuando la descarga rebosa el tanque de flotación. Cabe indicar, que se considera descarga total (funcionamiento óptimo) cuando se vacía por lo menos el 80% del volumen del tanque de presurización, el 20% restante corresponde al volumen de aire en el tanque y al residuo sobrante por las pérdidas de carga del procedimiento.

- Características de la burbuja: puede ser homogénea o heterogénea, en función de la uniformidad del tamaño de las burbujas y constante o variable en función de que su forma, tamaño y uniformidad se mantengan en el tiempo. El funcionamiento de la celda es aceptable, cuando las características de la burbuja son homogéneas, pero alcanza su óptimo, cuando son homogéneas y constantes.

Tabla 6 Código de color para la determinación de las condiciones iniciales de operación de la celda de flotación.

Ítem	Código de color	Velocidad de descarga	Tipo de flujo	Descarga	Características de la burbuja
1		Lenta	Casi no existe flujo	Parcial	Heterogénea y variable
2		Lenta	Gradualmente variado - permanente	Parcial	Heterogénea y variable
3		Normal	Gradualmente variado - permanente	Total	Homogénea ligeramente variable
4		Normal	Gradualmente variado - permanente	Total	Homogénea y constante
5		Normal	Rápidamente variado - permanente	Total	Homogénea ligeramente variable
6		Rápida	Variado - no permanente	Rebalse	Heterogénea y variable
7			No se realizaron pruebas		

Elaboración propia

De acuerdo a la tabla anterior, el funcionamiento óptimo de la celda de flotación es posible cuando se cumplen las condiciones del ítem 4, mientras que los ítems 3 y 5 garantizan un funcionamiento aceptable de la celda de flotación. Finalmente, el funcionamiento de la celda de flotación es deficiente para las condiciones de los ítems restantes (1,2 y 6).

Se realizaron 66 ensayos en la etapa preliminar de la investigación, variando los valores de presión de trabajo entre 30 y 80 psi y los valores de volumen de trabajo, entre 1.60 y 2 litros. A continuación, se presentan los resultados de cada uno de ellos.

Tabla 7 Resultados de etapa preliminar

Vt vs PT		PRESION DE TRABAJO PT (PSI, m.c.a.)										
		30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
		21	25	28	32	35	39	42	46	49	53	56
VOLUMEN DE TRABAJO Vt (L.)	1.60											
	1.65											
	1.70											
	1.75											
	1.80											
	1.85											
	1.90											
	1.95											
	2.00											

Elaboración propia

En la tabla anterior, se observa claramente el área (región encerrada por los códigos de color 3, 4 y 5; verde claro, celeste y verde oscuro respectivamente) de valores de presión y volumen de trabajo, para los cuales, la celda de flotación funciona de forma óptima o aceptable, fuera de dicha área (códigos de color 1,2 y 6; rojo, amarillo y anaranjado) la celda de flotación funciona deficientemente, ello se encuentra detallado la siguiente tabla.

Tabla 8 Rango de valores de presión y volumen de trabajo de la celda de flotación y su funcionamiento

Ítem	Presión de trabajo PT		Volumen de Trabajo Vt (L)			Funcionamiento de la celda
	PSI	m.c.a.	Vtm	VtM	Vto	
1	30	21	-	-	-	Deficiente
2	35	25	1.75	1.80	-	Aceptable
3	40	28	1.75	1.85	1.75	Óptimo
4	45	32	1.75	1.85	1.75	Óptimo
5	50	35	1.70	1.90	1.75	Óptimo
5	50	35	1.70	1.90	1.80	Óptimo
6	55	39	1.60	1.90	1.80	Óptimo
7	60	42	1.60	1.90	1.80	Óptimo
8	65	46	1.70	1.90	1.80	Óptimo
9	70	49	1.75	1.90	1.80	Óptimo
10	75	53	1.80	1.90	-	Aceptable
11	80	56	-	-	-	Deficiente

Elaboración propia

Del cuadro anterior se tiene que: la celda de flotación funciona de forma aceptable para presiones de trabajo de entre 35 a 75 psi (25 a 53 m.c.a.) y volúmenes de trabajo de entre 1.60 y 1.90 litros, pero encuentra su valor óptimo, para presiones de trabajo de entre 40 a 70 psi (28 a 49 m.c.a.) y volúmenes de trabajo de entre 1.75 y 1.80 litros. Siendo el volumen total del tanque de 2.2 litros, el porcentaje del tanque a ser llenado con agua residual debe ser del 80%.

Para las siguientes etapas de la investigación se pondrá en marcha la celda de flotación con volúmenes de aguas residuales equivalentes al volumen óptimo correspondiente a la presión de trabajo seleccionada. Cuando se realicen pruebas con presiones de trabajo de 35 o 75 psi (25 o 53 m.c.a.) se utilizará el volumen de agua residual que garantice el funcionamiento aceptable de la celda.

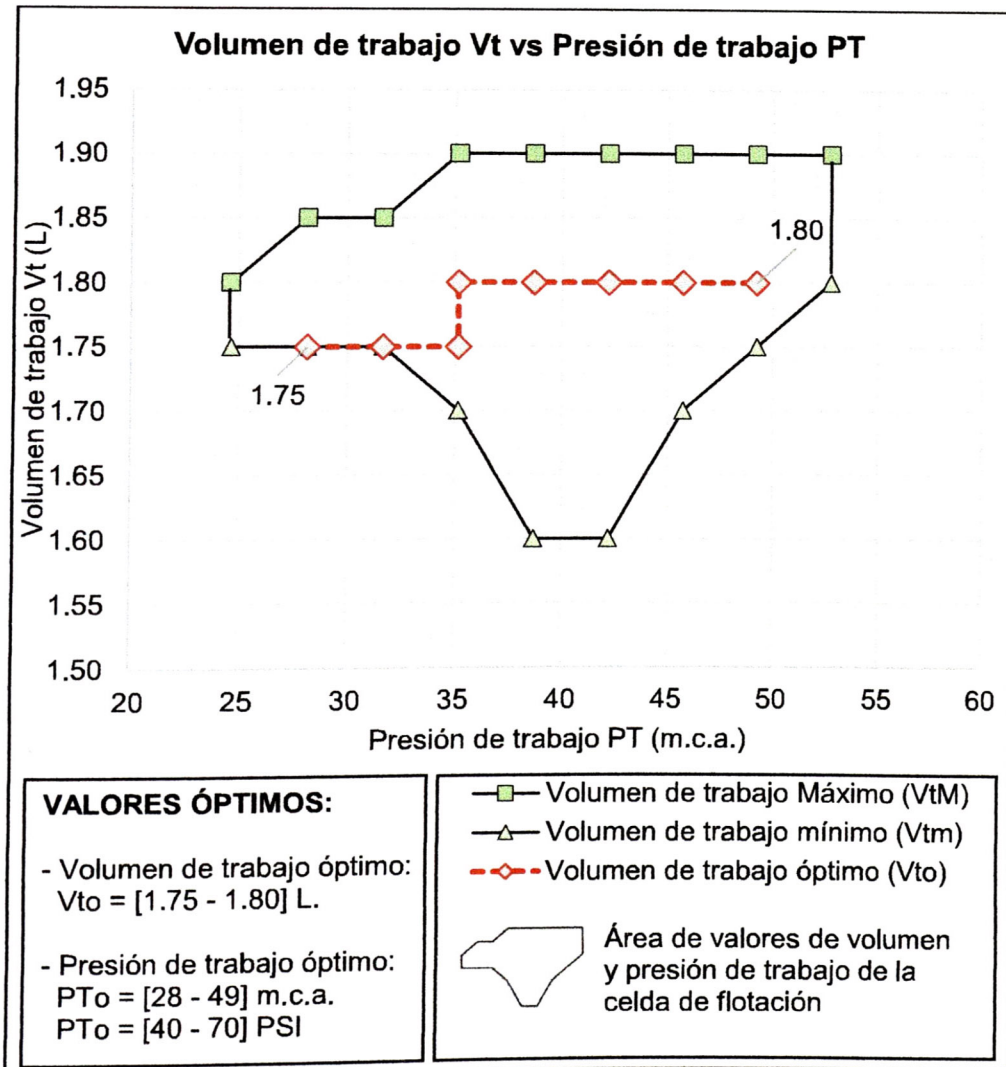


Gráfico 3 Condiciones iniciales de operación de la celda de flotación

6.2. PRIMERA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA ENTRE CANTIDAD DE AIRE UTILIZADO Y CANTIDAD DE ACEITES Y GRASAS A TRATAR

Para la primera etapa de la investigación, inicialmente, fue necesario conocer los datos iniciales requeridos para el cálculo de la relación óptima A/G para cada muestra. Para la presentación de dichos datos se utilizó la siguiente simbología:

M#	Muestra N°
P#	Prueba N°
ID	Rótulo de Prueba
T	Temperatura Ambiente en la Prueba
C	Solubilidad del Aire a 1 atm y Temperatura Ambiente
Pv	Presión de Vapor a Temperatura Ambiente
d	Densidad del Aire a Presión y Temperatura Ambiente

Cabe indicar, que la presión atmosférica local se mantuvo constante para todas las pruebas en la celda de flotación por aire disuelto, las cuales fueron realizadas en la vivienda del tesista (4to piso – azotea) sitio en Jr. San Agustín N° 275 – Surquillo, cuya cota topográfica es de 134 m.s.n.m. (medido con GPS navegador), para la cual, la presión atmosférica local es de 748 mmHg.

Los resultados se presentan considerando la siguiente simbología.

PT	Presión de trabajo del tanque de presurización
G'	Concentración de aceites y grasas en el efluente.
%R	Eficiencia de remoción de aceites y grasas

A/G Relación entre cantidad de Aire utilizado y Aceites y grasas en el afluente

Posteriormente, se presenta un gráfico que permitirá identificar los valores óptimos para cada muestra, bajo la siguiente simbología:

A/Go Relación óptima entre cantidad de Aire utilizado y Aceites y grasas en el afluente

PT' Presión de trabajo óptima

%Ro Eficiencia óptima de remoción de aceites y grasas

Finalmente, se grafican todos los valores óptimos obtenidos (A/Go, PT' y %Ro) de cada muestra, en función de la concentración de aceites y grasas del afluente de cada una de ellas

6.2.1. RELACIÓN A/G Y A/Go PARA CADA MUESTRA

Tabla 9 Muestra N° 1: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
1	1	P1	19	292.15	19.08	0.32	16.40	0.22	1.190
	2	P3	19	292.15	19.08	0.32	16.40	0.22	1.190
	3	P4	19	292.15	19.08	0.32	16.40	0.22	1.190
	4	P5	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	5	P6	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	6	P7	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186

Elaboración propia

Tabla 10 Muestra N° 1: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
1	1	40	2069	28	759.00	43%	0.0209
	2	50	2586	35	726.00	45%	0.0303
	3	55	2844	39	502.50	62%	0.0351
	4	60	3103	42	491.50	63%	0.0390
	5	65	3361	46	367.00	72%	0.0436
	6	70	3620	49	424.00	68%	0.0482

Elaboración propia

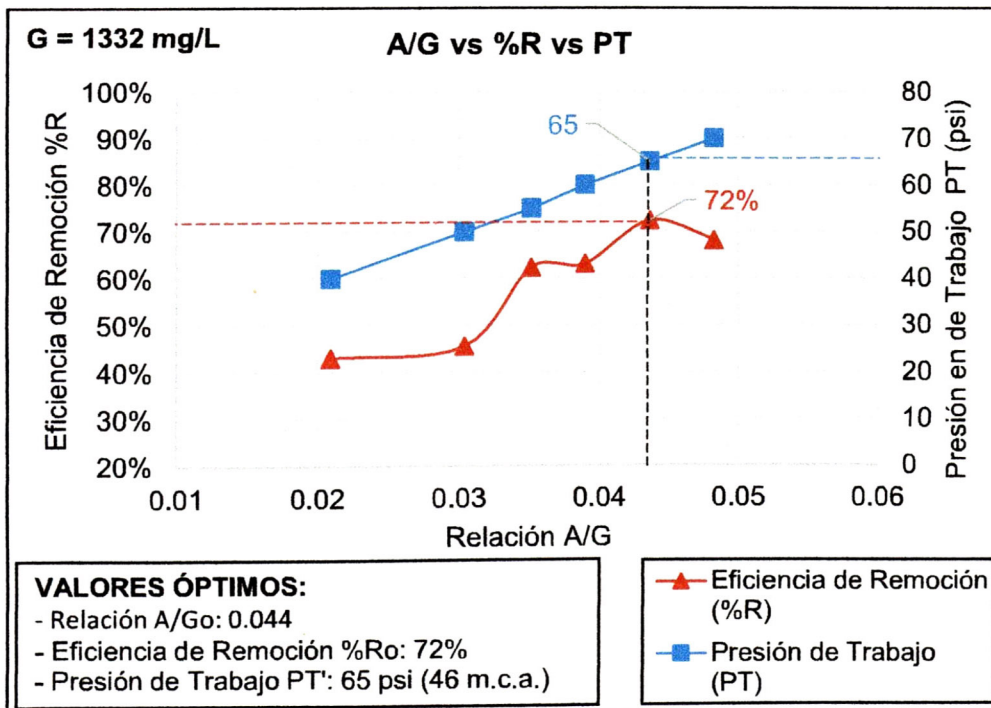


Gráfico 4 Muestra N° 1: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 11 Muestra N° 2: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
2	1	P1	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	2	P2	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	3	P3	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	4	P4	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	5	P5	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	6	P6	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	7	P7	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186

Elaboración propia

Tabla 12 Muestra N° 2: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
2	1	40	2069	28	909.50	36%	0.0192
	2	45	2327	32	840.00	41%	0.0235
	3	50	2586	35	704.00	50%	0.0279
	4	55	2844	39	612.50	57%	0.0322
	5	60	3103	42	510.00	64%	0.0366
	6	65	3361	46	403.00	72%	0.0410
	7	70	3620	49	487.50	66%	0.0453

Elaboración propia

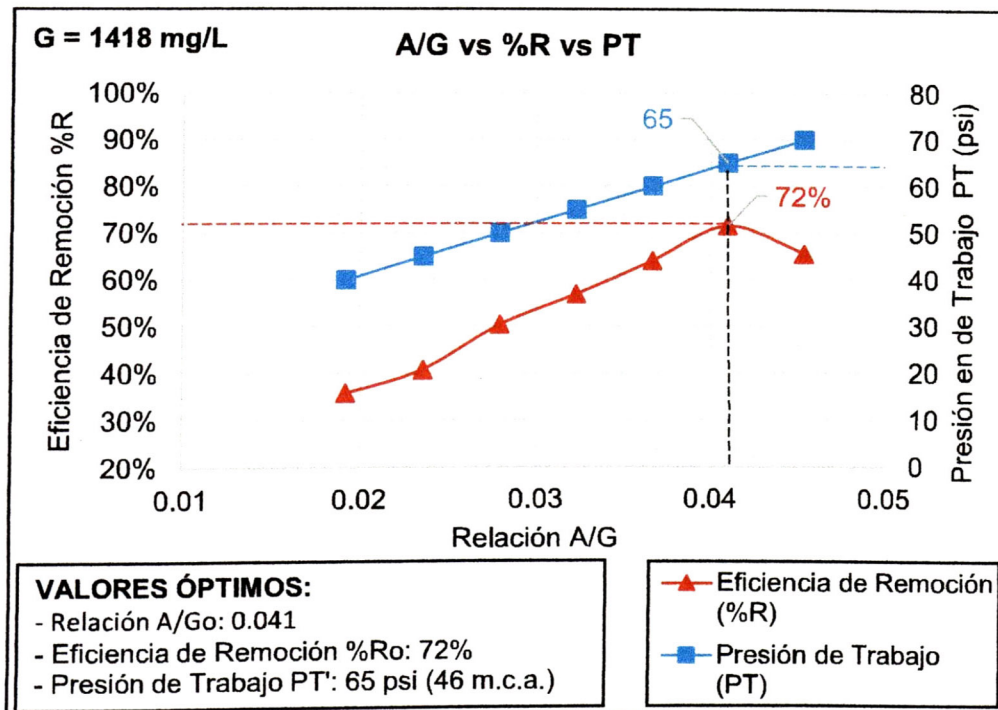
**Gráfico 5** Muestra N° 2: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 13 Muestra N° 3: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
3	1	P1	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	2	P2	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	3	P3	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	4	P4	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	5	P5	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	6	P6	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	7	P7	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186

*Elaboración propia***Tabla 14** Muestra N° 3: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
3	1	40	2069	28	255.00	64%	0.0383
	2	45	2327	32	201.50	72%	0.0471
	3	50	2586	35	194.00	73%	0.0558
	4	55	2844	39	206.00	71%	0.0645
	5	60	3103	42	201.50	72%	0.0732
	6	65	3361	46	255.00	64%	0.0819
	7	70	3620	49	244.00	66%	0.0906

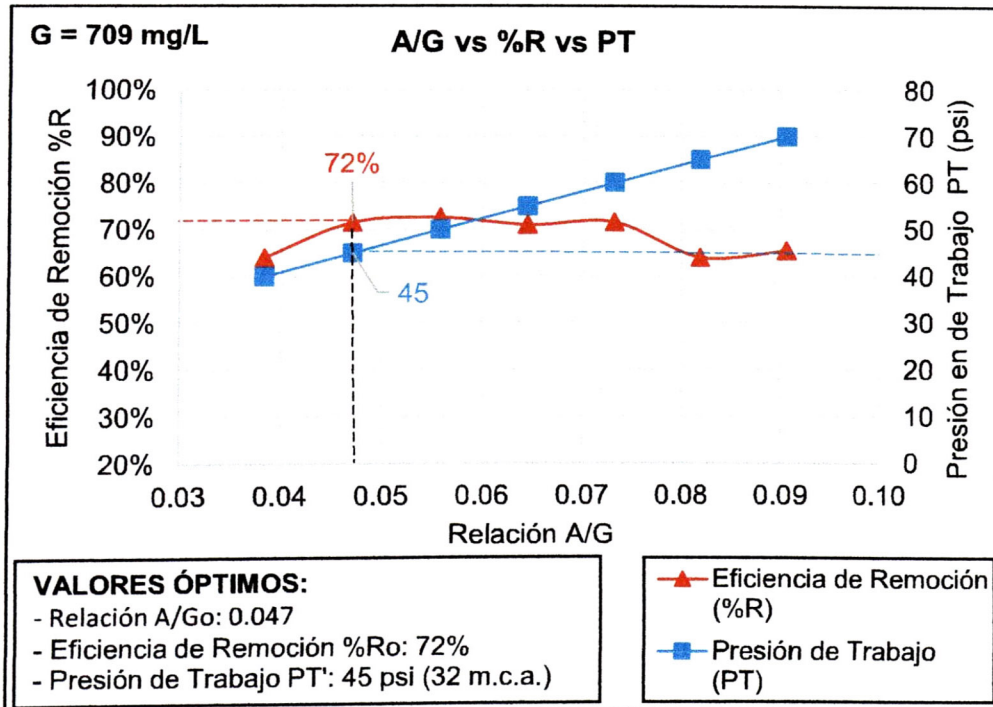
Elaboración propia**Gráfico 6** Muestra N° 3: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 15 Muestra N° 4: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
	1	P1	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	2	P2	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	3	P3	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
4	4	P4	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	5	P5	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	6	P6	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	7	P7	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186

Elaboración propia

Tabla 16 Muestra N° 4: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
	1	40	2069	28	482.50	53%	0.0264
	2	45	2327	32	432.50	58%	0.0325
	3	50	2586	35	371.00	64%	0.0385
4	4	55	2844	39	309.00	70%	0.0445
	5	60	3103	42	302.50	71%	0.0505
	6	65	3361	46	303.50	70%	0.0565
	7	70	3620	49	366.00	64%	0.0625

Elaboración propia

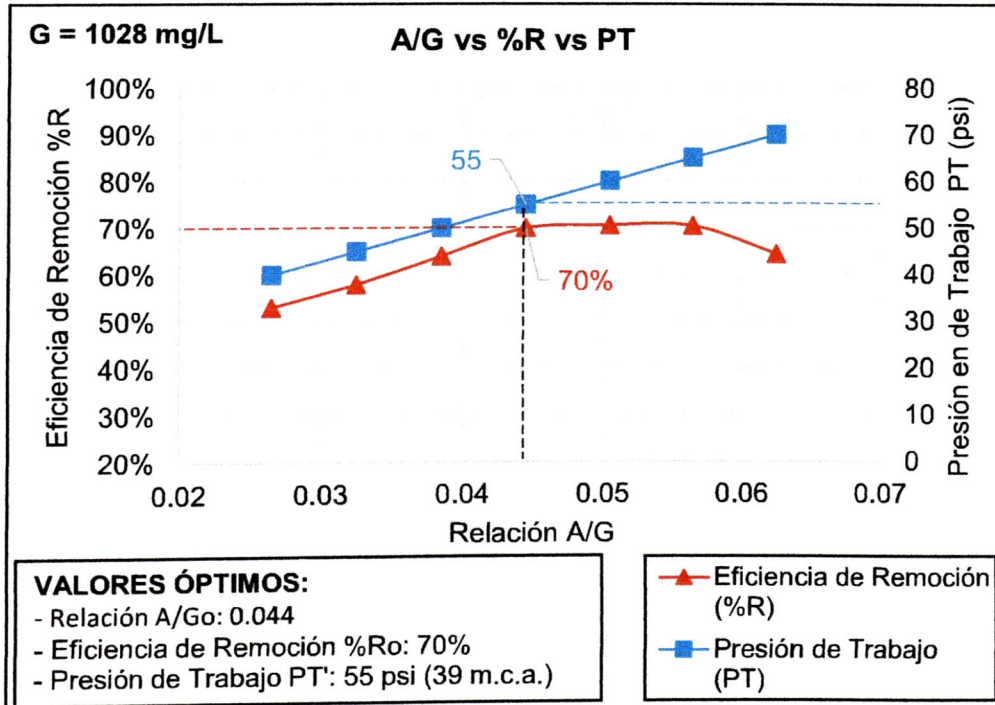
**Gráfico 7** Muestra N° 4: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 17 Muestra N° 5: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
5	1	P1	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	2	P2	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	3	P3	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	4	P4	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	5	P5	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	6	P6	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186

Elaboración propia

Tabla 18 Muestra N° 5: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
5	1	40	2069	28	797.50	37%	0.0216
	2	45	2327	32	606.00	52%	0.0266
	3	50	2586	35	502.50	60%	0.0315
	4	55	2844	39	463.00	63%	0.0364
	5	60	3103	42	365.00	71%	0.0413
	6	65	3361	46	411.00	67%	0.0462

Elaboración propia

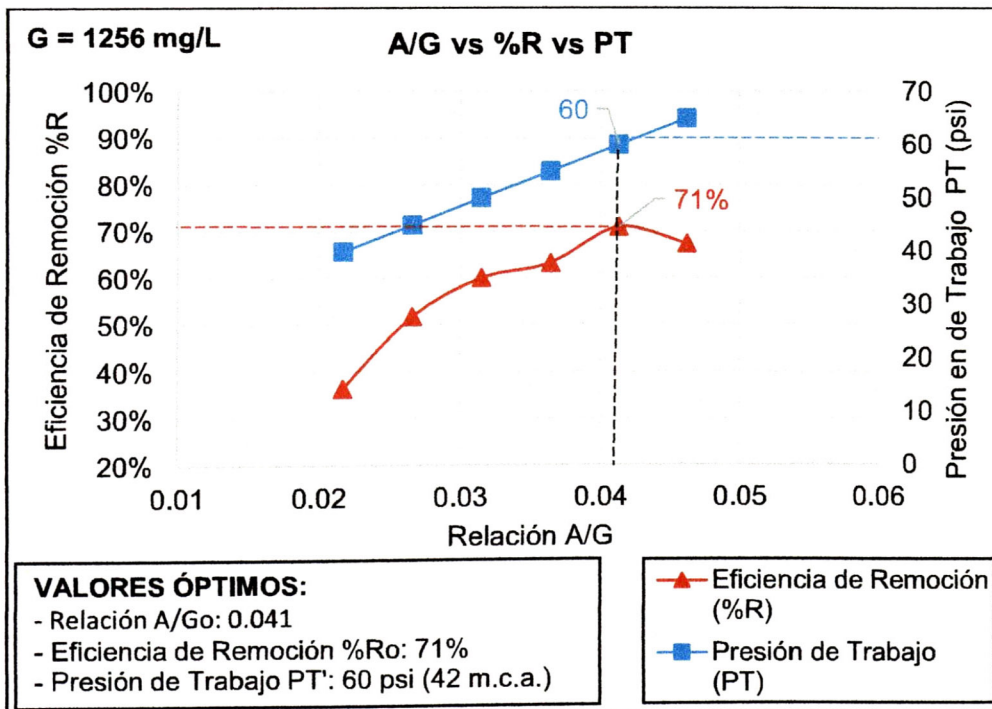


Gráfico 8 Muestra N° 5: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 19 Muestra N° 6: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
6	1	R2	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	2	R3	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	3	R4	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	4	R5	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	5	R7	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	6	R8	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186

Elaboración propia

Tabla 20 Muestra N° 6: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
6	1	40	2069	28	951.50	32%	0.0192
	2	45	2327	32	845.50	39%	0.0236
	3	50	2586	35	595.50	57%	0.0279
	4	55	2844	39	576.50	59%	0.0329
	5	65	3361	46	338.50	76%	0.0418
	6	70	3620	49	627.50	55%	0.0462

Elaboración propia

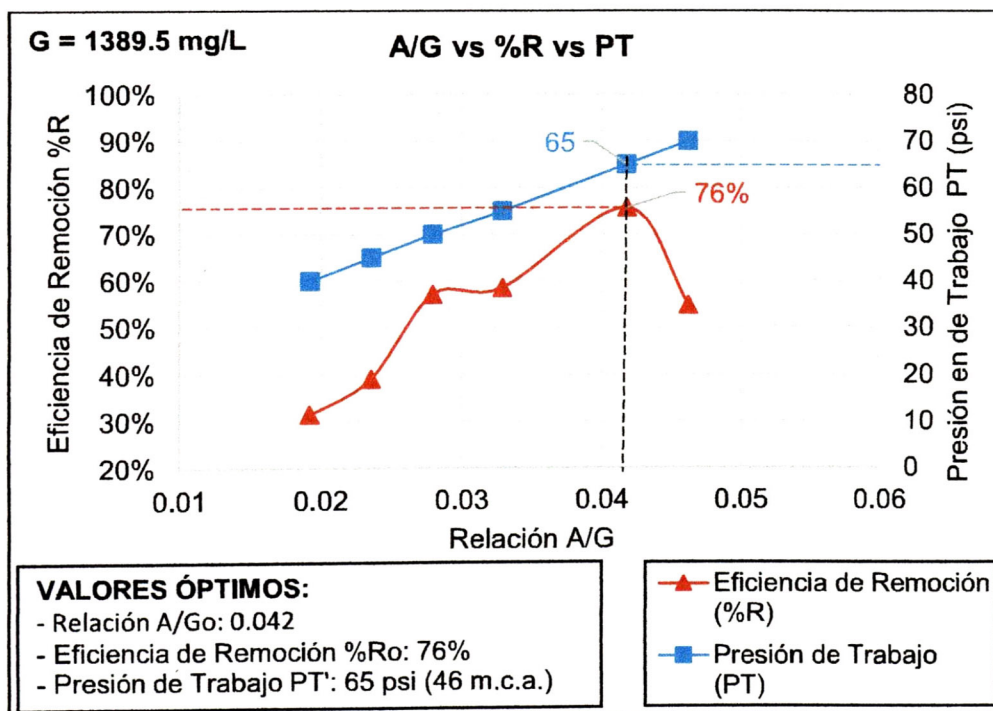


Gráfico 9 Muestra N° 6: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 23 Muestra N° 8: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
8	1	R1	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173
	2	R2	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173
	3	R3	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173
	4	R4	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177
	5	R7	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177
	6	R8	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177

*Elaboración propia***Tabla 24** Muestra N° 8: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
8	1	35	1810	25	209.00	54%	0.0438
	2	40	2069	28	154.50	66%	0.0566
	3	50	2586	35	141.50	69%	0.0823
	4	55	2844	39	135.00	70%	0.0970
	5	70	3620	49	307.00	32%	0.1364
	6	75	3879	53	351.50	22%	0.1495

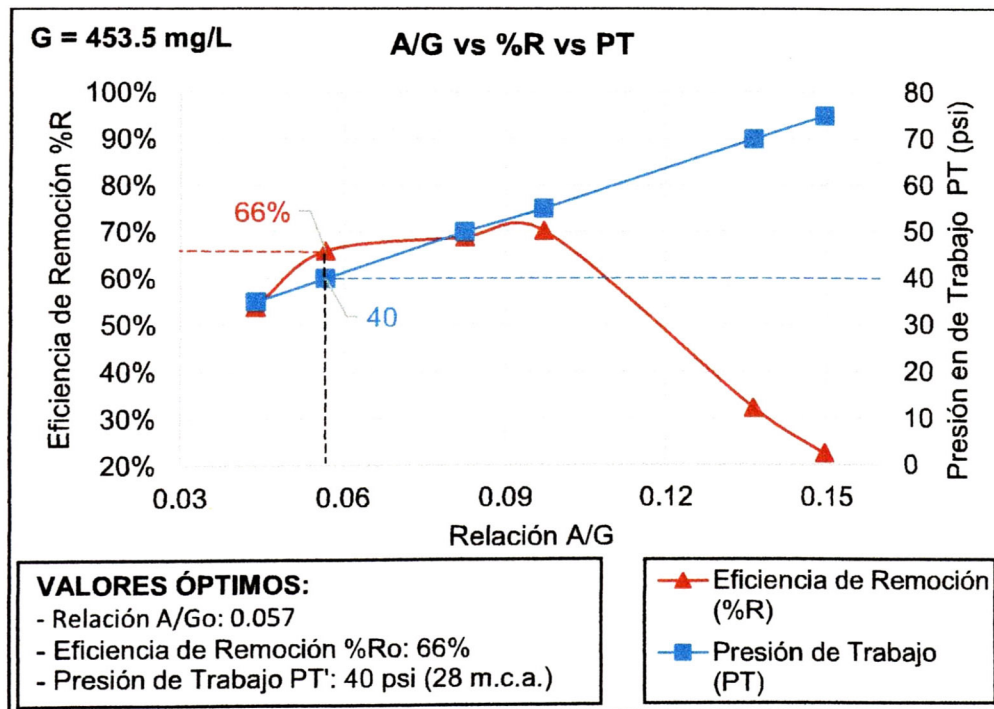
Elaboración propia**Gráfico 11** Muestra N° 8: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 25 Muestra N° 9: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
9	1	R1	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	1'	R1'	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	2	R2	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	3	R3	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	4	R4	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181
	5	R5	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181

*Elaboración propia***Tabla 26** Muestra N° 9: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
9	1	40	2069	28	161.50	76%	0.0394
	1'	45	2327	32	127.00	81%	0.0483
	2	50	2586	35	92.50	86%	0.0573
	3	55	2844	39	130.50	81%	0.0662
	4	60	3103	42	35.50	95%	0.0752
	5	70	3620	49	132.50	80%	0.0931

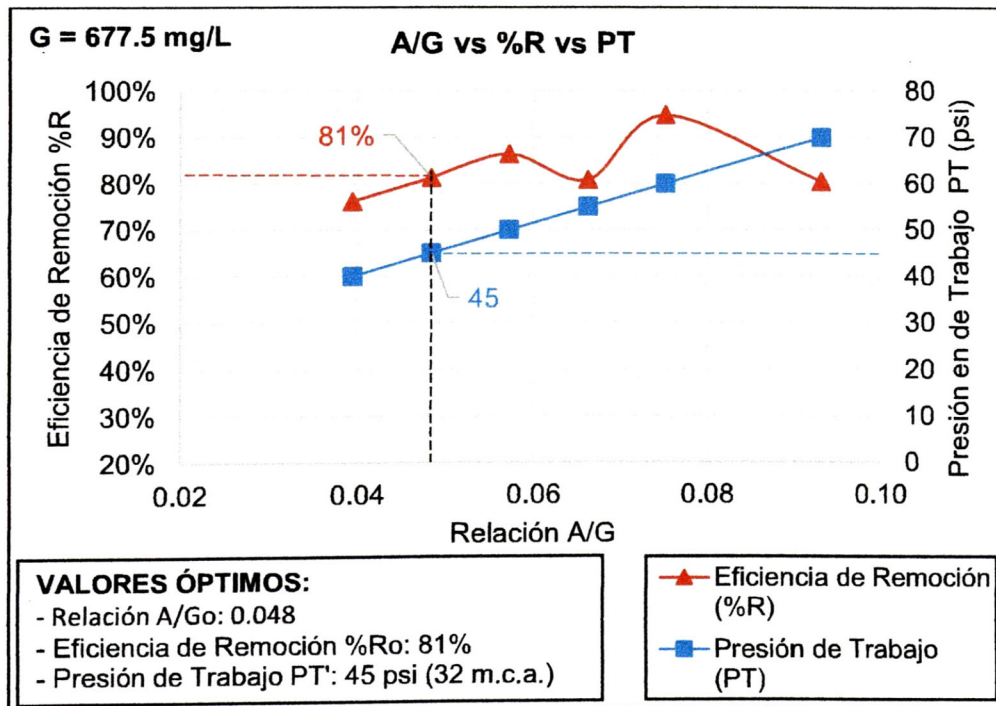
Elaboración propia**Gráfico 12** Muestra N° 9: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 27 Muestra N° 10: Datos Iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
10	1	P0	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	2	P1	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	3	P2	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	4	P3	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	5	P4	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186
	6	P5	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186

Elaboración propia

Tabla 28 Muestra N° 10: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
10	1	35	1810	25	185.00	27%	0.0826
	2	40	2069	28	176.50	31%	0.1068
	3	50	2586	35	175.50	31%	0.1554
	4	60	3103	42	178.00	30%	0.2039
	5	65	3361	46	174.50	31%	0.2282
	6	70	3620	49	186.50	27%	0.2525

Elaboración propia

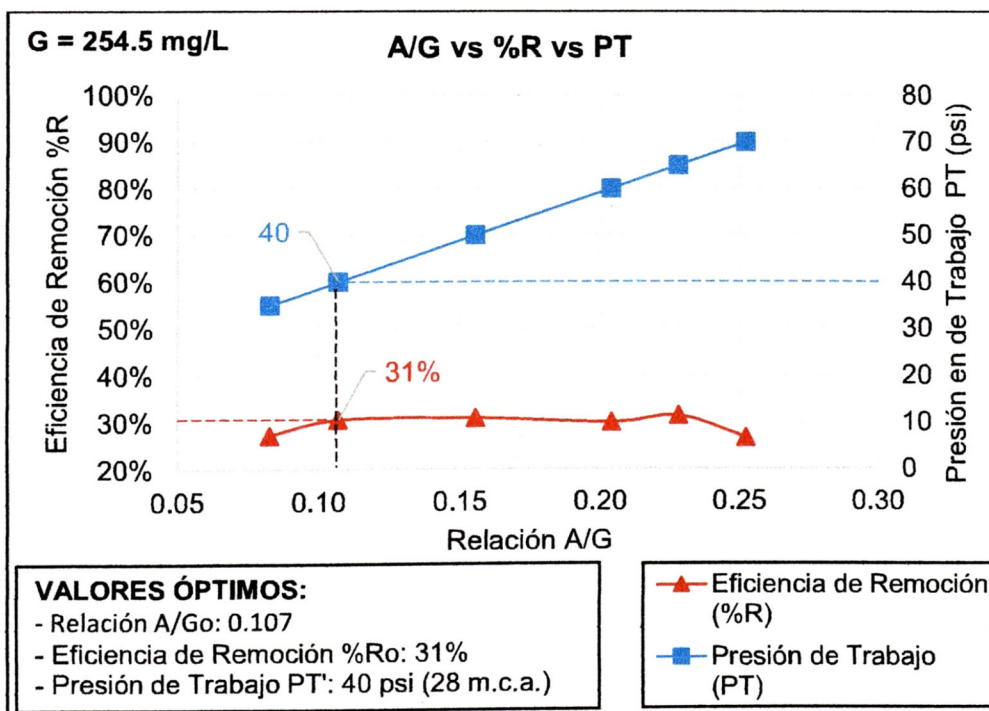


Gráfico 13 Muestra N° 10: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

6.2.2. VALORES ÓPTIMOS A/Go , $\%Ro$ y PT' PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ACEITES Y GRASAS (G)

De los resultados obtenidos para cada muestra. Se tiene la siguiente tabla y gráficas resumen.

Tabla 29 Valores óptimos: A/Go , $\%Ro$ y PT' para cada muestra

M#	G (mg/L)	PT' (psi)	PT' (mmHg)	PT' (m.c.a.)	$G'o$ (mg/L)	$\%Ro$	A/Go
1	1332.00	65	3361	46	367.00	72%	0.044
2	1418.00	65	3361	46	403.00	72%	0.041
3	709.00	45	2327	32	201.50	72%	0.047
4	1028.00	55	2844	39	309.00	70%	0.044
5	1256.00	60	3103	42	365.00	71%	0.041
6	1389.50	65	3361	46	338.50	76%	0.042
7	846.50	50	2586	35	164.00	81%	0.044
8	453.50	40	2069	28	154.50	66%	0.057
9	677.50	45	2327	32	127.00	81%	0.048
10	254.50	40	2069	28	176.50	31%	0.107

Elaboración propia

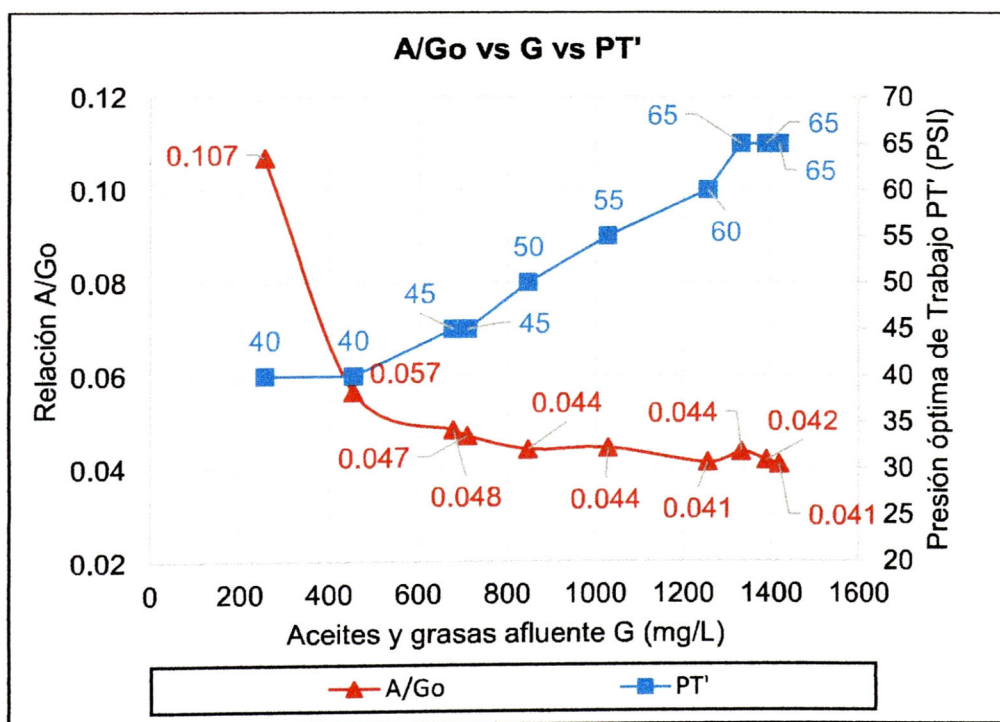


Gráfico 14 Valores óptimos: A/Go y PT' en función de G

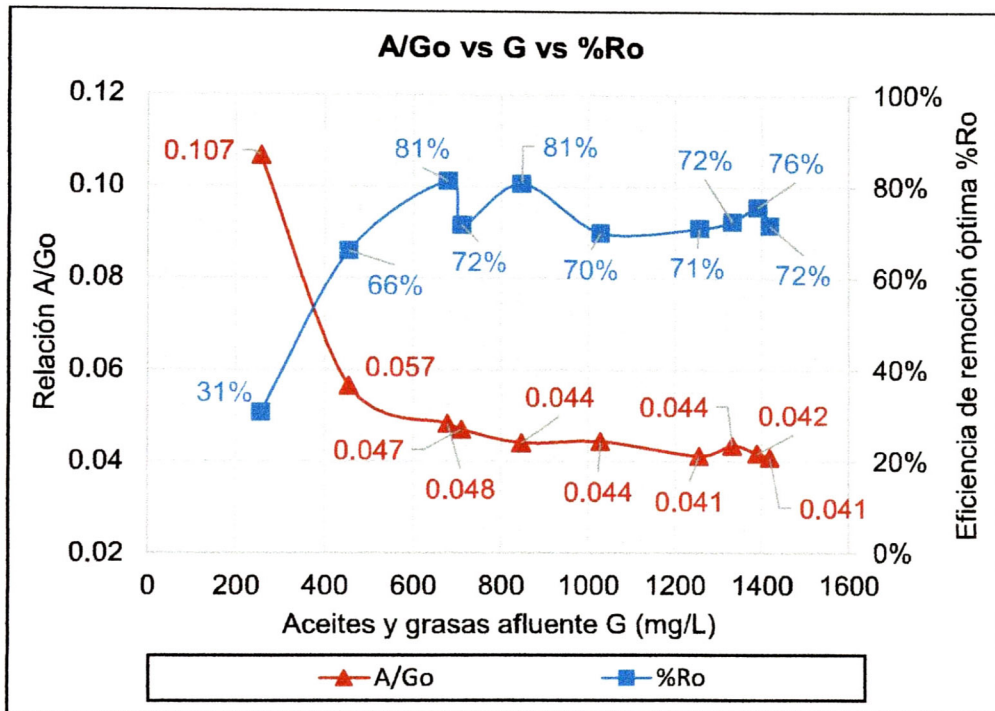


Gráfico 15 Valores óptimos: A/Go y %Ro en función de G

6.3. SEGUNDA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO $Al_2(SO_4)_3$ COMO COAGULANTE

6.3.1. DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE MEDIANTE PRUEBA DE JARRAS (REFERENCIAL)

Para la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, inicialmente se preparó la solución concentrada de sulfato de aluminio al 5% y se procedió a poner en marcha la prueba de jarras.

Cabe resaltar, que la dosis óptima determinada en esta etapa es solo un valor referencial y aproximado (línea base), que tiene como objetivo limitar el número de pruebas y el rango de las dosis utilizadas en el procedimiento de determinación de dosis óptima mediante la celda de flotación.

Los resultados se describen a continuación.

Tabla 30 Muestra N° 11: Resultados prueba de jarras

Prueba N°	Dosis	Volumen de coagulante	Turbiedad efluente	Eficiencia de remoción de turbiedad
P#	Dj (mg/L)	Vc (ml)	Tb (UNT)	%Rt
Crudo			617	
1	5	0.2	383	38%
2	10	0.4	382	38%
3	15	0.6	395	36%
4	20	0.8	345	44%
5	25	1.0	319	48%
6	50	2.0	208	66%
7	75	3.0	105	83%
8	100	4.0	49.5	92%
9	125	5.0	32.9	95%
10	150	6.0	26.3	96%
11	175	7.0	18	97%
12	200	8.0	17.4	97%
13	250	10.0	17.2	97%

Elaboración propia

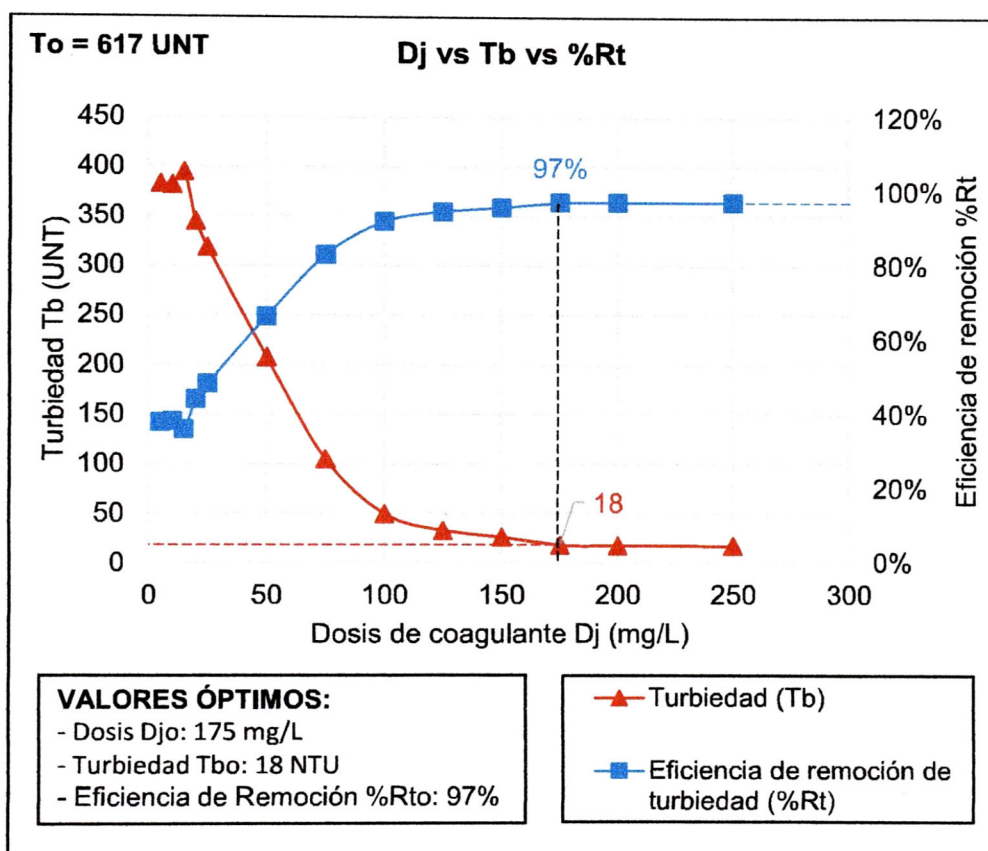


Gráfico 16 Muestra N° 11: Dosis óptima de coagulante (prueba de jarras)

Tabla 31 Muestra N° 12: Resultados prueba de jarras

Prueba N°	Dosis	Volumen de coagulante	Turbiedad efluente	Eficiencia de remoción de turbiedad
P#	Dj (mg/L)	Vc (ml)	Tb (UNT)	%Rt
Crudo			947	
1	25	1.0	625	34%
2	50	2.0	526	44%
3	75	3.0	432	54%
4	100	4.0	252	73%
5	125	5.0	115	88%
6	150	6.0	84	91%
7	175	7.0	78	92%
8	200	8.0	76	92%
9	250	10.0	72	92%
10	300	12.0	80	92%

Elaboración propia

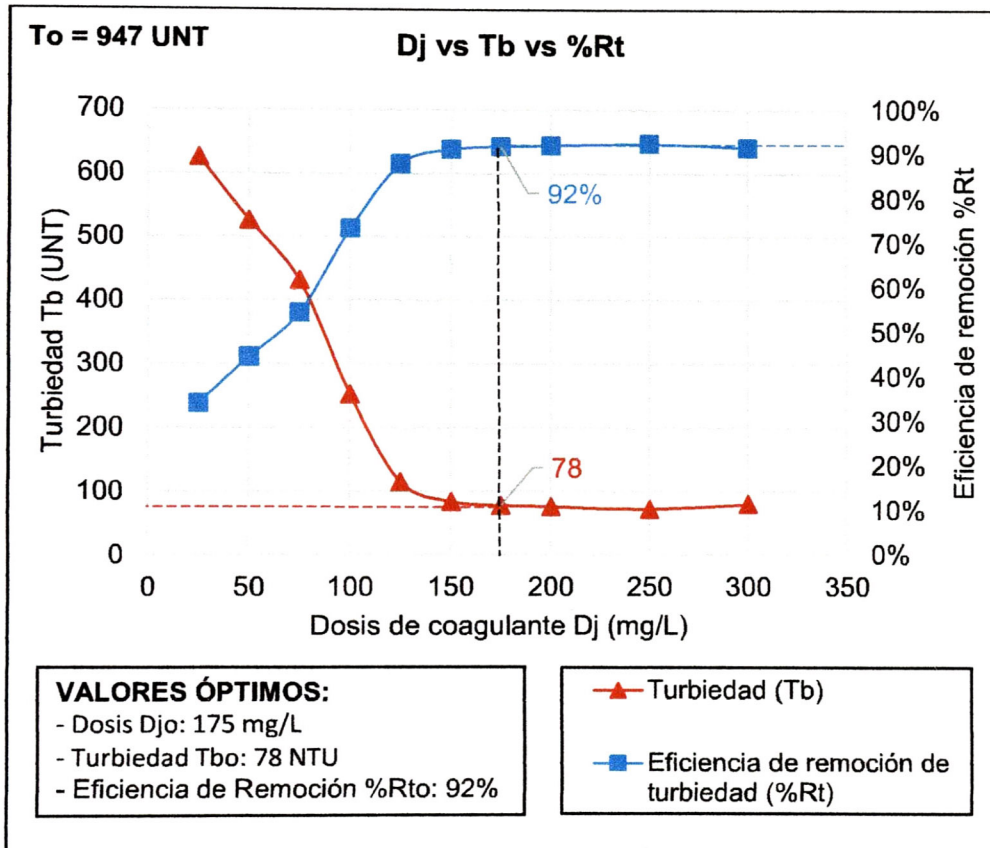


Gráfico 17 Muestra N° 12: Dosis óptima de coagulante (prueba de jarras)

6.3.2. DOSIS ÓPTIMA DE COAGULANTE MEDIANTE LA CELDA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

Para la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, inicialmente se preparó la solución concentrada de sulfato de aluminio al 5% y se procedió a poner en marcha la celda de flotación para cada dosis considerada. Asimismo, en concordancia con los resultados obtenidos en la etapa preliminar (ver **Gráfico 3**), se mantuvo constantes la presión de trabajo en 50 psi (35 m.c.a.) y el volumen de trabajo en 1.80 litros, con los cuales se garantiza el funcionamiento óptimo de la celda y por consiguiente, la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$.

Tabla 32 Muestra N° 11: Resultados celda de flotación (con coagulante)

Rótulo de Prueba	Prueba N°	Dosis	Volumen de coagulante	Aceites y Grasas Efluente	Eficiencia de remoción
ID	P#	D (mg/L)	Vc (ml)	G' (mg/L)	%R
P0	Crudo			228.00	
P8	1	0	0.0	156.00	32%
P1	2	50	2.0	106.00	54%
P2	3	100	4.0	79.70	65%
P3	4	150	6.0	58.30	74%
P4	5	200	8.0	29.90	87%
P5	6	250	10.0	23.10	90%
P9	7	300	12.0	22.80	90%

Elaboración propia

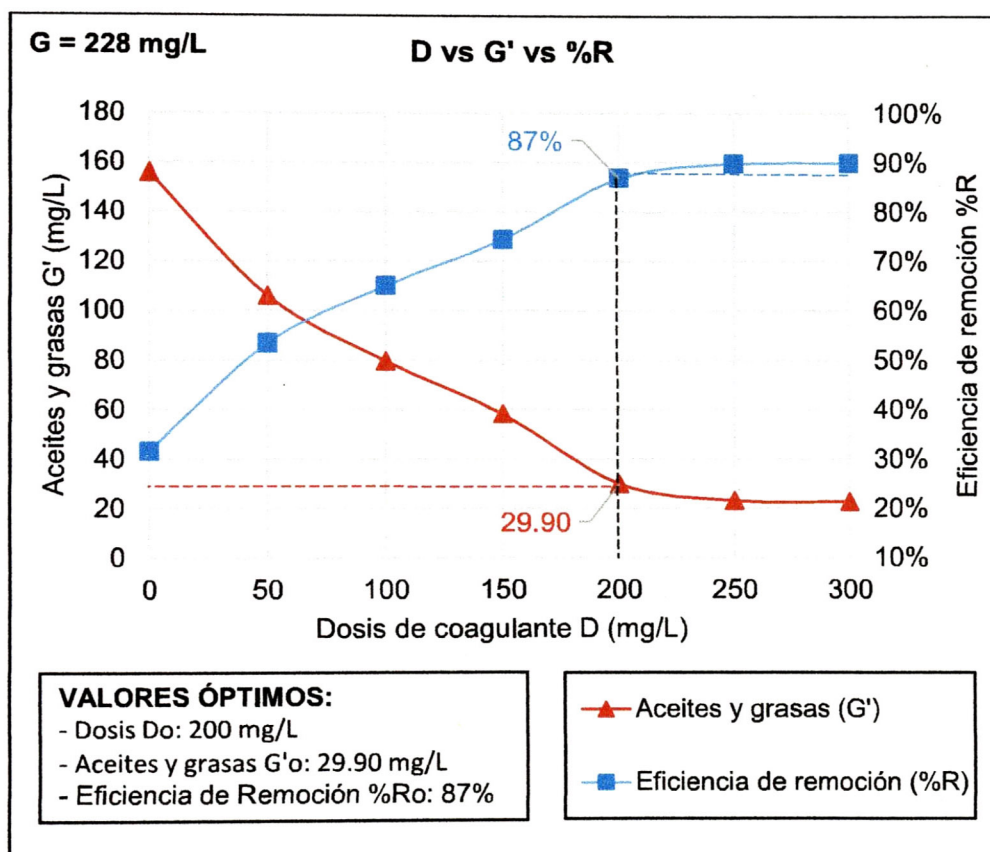


Gráfico 18 Muestra N° 11: Dosis óptima de coagulante mediante celda de flotación por aire disuelto

Tabla 33 Muestra N° 12: Resultados celda de flotación (con coagulante)

Rótulo de Prueba	Prueba N°	Dosis	Volumen de coagulante	Aceites y Grasas Efluente	Eficiencia de remoción
ID	P#	D (mg/L)	Vc (ml)	G' (mg/L)	%R
R0	Crudo			824.00	
R8	1	0	0.0	191.50	77%
R1	2	25	1.0	157.10	81%
R2	3	50	2.0	143.00	83%
R3	4	75	3.0	122.50	85%
R4	5	100	4.0	88.50	89%
R5	6	125	5.0	91.50	89%
R9	7	150	6.0	86.70	89%

Elaboración propia

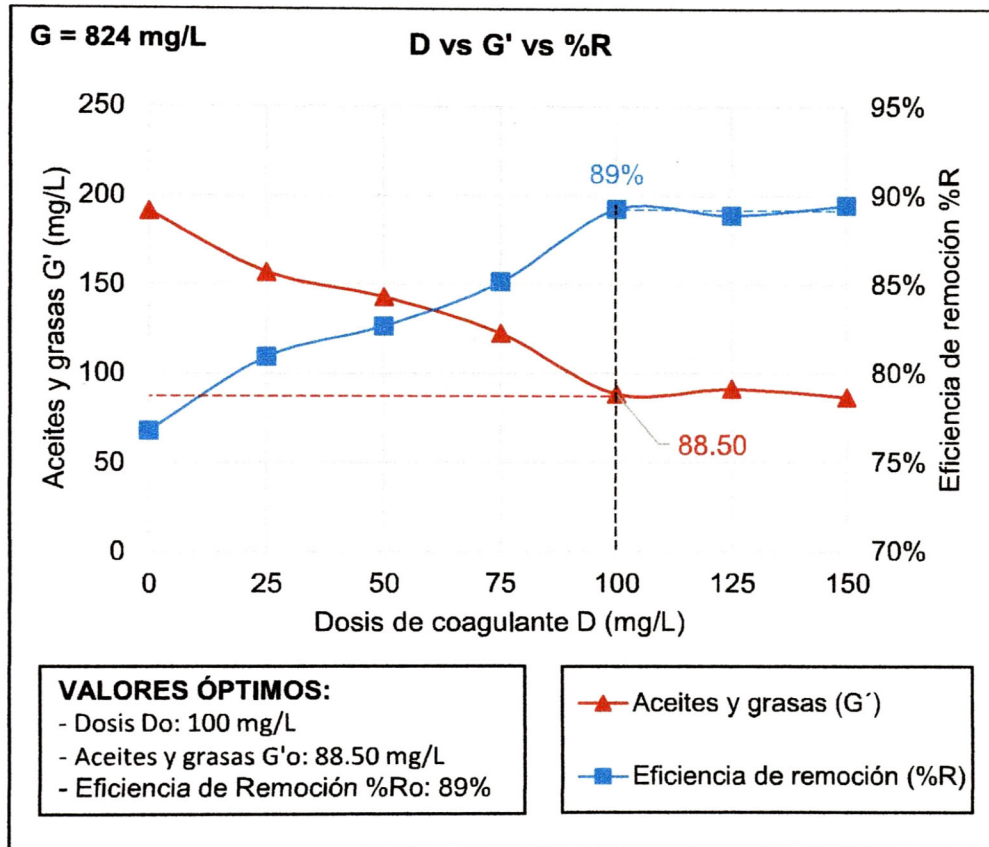


Gráfico 19 Muestra N° 12: Dosis óptima de coagulante mediante celda de flotación por aire disuelto

6.3.3. RELACIÓN ÓPTIMA A/Go (CON USO DE COAGULANTE)

Para la determinación de relación óptima A/Go, Se realizaron 04 ensayos para cada muestra, manteniendo constante la dosis de coagulante (dosis óptima).

Tabla 34 Muestra N° 11: Datos iniciales

M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
11	7	P6	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177
	8	P4	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177
	11	P7	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177
	12	P10	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177

Elaboración propia

Tabla 35 Muestra N° 11: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
11	1	40	2069	28	52.00	77%	0.1148
	2	50	2586	35	29.90	87%	0.1670
	3	60	3103	42	25.60	89%	0.2191
	4	70	3620	49	22.40	90%	0.2712

Elaboración propia

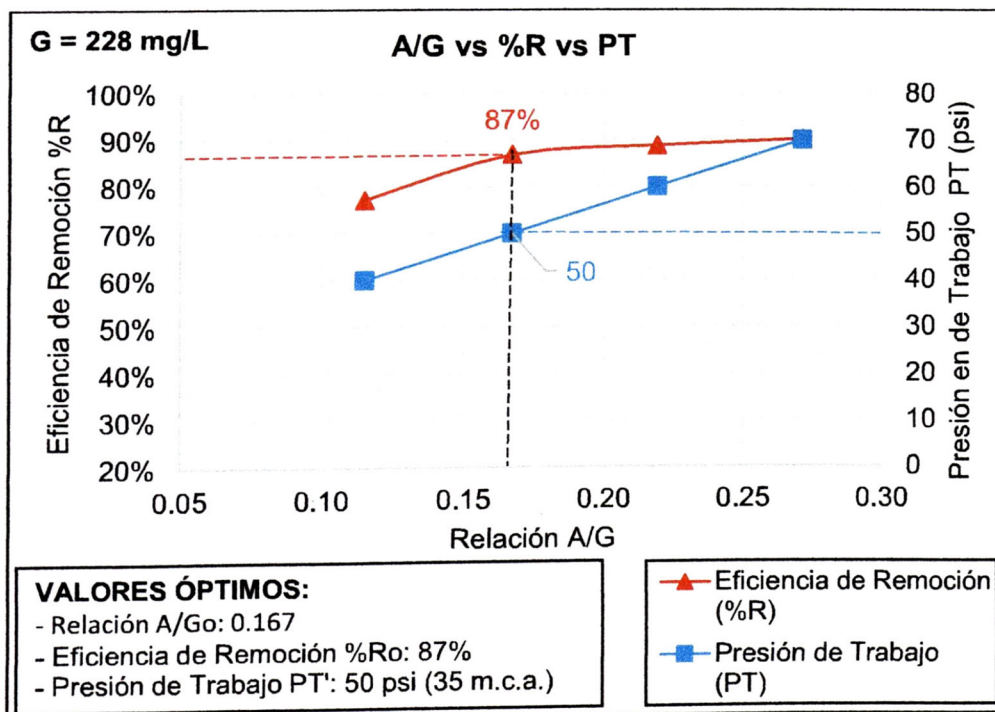


Gráfico 20 Muestra N° 11: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

Tabla 36 Muestra N° 12: Datos iniciales

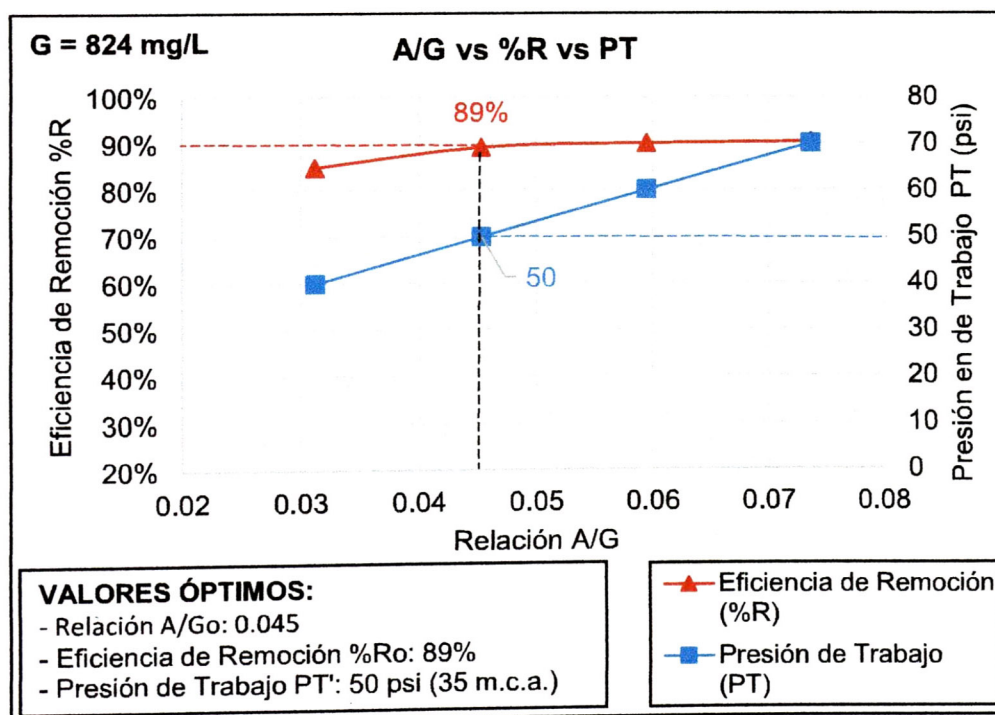
M#	P#	ID	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHg)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)
12	13	R6	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173
	16	R4	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173
	17	R7	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173
	18	R10	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173

Elaboración propia

Tabla 37 Muestra N° 12: Resultados

M#	P#	PT (psi)	PT (mmHg)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G
12	1	40	2069	28	124.10	85%	0.0312
	2	50	2586	35	88.50	89%	0.0453
	3	60	3103	42	82.30	90%	0.0595
	4	70	3620	49	79.00	90%	0.0736

Elaboración propia

**Gráfico 21** Muestra N° 12: Valores óptimos: A/Go, %Ro y PT'

6.3.4. EFECTO PRODUCIDO POR EL USO DE COAGULANTE EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS

Para determinar el efecto producido por el uso del sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante, se compararon los resultados obtenidos en la celda de flotación con y sin uso de coagulante, manteniendo la presión de trabajo en 50 psi (35 m.c.a.) para ambas pruebas (ver **Gráfico 20** y **Gráfico 21**).

Tabla 38 Efecto producido por el uso de coagulante en la celda de flotación

Muestra N°	Aceites y Grasas de la Muestra	Uso de Coagulante	Rótulo de Prueba	Aceites y Grasas Efluente	Eficiencia de remoción	Relación Aire / Aceites y Grasas
M#	G (mg/L)		ID	G' (mg/L)	%R	A/G
11	228.00	No	P8	156.00	32%	0.167
		Si	P4	29.90	87%	0.167
12	824.00	No	R8	191.50	77%	0.045
		Si	R4	88.50	89%	0.045

Elaboración propia

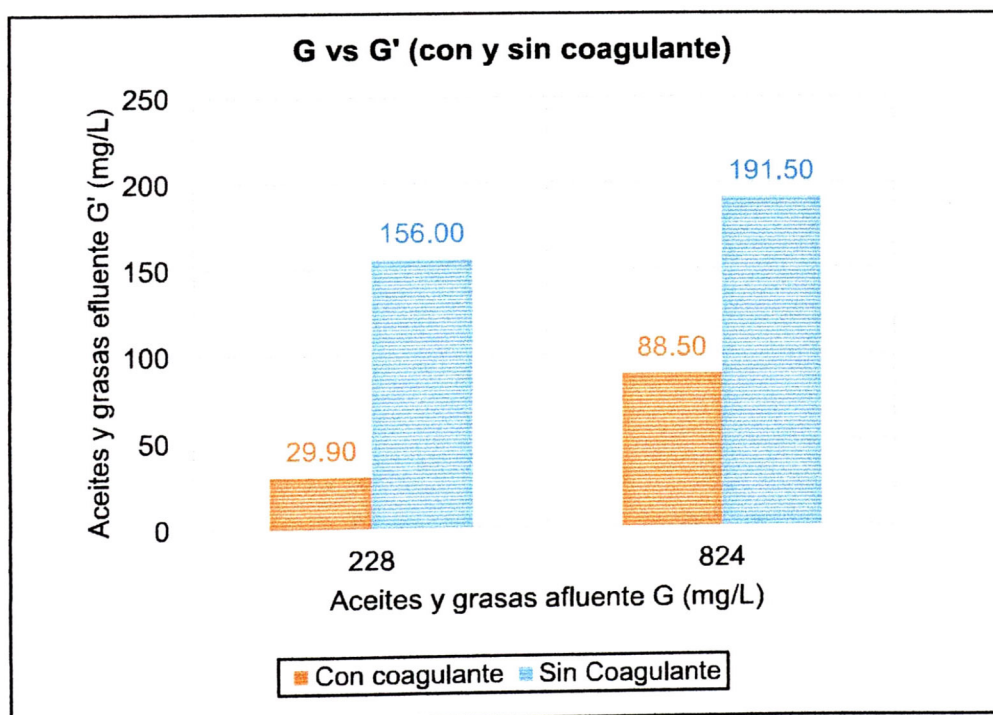


Gráfico 22 Efecto producido por el uso de coagulante en la concentración de aceites y grasas del efluente

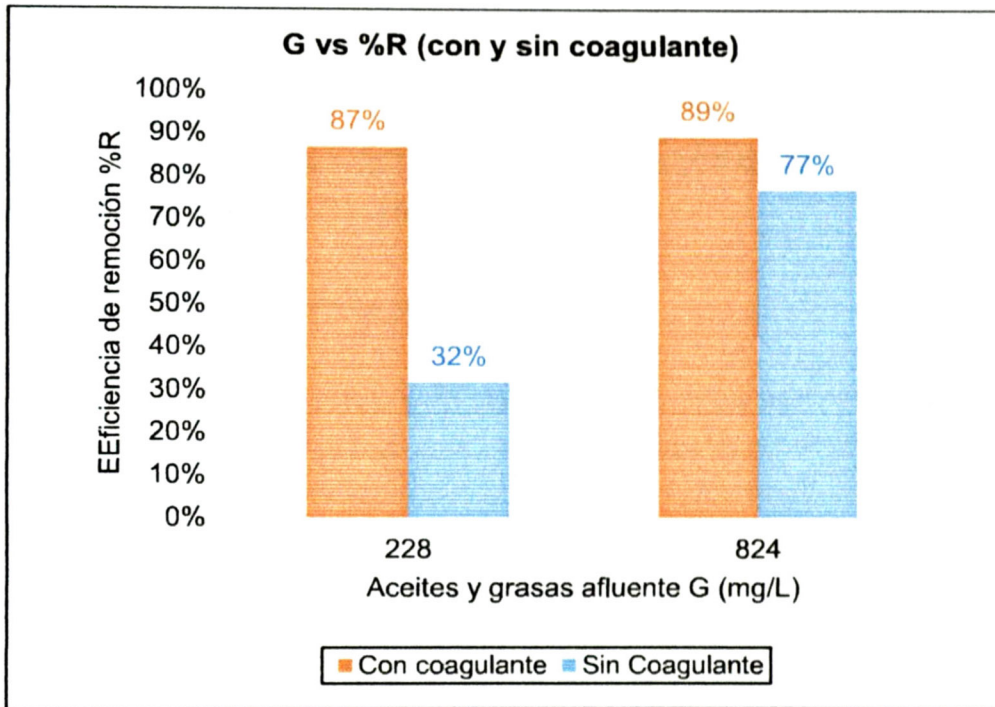


Gráfico 23 Efecto producido por el uso de coagulante en la eficiencia de remoción de aceites y grasas

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1. PRIMERA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA ENTRE CANTIDAD DE AIRE UTILIZADO Y CANTIDAD DE ACEITES Y GRASAS A TRATAR

7.1.1. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN PT' y G

Según las condiciones iniciales de operación de la celda de flotación por aire disuelto (ver **Tabla 8**), se requieren presiones de trabajo de entre 40 y 70 psi para el funcionamiento óptimo del prototipo, esto fue comprobado en los ensayos con aguas residuales, en los cuales se observó que para presiones de trabajo menores 40 psi (28 m.c.a.), no es posible la descarga completa de la mezcla agua residual – aire, mientras que para presiones de trabajo mayores a 70 psi (49 m.c.a.) la mezcla agua aire se reestabiliza y genera rebalse.

El **Gráfico 14** muestra claramente que la presión óptima de trabajo (PT'), para diferentes grados de concentración de aceites y grasas en el afluente (G), tiene un comportamiento creciente desde los 40 psi (28 m.c.a.) hasta los 65 psi (46 m.c.a.). Por lo tanto, para aguas residuales con concentraciones de aceites y grasas (G) menores a 250 mg/L, la presión óptima de trabajo será menor o igual a 40 psi; mientras que para aguas residuales con concentraciones de aceites y grasas (G) mayores a 1400 mg/L, la presión óptima de trabajo será mayor o igual a 65 psi.

Finalmente, la celda de flotación no es apta para la determinación de la relación óptima A/G para aguas residuales con concentraciones de aceites y grasas (G) menores a 250 mg/L. Asimismo, para concentraciones de aceites y grasas (G) mayores a 1400 mg/L, solamente es apta, hasta que la presión óptima de trabajo no exceda los 70 psi.

7.1.2. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN %Ro y G

El **Gráfico 15** muestra que la eficiencia óptima de remoción de aceites y grasas (%Ro) crece en forma directa a la concentración de aceites y grasas, manteniéndose siempre por encima del 70% para aguas residuales con más de 500 mg/L y disminuyendo drásticamente, por debajo del 70%, para concentraciones menores a 500 mg/L.

El alto contenido de aceites y grasas (encima de 500 mg/L) en las aguas residuales favorece la flotación por aire disuelto, debido a la presencia predominante de aceites y grasas en estado libre, mecánicamente emulsionadas y adheridas en materiales particulados, las cuales, por su gran tamaño, disminuyen fácilmente su densidad, al contacto con las burbujas de aire.

Por otro lado, cuando el contenido de aceites y grasas en las aguas residuales es menor a 500 mg/L, la flotación por aire disuelto se perjudica por la presencia predominante de aceites y grasas “químicamente” emulsionadas o “químicamente” estabilizadas, los cuales, por su baja densidad y tamaño, no es posible su remoción por medios físicos.

7.1.3. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN A/Go y G

Con el objetivo de determinar una función matemática que represente la curva de variación de la relación óptima entre la cantidad de aire utilizado y cantidad de aceites y grasas a tratar A/Go, respecto a la concentración de aceites y grasas del agua residual cruda G (ver **Gráfico 15**), se analizó el comportamiento de las funciones exponencial, lineal, logarítmica, polinómica y potencial. La aproximación de dichas funciones a la relación A/Go vs G, la ecuación que las gobierna y su respectivo coeficiente de correlación, se presentan a continuación:

$$y = 0.0827e^{-6 \times 10^{-4}x}, R^2 = 0.63 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 9)}$$

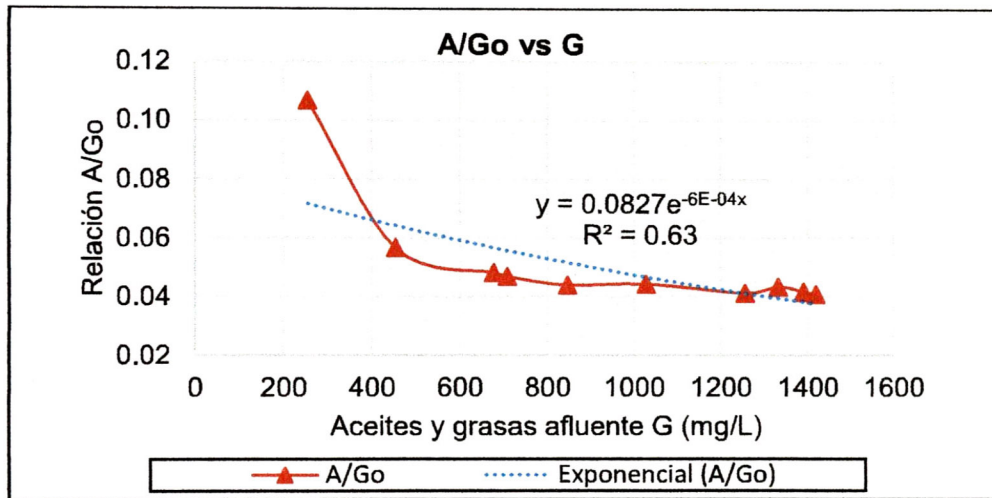


Gráfico 24 Correlación A/Go vs G, función exponencial

$$y = -4 \times 10^{-5}x + 0.0847, R^2 = 0.53 \dots\dots\dots \text{'Ecuación 10)}$$

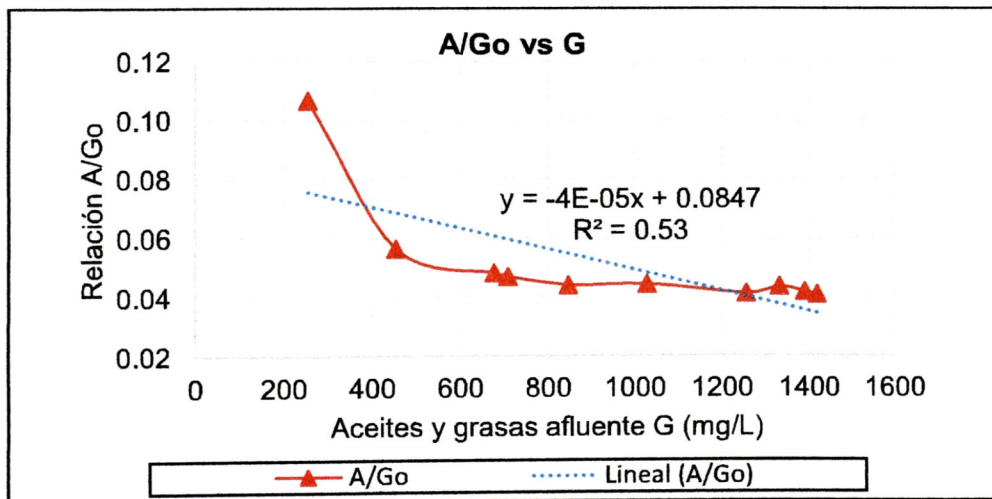


Gráfico 25 Correlación A/Go vs G, función lineal

$$y = -0.031\ln(x) + 0.2597, R^2 = 0.75 \dots\dots\dots \text{'Ecuación 11)}$$

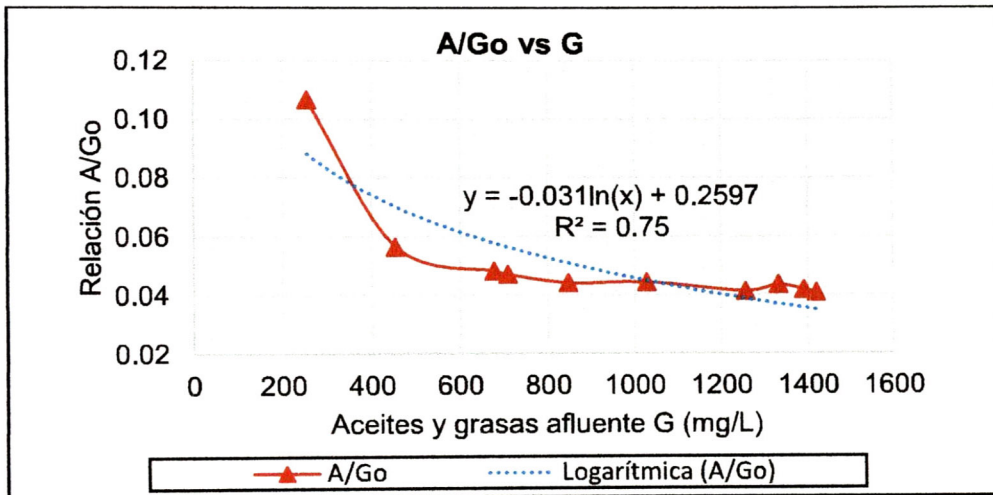


Gráfico 26 Correlación A/Go vs G, función logarítmica

$$y = 9 \times 10^{-8}x^2 - 0.0002x + 0.14, \dots\dots\dots \text{'Ecuación 12)}$$

$$R^2 = 0.88$$

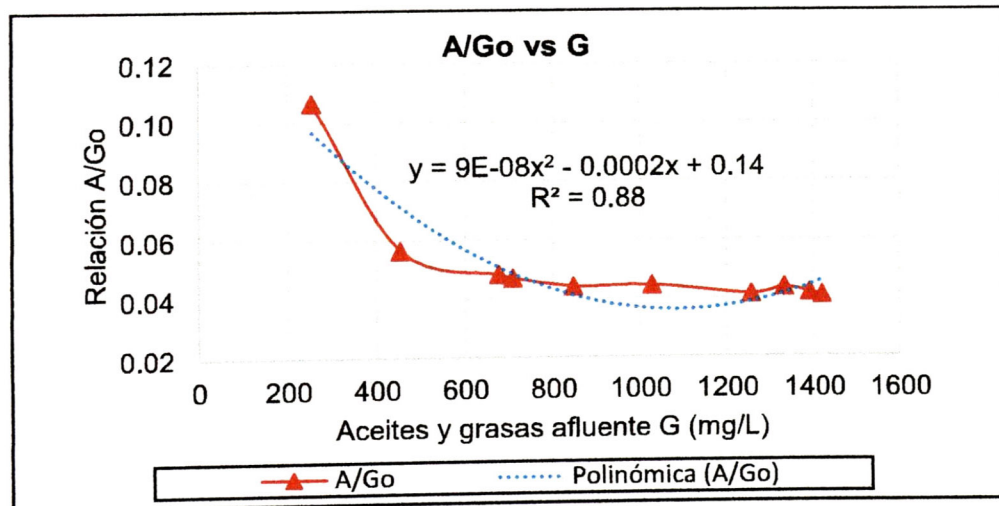


Gráfico 27 Correlación A/Go vs G, función polinómica

$$y = 1.1595x^{-0.47}, R^2 = 0.83 \dots\dots\dots \text{'Ecuación 13)}$$

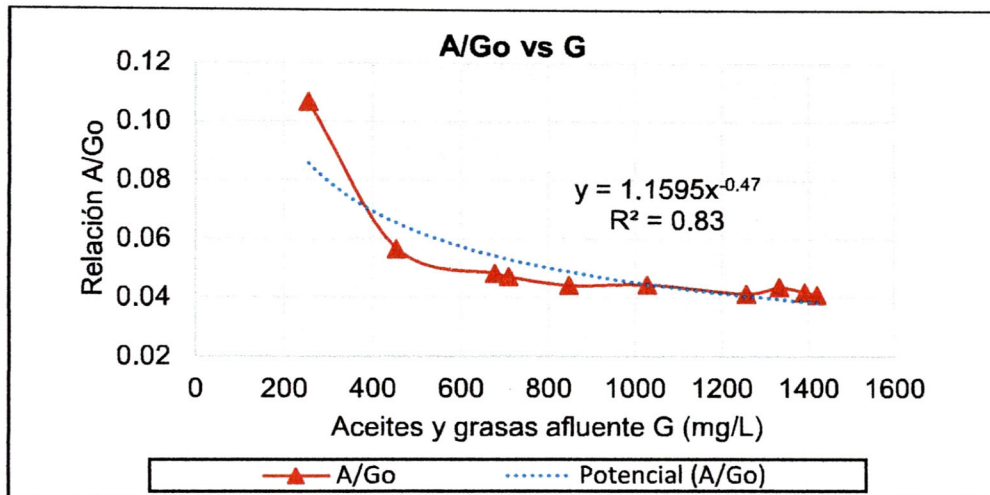


Gráfico 28 Correlación A/Go vs G, función potencial

A continuación, se presenta el resumen de las funciones analizadas.

Tabla 39 Comparación de aproximación de funciones matemáticas para la correlación A/Go vs G

Ítem	Función Matemática	Coeficiente de correlación	
		R2	R
1	Exponencial	0.63	0.79
2	Lineal	0.53	0.73
3	Logarítmica	0.75	0.87
4	Polinómica	0.88	0.94
5	Potencial	0.83	0.91

Elaboración propia

De la tabla anterior, se observa que la función polinómica ($R = 0.94$) y la función potencial (0.91) son las que mejor representan el comportamiento de los valores de A/Go respecto a G. Sin embargo, ninguna de las funciones antes analizadas considera lo siguiente:

- La relación A/Go decrece y tiende al valor de 0.041, cuando la concentración de aceites y grasas en el afluyente (G) es creciente, y aumenta abruptamente cuando la concentración de aceites y grasas en el afluyente (G) es decreciente, a partir de 500 mg/L.

- La relación A/Go aumenta tendiendo al infinito, para aguas residuales con concentraciones de aceites y grasas cercanas a cero, como consecuencia, de que, la eficiencia de remoción ($\%Ro$) tiende a cero (ver **Gráfico 15**), aun cuando estas condiciones son absurdas en un sistema de flotación real, nos servirá para la determinación de una función matemática que mejor represente la curva A/Go vs G .

Por lo antes expuesto, es necesario determinar una ecuación matemática que relacione A/Go con G (según **Gráfico 15**) y que además de tener un alto coeficiente de correlación, considere:

- Condición 1: cuando $G \rightarrow 0$, $A/Go \rightarrow \infty$ (Comportamiento asintótico)
- Condición 2: cuando $G \rightarrow \infty$, $A/Go \rightarrow \approx 0.041$ (Comportamiento asintótico)

Si hacemos:

$$G = x \wedge \frac{A}{Go} = y$$

La ecuación que considera los dos supuestos antes descritos es la función hiperbólica de la forma:

$$y - y_0 = \frac{K}{x - x_0} \dots\dots\dots \text{Ecuación 14)}$$

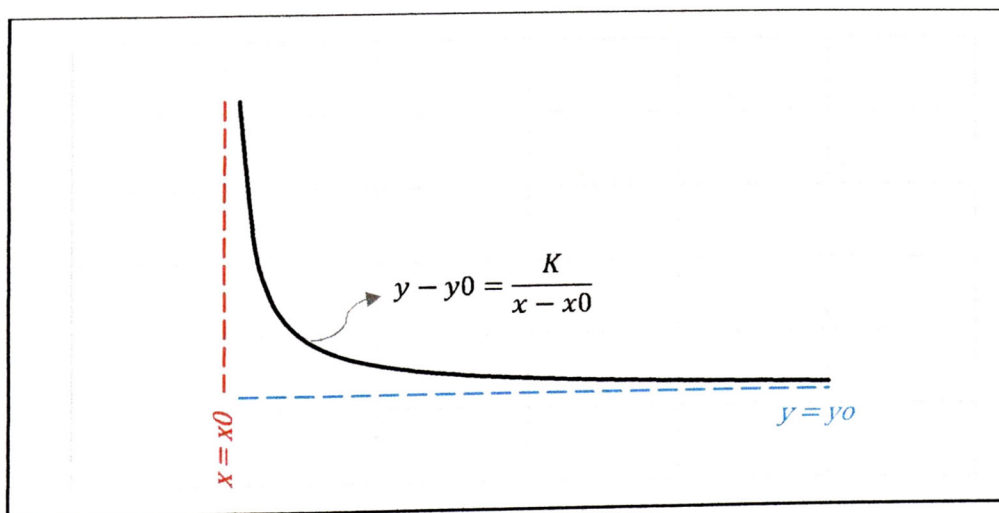


Gráfico 29 Forma general de la función hiperbólica

Para la determinación de las constantes "K", "x0" y "y0", se tiene:

- De la Condición 1: $x_0 = 0$
- De la Condición 2: $y_0 \approx 0.041$
- Condición 3: el valor "K" e "y0" debe ser tal que el coeficiente de correlación "R" debe ser mayor al 95%.

Utilizando el método de mínimos cuadrados (previa transformación logarítmica de "x" e "y") se encontró que para " $x_0 = 0$ ", " $y_0 = 0.0303$ " y " $K = 14.948$ ", se cumple las 03 condiciones antes mencionadas, obteniéndose un coeficiente de correlación de 95.29%.

Tabla 40 Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson

G (mg/L)	A/Go real y	Transformación Logarítmica		Regresión Lineal		
		X = Log x	Y = Log (y-0.0303)	XY	X ²	Y ²
1332.00	0.044	3.1245	-1.8762	-5.862	9.763	3.520
1418.00	0.041	3.1517	-1.9725	-6.217	9.933	3.891
709.00	0.047	2.8506	-1.7758	-5.062	8.126	3.153
1028.00	0.044	3.0120	-1.8486	-5.568	9.072	3.417
1256.00	0.041	3.0990	-1.9579	-6.068	9.604	3.833
1389.50	0.042	3.1429	-1.9396	-6.096	9.878	3.762
846.50	0.044	2.9276	-1.8598	-5.445	8.571	3.459
453.50	0.057	2.6566	-1.5796	-4.196	7.057	2.495
677.50	0.048	2.8309	-1.7441	-4.937	8.014	3.042
254.50	0.107	2.4057	-1.1162	-2.685	5.787	1.246
	Σ	29.2015	-17.6703	-52.1361	85.8050	31.8188
	Media	2.9201	-1.7670	-5.2136	8.5805	3.1819

$$R = \frac{N\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{N\sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{N\sum Y^2 - (\sum Y)^2}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 15)}$$

R = 0.9529, R² = 0.9081, K = 14.948

Siendo el valor crítico de R² = 0.765 para un tamaño de 10 muestras y un grado de significancia de 0.005 (de acuerdo a las tablas de Pearson), se deduce que existe correlación entre A/Go y G, con un error probable del 0.5%. Finalmente, se presenta la función hiperbólica y la aproximación lograda.

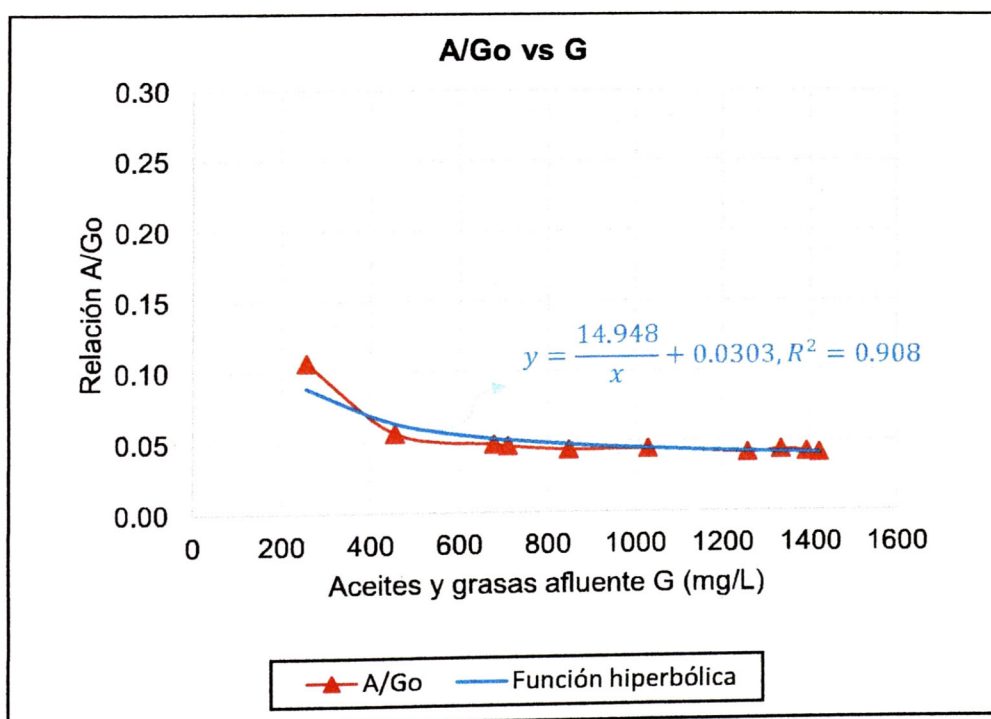
Tabla 41 Aproximación de la relación A/Go vs G a una función hiperbólica

M#	G (mg/L)	A/Go real	A/Go aproximado	Variación
	x	y	y'	y-y'
1	1332.00	0.044	0.042	0.002
2	1418.00	0.041	0.041	0.000
3	709.00	0.047	0.051	-0.004
4	1028.00	0.044	0.045	0.000
5	1256.00	0.041	0.042	-0.001
6	1389.50	0.042	0.041	0.001
7	846.50	0.044	0.048	-0.004
8	453.50	0.057	0.063	-0.007
9	677.50	0.048	0.052	-0.004
10	254.50	0.107	0.089	0.018

Elaboración propia

$$y = \frac{14.948}{x} + 0.0303 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 16)}$$

$$A/Go(G) = \frac{14.948}{G} + 0.0303 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 17)}$$

**Gráfico 30** Comparación de la relación A/Go vs G con una función hiperbólica

7.2. SEGUNDA ETAPA DE LA INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DEL EFECTO PRODUCIDO POR LA UTILIZACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO $Al_2(SO_4)_3$ COMO COAGULANTE

La dosis óptima de coagulante, obtenida mediante prueba de jarras, para las muestras N° 11 y 12 fue de 175 mg/L, a partir de dicho valor, como valor referencial inicial, se obtuvo que la dosis óptima de coagulante mediante la celda de flotación por aire disuelto fue de 200 mg/L para la muestra N° 11 (ver **Gráfico 18**) y de 100 mg/L para la muestra N° 12 (ver **Gráfico 19**), alcanzando eficiencias de remoción de 87% y 89% respectivamente.

Aun cuando se utilice el sulfato de aluminio en dosis menores a la dosis óptima, por ejemplo 50 mg/L, se puede observar eficiencias de remoción por encima del 50% para la muestra N° 11 y por encima del 80% para la muestra N° 12, por lo cual, dependiendo de la concentración de aceites y grasas que se desee obtener en el efluente de un sistema de flotación por aire disuelto, puede disminuirse la dosis de sulfato de aluminio, afín de optimizar los costos de tratamiento.

De la operación de la celda de flotación por aire disuelto con uso de sulfato de aluminio como coagulante, se tiene que la presión óptima de trabajo (PT'), para la cual, la relación A/G es óptima es de 50 psi (35 m.c.a.), ello evidencia que para las características de las aguas residuales utilizadas en la presente investigación, el rendimiento óptimo se logra siempre a la presión de trabajo óptima determinada en la etapa preliminar (50 psi), siempre que se utilice el sulfato de aluminio como coagulante, contrariamente a lo que ocurre cuando no se utiliza coagulante (primera etapa de la investigación), en donde la presión óptima de trabajo varía entre 40 y 65 psi.

La utilización del sulfato de aluminio como coagulante, a dosis adecuadas, siempre incrementa la eficiencia de remoción de aceites y grasas de una celda de flotación por aire disuelto, inclusive es posible, a dosis óptimas, alcanzar eficiencias de remoción cercanas al 90%.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- A fin de simular la flotación, la celda de flotación por aire disuelto estudiada, requiere presiones de trabajo de entre 40 psi (28 m.c.a.) y 70 psi (49 m.c.a.) y volúmenes de trabajo de entre 1.75 y 1.80 litros. Para presiones de trabajo menores 40 psi, no es posible la descarga completa de la mezcla agua residual – aire, mientras que para presiones de trabajo mayores a 70 psi la mezcla agua aire se reestabiliza y genera rebalse.
- La celda de flotación por aire disuelto estudiada, no es apta para la determinación de la relación óptima A/G para aguas residuales con concentraciones de aceites y grasas (G) menores a 250 mg/L, mientras que, para concentraciones de aceites y grasas (G) mayores a 1400 mg/L, solamente es apta, siempre que la presión óptima de trabajo no exceda los 70 psi.
- La eficiencia óptima de remoción de aceites y grasas (%Ro) crece en forma directa a la concentración de aceites y grasas, manteniéndose siempre por encima del 70% para aguas residuales con más de 500 mg/L (probablemente, debido a la presencia de aceites y grasas en estado libre y adheridas en materiales particulados) y disminuyendo drásticamente, por debajo del 70%, para concentraciones menores a 500 mg/L (probablemente, debido a la presencia predominante de aceites y grasas “químicamente” emulsionadas o “químicamente” estabilizadas).
- La relación A/Go obtenida decrece y tiende al valor de 0.041, en la medida que la concentración de aceites y grasas del afluente supere y se aleje de los 500 mg/L, por otro lado, aumenta abruptamente, en la medida de que dicha concentración se inferior y se aleja de los 500 mg/L. Según la investigación realizada, la ecuación $A/Go = 14.948/G + 0.0303$, es la que mejor representa la curva A/Go vs G (con un factor de correlación del 95.29% y un error probable del 0.5%) para muestras de aguas residuales provenientes de la industria alimentaria con contenido de aceites y grasas de entre 250 y 1400 mg/L.

- Para muestras de aguas residuales provenientes de la industria alimentaria con contenido de aceites y grasas de entre 250 y 1400 mg/L, la utilización del sulfato de aluminio como coagulante, a dosis adecuadas, incrementa hasta más del 50%, la eficiencia de remoción de aceites y grasas de la celda de flotación por aire disuelto estudiada, inclusive, a dosis óptimas, se alcanzan eficiencias de remoción cercanas al 90%. Asimismo, la presión óptima de trabajo es de 50 psi, cuando se utiliza el sulfato de aluminio como coagulante, y varía de varía entre 40 y 65 psi, cuando no se utiliza coagulante.

8.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda un sistema de mezcla adicional a la agitación manual del tanque de presurización durante la operación de la celda de flotación, ya que se comprobó, que la mezcla agua aire no es eficiente para presiones de trabajo menores a 40 psi.
- Durante la operación de la celda de flotación con aire disuelto, se observó constante formación de natas en el tanque de presurización, tanque de flotación e instalaciones de interconexión, por lo que se recomienda la limpieza total del prototipo, entre prueba y prueba, con el uso obligatorio de solventes de grasa.
- Se recomienda realizar pruebas en la celda de flotación por aire disuelto variando las condiciones locales de presión atmosférica y temperatura, para obtener una base de datos más ampliamente aplicable en diferentes condiciones.
- Se recomienda realizar pruebas en la celda de flotación por aire disuelto variando las características de las aguas residuales en función de procedencia (aguas residuales de la industria de hidrocarburos, producción de cerveza, curtiembre, industria pesquera, entre otros).
- Se recomienda el uso de la prueba de jarras para la determinación preliminar de la dosis óptima, porque permite la selección temprana de las dosis aproximadas y la conveniencia de la utilización de un coagulante específico, para de esta manera, ahorrar tiempo y coste en pruebas innecesarias en la celda de flotación por aire disuelto.
- Se recomienda realizar la segunda etapa de la investigación con otros coagulantes (cloruro férrico, polímero aniónico, entre otros.). Sin embargo, cuando se requiera tratar por flotación por aire disuelto una muestra de agua residual específica, es necesario realizar la selección del coagulante con la ayuda de la prueba de jarras y determinar las dosis optima de coagulante con una celda de flotación por aire disuelto.

- La flotación por aire disuelto puede utilizarse como sistema de tratamiento, para diversas características de aguas residuales, por ello, se recomienda la investigación de sistemas de tratamiento que incluyan otros procesos u operaciones y que tengan como objetivo, además de la remoción de aceites y grasas y sólidos suspendidos totales, la remoción de otros contaminantes (demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, entre otros). Para dichos sistemas, la celda de flotación no reúne las condiciones de flujo continuo, por lo que se recomienda el uso de plantas piloto que considere la inyección constante de agua residual (flujos continuos).

CAPÍTULO 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Londoño, G. Giraldo, A. Gutiérrez (2010) "Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua", Universidad Nacional de Colombia, Manizales-Colombia

A. Trujillo, L. Herrera. (1995) "Desarrollo de una unidad piloto de flotación con aire disuelto. Evaluación de los parámetros de diseño", Rev. Tec. Ing. Universidad de Zulia, Maracaibo Vol. 18, No 3, 343-354., Venezuela.

Autoridad Nacional del Agua (2017) "Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua", Lima-Perú.

C. K. Chen, S. L. Lo (2005) "Treating restaurant wastewater using a combined activated sludge-contact aeration system", Graduate Institute of Environmental Engineering, Taipei-Taiwan.

C. Rodríguez, F. Lafargue, J. Sotolongo, A. Rodríguez, J. de Assuncao (2012) "Determinación de las propiedades físicas y carga crítica del aceite vegetal", Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, Vol. 15 N° 3, pág. 4/6, Cuba.

D Hendricks (2006) "Water Treatment Unit Processes" Chapter 8, 234-272, Florida-EE.UU.

E. Jimeno (1998) "Análisis de aguas y desagües", Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.

EPA (1998), "Pollution prevention (P2) Guidance Manual for the PFPR industry", Chapter 5, Office of Water and Office of Pollution Prevention and Toxics, Wastewater Treatment Technologies, Washington DC-EE.UU.

EPA (2010) "Method 1664, Revision B n-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated n-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non-polar Material) by Extraction and Gravimetry", EPA-821-R-10-001, 1-2, Office of Water, Washington DC-EE.UU.

G. R. Alther (1997) "Oils Found in Wastewater - A Layman's Guide to Emulsion Breaking", Biomin, Incorporated, EE.UU.

Herramientas de Ingeniería "Cálculo de la Altitud - Presión". Recuperado de <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/altitud/altitud.html>

Ing. Quím. Facultad de Química e Ingeniería Química, UNMSM. Vol. 3, N° 1, 51-57, Lima-Perú.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2007) "Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda", población urbana, Perú.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017) "Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas", población urbana. Perú.

J. E. Forero, J. Diaz, V.R. Blandón (1999) "Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales", Instituto Colombiano del Petróleo, Santander-Colombia.

J. Puig (2010) "Comportamientos asintóticos, infinitos, infinitésimos, equivalentes y límites fundamentales", Studiositas Universidad de los Andes, vol. 5, núm. 3, Colombia.

J. Romero Rojas. (1999) "Tratamiento de Aguas Residuales". 1ra edición, Cap. 15. 345-363, 1028, Colombia.

J. Saldarriaga (2007) "Hidráulica de tuberías", Cap. 1, 2-3, Bogotá, Colombia.

L. Cánepa (2004) "Manuales de Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida", Manual I Teoría, Lima-Perú.

M. C. Fuerstenau, G. Jameson, R. H. Yoon (2007) "Froth Flotation, a Century of Innovación", Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Colorado-EE.UU.

M. R. Azevedo, M. A. Penalva (1996). "Tratamento físico-químico das Águas Residuárias de uma indústria de papel utilizando-se a flotação por ar dissolvido". Escola de Eng. de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo-Brasil.

Metcalf & Eddy. (1996) "Ingeniería de Aguas Residuales". 3ra edición, Vol. 1, Cap. 6, 277-283.

Ministerio de la Producción (2002) "Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel" Decreto Supremo N° 003-2002-PRODUCE, Lima-Perú.

Ministerio de la Producción (2008) "Límites máximos permisibles (LMP) para la Industria de Harina y Aceite de Pescado y Normas Complementarias" Decreto Supremo N° 010-2008-PRODUCE, Lima-Perú.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009) "Valores máximos admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario" Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA, Lima-Perú.

Ministerio del Ambiente (2010) "Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (PTAR)" Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, Lima-Perú.

Ministerio del Ambiente (2010) "Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas" Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM, Lima-Perú.

Ministerio del Ambiente (2017) "Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua" Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Lima-Perú.

Ministerio del Ambiente (2018) "Límites Máximos Permisibles para efluentes de los establecimientos industriales pesqueros de consumo humano directo e indirecto" Decreto Supremo N° 010-2018-MINAM, Lima-Perú.

N. L. Nemerow, A. Dasgupta (1998) "Tratamiento de Vertidos Industriales y Peligrosos" Cap. 26, 441-445, Madrid-España.

O. Rosasco (2011) "Apuntes y Material de Clase: Procesos y Operaciones Unitarias", curso de pre-grado FIA-UNI. Lima, Perú.

PlanetCalc (2014) "Presión de Altitud", Moscú-Rusia. Recuperado de <https://es.planetcalc.com/938/#>

Presidencia del Consejo de Ministros (2008) "Límites Máximos Permisibles (LMP) de efluentes Líquidos para el sub-sector hidrocarburos: Decreto Supremo N° 037-2008-PCM, Lima-Perú.

R. Pizarro, G. Salas (2000) "Diseño y Construcción de un sistema de flotación por aire disuelto, de efluentes líquidos, a nivel de laboratorio", Rev. Per. Quím.

R. S. Ramalho (1996) "Tratamiento de Aguas residuales" Cap. 3, 148-152, Quebec-Canada.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI (datos en tiempo real) "Sistema de Gestión de Información de la Calidad del Aire en el Perú", Lima-Perú.

ANEXOS

ETAPA PRELIMINAR



Figura 16 Determinación de condiciones de operación de la celda de flotación

PRIMERA ETAPA

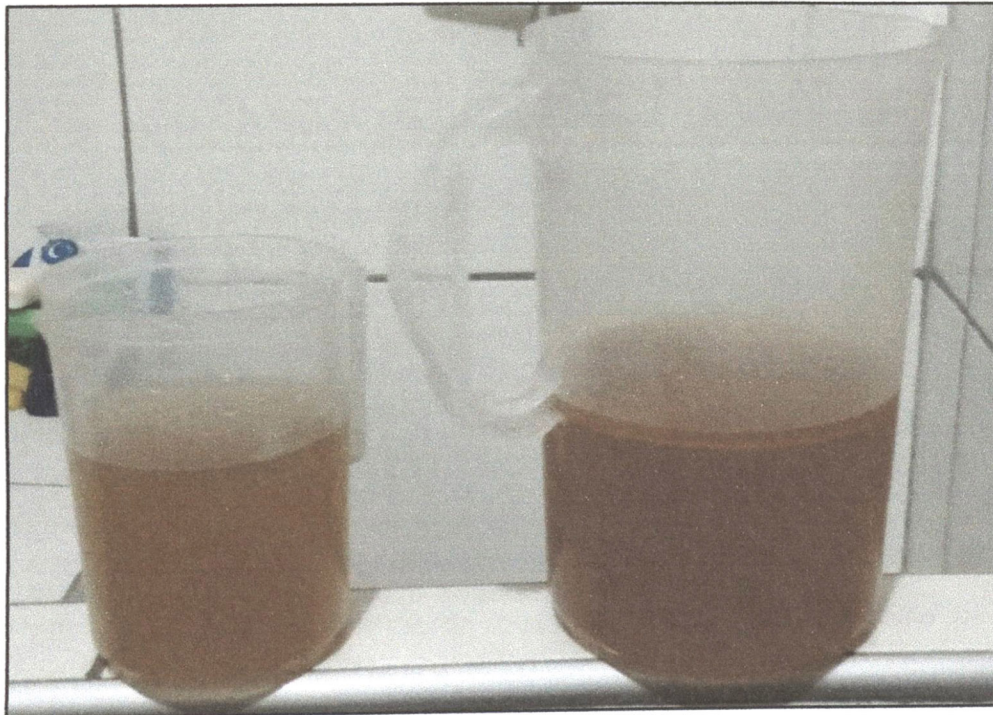
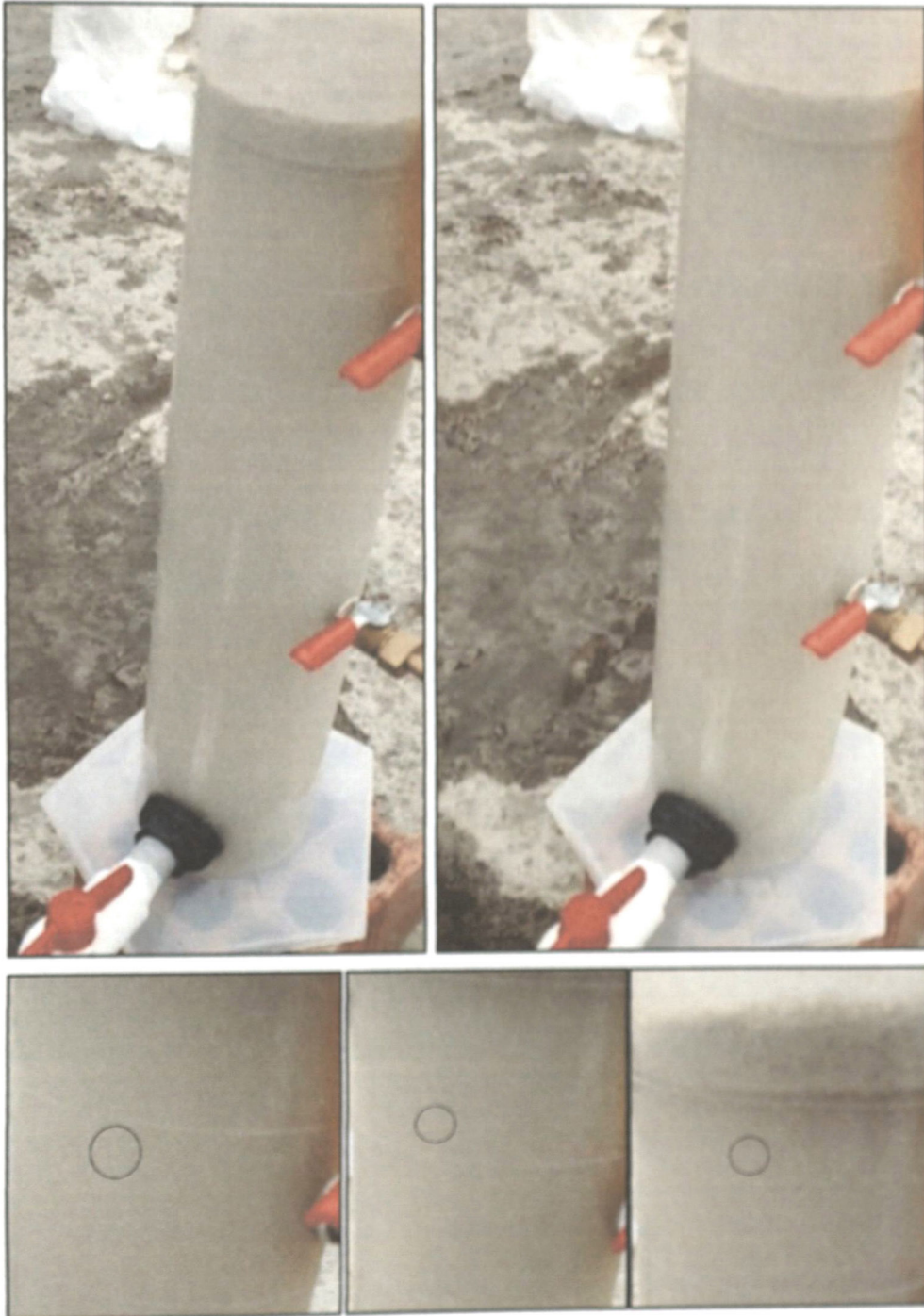


Figura 17 Comparación visual de la muestra efluente y afluente de la celda de flotación (sin coagulante)



*Arriba izquierda: inicio de la descarga, Arriba derecha: durante la descarga,
Abajo: Ascenso de partícula por flotación*
Figura 18 Descarga de la mezcla agua – aire en el tanque de flotación

SEGUNDA ETAPA



Figura 19 Ensayos en la prueba de jarras

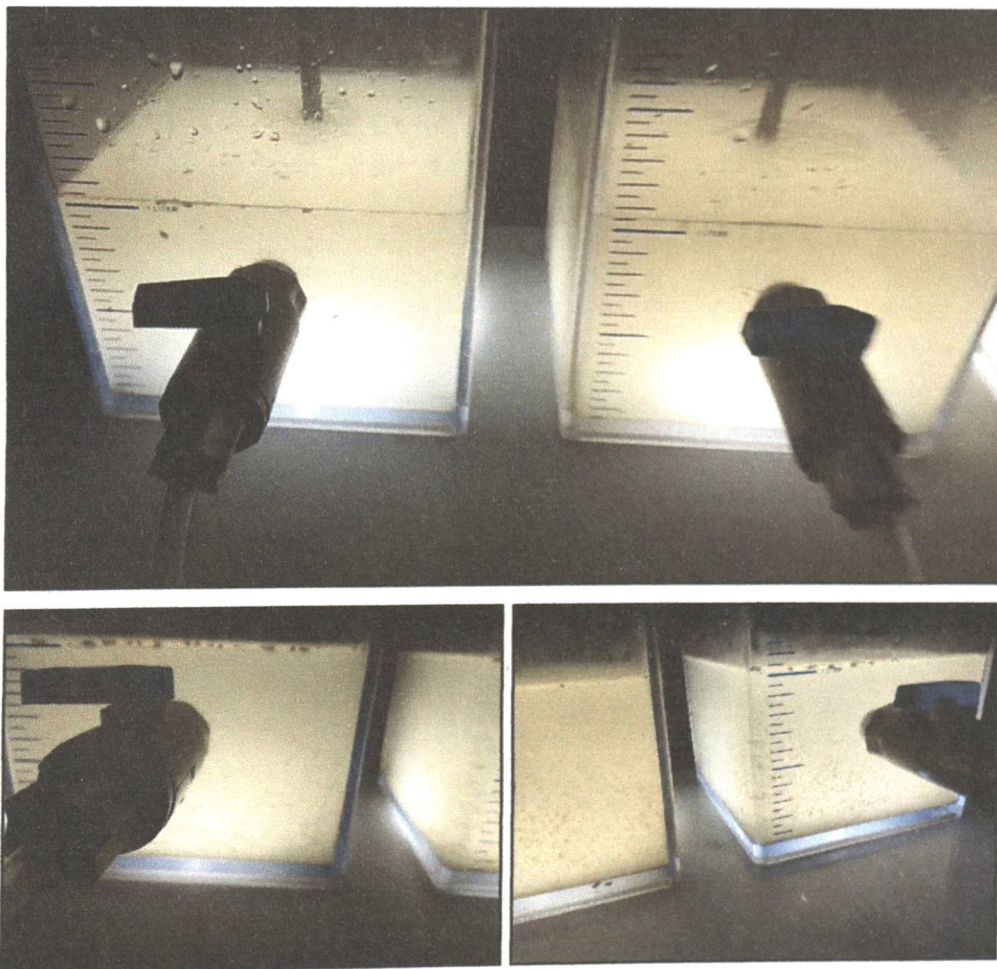


Figura 20 Formación de flóculos en la prueba de jarras

VALORES CRÍTICOS DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN "R" DE PEARSON

Tabla 42 Valores críticos "R" de Pearson

Significancia →	0.05	0.025	0.01	0.005
Grados de Libertad ↓	95%	98%	99%	99.5%
1	0.988	0.997	1.000	1.000
2	0.900	0.950	0.980	0.990
3	0.805	0.878	0.934	0.959
4	0.729	0.811	0.882	0.917
5	0.669	0.754	0.833	0.874
6	0.622	0.707	0.789	0.834
7	0.582	0.666	0.750	0.798
8	0.549	0.632	0.716	0.765
9	0.521	0.602	0.685	0.735
10	0.497	0.576	0.658	0.708
11	0.476	0.553	0.634	0.684
12	0.458	0.532	0.612	0.661
13	0.441	0.514	0.592	0.642
14	0.426	0.497	0.574	0.623
15	0.412	0.482	0.558	0.606
16	0.400	0.468	0.542	0.590
17	0.389	0.456	0.528	0.575
18	0.378	0.444	0.516	0.561
19	0.369	0.433	0.503	0.549
20	0.360	0.423	0.492	0.537

Adaptado de: <https://gatorrison.neocities.org/funs/tablar.htm>

RESULTADOS A/G DETERMINADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Tabla 43 Resultados A/G determinados en la investigación

DATOS DE MUESTREO								DATOS INICIALES								RESULTADOS OBTENIDOS								VALORES ÓPTIMOS												
Muestra N°	Descripción de la Muestra	Fecha de Muestreo (F)	Dirección de Muestreo	Objetivo de la Muestra	Volumen de Muestreo (Vol.)	Temperatura Ambiente en el Muestreo (Tm)	Aceites y Grasas de la Muestra (Afluyente) (G)	Muestra N°	Prueba N°	Rótulo de Prueba (ID)	Presión Atmosférica Local (PL)	Temperatura Ambiente en la Prueba (T)	Solubilidad del Aire a 1 atm y Temperatura Ambiente (C)	Presión de Vapor a Temperatura Ambiente (Pv)	Densidad del Aire a Presión y Temperatura Ambiente (d)	Muestra N°	Prueba N°	Presión de Trabajo (PT)	Aceites y Grasas Efluente (G')	Eficiencia de Remoción (%R)	Relación Aire / Aceites y Grasas (A/G)	Muestra N°	Aceites y Grasas de la Muestra (Afluyente) (G)	Presión de Trabajo (PT')	Aceites y Grasas Efluente (G'o)	Eficiencia de Remoción (%Ro)	Relación Aire / Aceites y Grasas (A/Go)									
M#	Desc.	F (dd/mm)	Dir.	U.M.	Vol. (L)	Tm (°C)	G (mg/L)	M#	P#	ID	PL (psi)	PL (mmHG)	PL (m.c.a.)	T (°C)	T (°K)	C (ml/L)	Pv (psi)	Pv (mmHG)	Pv (m.c.a.)	d (mg/ml)	M#	P#	PT (psi)	PT (mmHG)	PT (m.c.a.)	G' (mg/L)	%R	A/G	M#	G (mg/L)	PT' (psi)	PT' (mmHG)	PT' (m.c.a.)	G'o (mg/L)	%Ro	A/Go
1	Producido en casa	6-Nov	Jr. San Agustín N° 275 - Surquillo	Determinar la relación A/G	20	19	1332.00	1	1	P1	14.46	747.96	10.17	19	292.15	19.08	0.32	16.40	0.22	1.190	1	1	40	2069	28	759.00	43%	0.0209	1	1332.00	65	3361	46	367.00	72%	0.044
									2	P3	14.46	747.96	10.17	19	292.15	19.08	0.32	16.40	0.22	1.190		2	50	2586	35	726.00	45%	0.0303								
									3	P4	14.46	747.96	10.17	19	292.15	19.08	0.32	16.40	0.22	1.190		3	55	2844	39	502.50	62%	0.0351								
									4	P5	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		4	60	3103	42	491.50	63%	0.0390								
									5	P6	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		5	65	3361	46	367.00	72%	0.0436								
									6	P7	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		6	70	3620	49	424.00	68%	0.0482								
2	Producido en casa	7-Nov	Jr. San Agustín N° 275 - Surquillo	Determinar la relación A/G	20	19	1418.00	2	1	P1	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186	2	1	40	2069	28	909.50	36%	0.0192	2	1418.00	65	3361	46	403.00	72%	0.041
									2	P2	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		2	45	2327	32	840.00	41%	0.0235								
									3	P3	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		3	50	2586	35	704.00	50%	0.0279								
									4	P4	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		4	55	2844	39	612.50	57%	0.0322								
									5	P5	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		5	60	3103	42	510.00	64%	0.0366								
									6	P6	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		6	65	3361	46	403.00	72%	0.0410								
									7	P7	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		7	70	3620	49	487.50	66%	0.0453								
3	Producido en casa	8-Nov	Jr. San Agustín N° 275 - Surquillo	Determinar la relación A/G	20	19	709.00	3	1	P1	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186	3	1	40	2069	28	255.00	64%	0.0383	3	709.00	45	2327	32	201.50	72%	0.047
									2	P2	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		2	45	2327	32	201.50	72%	0.0471								
									3	P3	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		3	50	2586	35	194.00	73%	0.0558								
									4	P4	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		4	55	2844	39	206.00	71%	0.0645								
									5	P5	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		5	60	3103	42	201.50	72%	0.0732								
									6	P6	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		6	65	3361	46	255.00	64%	0.0819								
									7	P7	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		7	70	3620	49	244.00	66%	0.0906								
4	Producido en casa	9-Nov	Jr. San Agustín N° 275 - Surquillo	Determinar la relación A/G	20	19	1028.00	4	1	P1	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186	4	1	40	2069	28	482.50	53%	0.0264	4	1028.00	55	2844	39	309.00	70%	0.0445
									2	P2	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		2	45	2327	32	432.50	58%	0.0325								
									3	P3	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		3	50	2586	35	371.00	64%	0.0385								
									4	P4	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		4	55	2844	39	309.00	70%	0.0445								
									5	P5	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		5	60	3103	42	302.50	71%	0.0505								
									6	P6	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		6	65	3361	46	303.50	70%	0.0565								
									7	P7	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		7	70	3620	49	366.00	64%	0.0625								
5	Efluente ROKY's MEGAPLAZA	29-Nov	Av. Alfredo Mendiola 3461, Urb. Panam. Norte - Los Olivos	Determinar la relación A/G	20	20	1256.00	5	1	P1	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186	5	1	40	2069	28	797.50	37%	0.0216	5	1256.00	60	3103	42	365.00	71%	0.041
									2	P2	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		2	45	2327	32	606.00	52%	0.0266								
									3	P3	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		3	50	2586	35	502.50	60%	0.0315								
									4	P4	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		4	55	2844	39	463.00	63%	0.0364								
									5	P5	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		5	60	3103	42	365.00	71%	0.0413								
									6	P6	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		6	65	3361	46	411.00	67%	0.0462								
6	Efluente ROKY's MEGAPLAZA	26-Nov	Av. Alfredo Mendiola 3461, Urb. Panam. Norte - Los Olivos	Determinar la relación A/G	20	20	1389.50	6	1	R2	14.46	747.96	10.17	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181	6	1	40	2069	28	951.50	32%	0.0192	6	1389.50	65	3361	46	338.50	76%	0.042
									2	R3	14.46	747.96	10.17	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181		2	45	2327	32	845.50	39%	0.0236								
									3	R4	14.46	747.96	10.17	21	294.15	18.38	0.36	18.80	0.26	1.181		3	50	2586	35	595.50	57%	0.0279								
									4	R5	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		4	55	2844	39	576.50	59%	0.0329								
									5	R7	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		5	65	3361	46	338.50	76%	0.0418								
									6	R8	14.46	747.96	10.17	20	293.15	18.70	0.34	17.60	0.24	1.186		6	70	3620	49	627.50	55%	0.0462								
7	Efluente ROKY's METRO UNI	12-Dic	Av. Gerardo Unger 1003 - San Martín de Porres	Determinar la relación A/G	20	23	846.50	7	1	P1	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173	7	1	40	2069	28	586.00	31%	0.0303	7	846.50	50	2586	35	164.00	81%	0.0441
									2	P2	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173		2	45	2327	32	226.50	73%	0.0372								
									3	P3	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173		3	50	2586	35	164.00	81%	0.0441								
									4	P4	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173		4	55	2844	39	142.50	83%	0.0510								
									5	P5	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173		5	60	3103	42	277.50	67%	0.0579								
8	Efluente ROKY's METRO UNI	19-Dic	Av. Gerardo Unger 1003 - San Martín de Porres	Determinar la relación A/G	20	23	453.50	8	1	R1	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173	8	1	35	1810	25	209.00	54%	0.0438	8	453.50	40	2069	28	154.50	66%	0.057
									2	R2	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173		2	40	2069	28	154.50	66%	0.0566								
									3	R3	14.46	747.96	10.17	23	296.15	17.74	0.41	21.35	0.29	1.173		3	50	2586	35	141.50	69%	0.0823								
									4	R4	14.46	747.96	10.17	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177		4	55	2844	39	135.00	70%	0.0970								
									5	R7	14.46	747.96	10.17	22	295.15	18.06	0.39	20.00	0.27	1.177		5	70	3620	49	307.00	32%	0.1364								
									6	R8																										