

REMOCIÓN DE ACEITE EMULSIONADO EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

*Carlos Alberto Echeverri Londoño
Universidad de Antioquia*

RESUMEN

En el presente artículo se consigna un estudio teórico y experimental sobre el tratamiento de aguas residuales industriales con aceite emulsionado, a través del proceso de flotación por aire disuelto (FAD), cambiando algunos parámetros de operación y de algunos tópicos de importancia relacionados con el proceso.

Los resultados experimentales y el modelo teórico muestran que la remoción de aceite depende fundamentalmente del pretratamiento químico. Eficiencias de remoción de aceite arriba del 99% se obtuvieron al utilizar la flotación por aire disuelto con ayuda de coagulantes.

INTRODUCCIÓN

En toda actividad industrial que emplee aceites y agua de procesamiento, es posible que se formen emulsiones en cualquier punto de su sistema. Las principales industrias que producen desechos aceitosos son: refinación del petróleo, textiles, manufactura y maquinado de metales, y procesamiento de alimentos.

En unas industrias, el rompimiento de las emulsiones (desestabilización y separación de las fases) puede ser importante para la recuperación de aceites o para el tratamiento adecuado de las aguas de desecho que se descargan en los ríos. En otros casos el objetivo del rompimiento de las emulsiones puede ser el de obtener diversos productos, tal como sucede con la industria de la leche y sus derivados.

Una de las aplicaciones de la flotación por aire disuelto (FAD), es la de remover el aceite emulsionado de las aguas residuales industriales después del pretratamiento químico; en la actualidad, éste método no ha sido ampliamente empleado en nuestro medio debido al desconocimiento y falta de experiencia en este proceso.

Son muchos los factores que intervienen en la remoción de aceite emulsionado de las aguas residuales industriales al utilizar la flotación por aire disuelto; entre éstos tenemos: estabilidad de la emulsión, adición de químicos (coagulantes), tamaño de la burbuja, relación aire/sólidos, presión del saturador, relación de reciclaje, etc.

2. FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

La flotación por aire disuelto (FAD) es un proceso unitario usado para separar sólidos en suspensión y algunas sustancias coloidales y emulsionadas de una fase líquida continua. La separación se lleva a cabo al introducir finas burbujas de aire dentro del líquido. Las burbujas se adhieren a las partículas sólidas o sustancias coloidales floculadas, que reducen su densidad y las convierten en materia flotante fácilmente removible. La FAD es especialmente efectiva en la remoción de partículas de baja densidad tales como algas, aceite libre y emulsionado, grasa, pulpa de papel, etc., ya que esta incrementa sus velocidades de ascenso y efectúa la remoción en poco tiempo; también es un método viable de remoción de partículas con densidades mayores que la de la fase líquida, pero con velocidades de asentamiento demasiado bajas.

2.1 Descripción del Proceso

Los componentes básicos de un sistema FAD son: compresor de aire, saturador o celda de presurización (para conseguir el contacto aire-líquido), válvula reductora de presión, y el tanque de flotación propiamente dicho, ver figura 1.

Una pequeña porción del agua tratada en la unidad de flotación, se recircula y se satura con aire bajo presión en un saturador o celda de presurización. El agua saturada con aire es inyectada dentro de una tubería que alimenta el agua floculada a la unidad de flotación a través de una válvula reductora de presión u otro dispositivo especial, para conseguir por medio del

proceso de despresurización, una liberación efectiva de aire. La liberación de la presión causa una sobresaturación inmediata de aire en el agua; este aire, en exceso de saturación, es liberado en forma de finísimas burbujas (20 a 100 μm). Las burbujas de aire desprendidas se adhieren a las partículas de floc, formando aglomerados partícula-burbuja con una densidad más baja que la del agua; esto hace posible en

la unidad de flotación, que los aglomerados partícula-burbuja asciendan a la superficie del tanque de flotación y se acumulen en forma de lodo flotante. Los sólidos, grasas y aceites concentrados pueden separarse de la superficie por sistemas mecánicos. El líquido clarificado puede separarse cerca del fondo del tanque y parte del mismo puede recircularse.

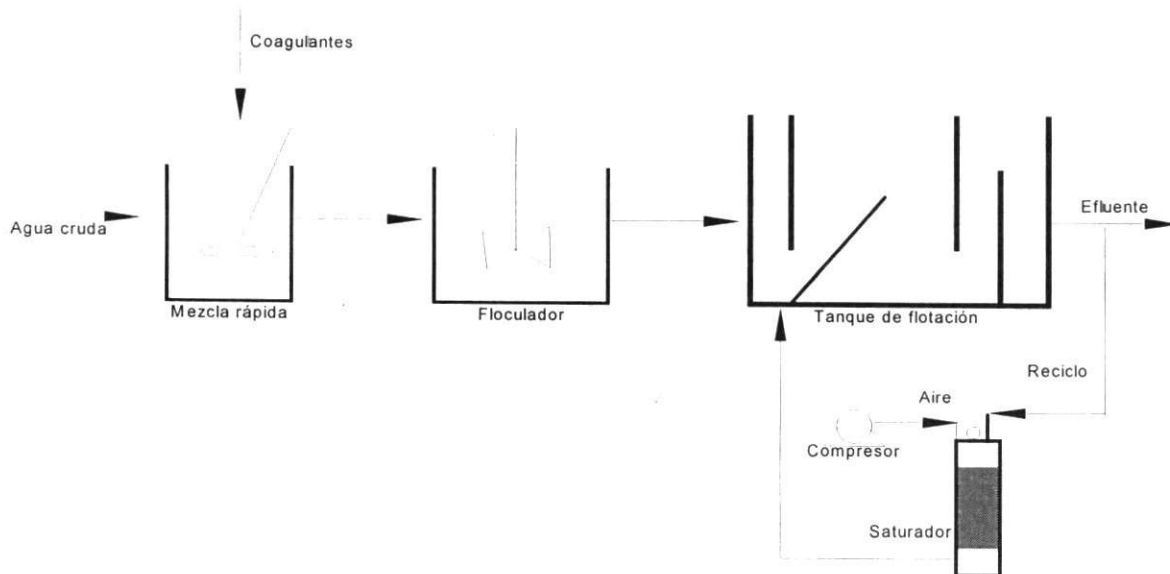


FIGURA 1. Representación esquemática de una planta de flotación por aire disuelto (FAD).

Con la FAD se logran altas eficiencias de remoción de aceite y sólidos suspendidos de las aguas residuales industriales usando coagulantes.

En la flotación, la velocidad del proceso es determinada por un equilibrio de fuerzas, que incluyen la gravedad, la fuerza ascensional y la resistencia que ofrece el floc¹ (o agregado partícula-burbuja) para desplazarse.

Por lo menos se distinguen cuatro etapas en el proceso de flotación :

- Generación de las burbujas como una función de las diferencias de presión relativas y del diseño de los dispositivos de liberación.
- Contacto entre las burbujas y las partículas de floc.
- Adhesión de las burbujas a las partículas de floc, determinada por parámetros químicos de superficie.
- Ascenso del complejo aire/partícula a través de la unidad flotación, afectado en gran parte por la hidrodinámica de este tanque.

Generalmente, los dispositivos usados para la liberación del aire en un sistema de FAD son las válvulas de aguja; sin embargo, también son usadas algunas boquillas con diseño especial; la acción de dichos dispositivos permite reducir el tamaño de las burbujas.

Dado que el sistema de saturación de aire constituye aproximadamente el 50% del costo de energía del proceso de flotación, es importante escoger el mejor sistema de saturación de aire. Existen varios métodos para disolver aire bajo presión en la corriente de reciclo: dispersión de aire dentro del agua en un recipiente a presión (saturador), rociado del agua sobre un lecho empacado, rociado del agua dentro de un saturador sin empaque, arrastre del aire con eyectores, e inyección del aire dentro de la línea de succión de la bomba de reciclo. Está establecido que el sistema de saturador empacado es marcadamente superior en funcionamiento a los demás sistemas y además ha mostrado tener la relación más baja de (costo de operación) (nivel de saturación logrado) como también se ha demostrado que el saturador puede ser operado sobre el intervalo de 300

a 2000 m³/m².d sin algún descenso en la eficiencia de saturación

La mayoría de las plantas de tratamiento son construidas con tanques de flotación rectangular, que normalmente son diseñados con una profundidad de aproximadamente 1,5 m. y velocidades de flujo ascendente de 8 a 12 m/h., dependiendo del área superficial del tanque. El tanque de flotación esta ocupado con un deflector inclinado (60 grados de la horizontal), en la entrada lateral del tanque para dirigir los aglomerados burbuja-floc hacia la superficie y para reducir la velocidad del agua que entra con el fin de que haya una perturbación mínima de la capa de lodo que se está acumulando en la superficie del agua. La distancia entre el tope del deflector y la superficie del agua es alrededor de 0,3m (figura 1). El tamaño máximo del tanque de flotación está determinado por las condiciones hidráulicas y el diseño del dispositivo para la remoción. El tiempo de retención nominal en el tanque de flotación varía entre 5 y 15 minutos, que dependen del flujo y de la profundidad de éste. El lodo que se le acumula en la superficie puede ser removido

en forma continua o discontinua por rebosamiento o barredores mecánicos.

2.2 CANTIDAD DE AIRE REQUERIDO

De acuerdo con la ley de Henry la solubilidad del aire en el agua es directamente proporcional a la presión aplicada al sistema, además la solubilidad del aire en el agua varía con la temperatura de ésta. La cantidad de aire que teóricamente puede desprenderse de una solución de agua saturada (ver figura 2), cuando la presión se reduce a 1 atm. viene dada por la expresión:

$$S = S_a(P_a/k - 1) \quad (2.1)$$

en la cual:

S = Cantidad de aire desprendida a presión atmosférica debido a la caída de presión, mg/l.

S_a = Saturación del aire a presión atmosférica, mg/l atm.

P_a = Presión absoluta del sistema, kPa.

k = 101,325 kPa/atm.

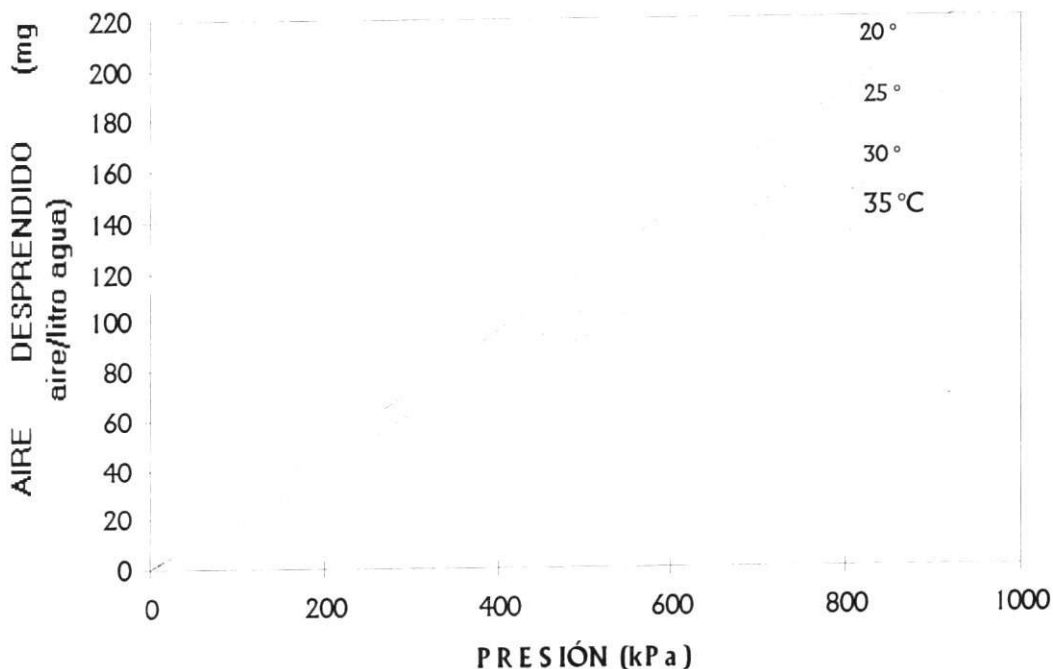


FIGURA 2. Concentraciones de saturación teóricas de agua en aire a diferentes temperaturas y presiones.

En la práctica, la cantidad de aire que se desprende del agua, depende del grado de turbulencia existente en el sitio donde se reduce la presión y del porcentaje de saturación obtenido. El grado de saturación que puede

obtenerse durante la presurización del efluente recirculado está relacionado con el diseño de la celda de presurización (saturador). La eficiencia del proceso de flotación depende de la cantidad de aire que tiene

que ser adicionada al flujo de recirculación que logre la flotación del aceite y los sólidos suspendidos; se acostumbra expresar la eficiencia de funcionamiento de un sistema de flotación en términos de la calidad del efluente relacionada con la relación aire/sólidos aplicada al sistema.

La cantidad de aire suministrado al tanque de flotación puede ser variada al cambiar la velocidad del flujo de reciclo o la presión en el saturador, o sea, que la cantidad de aire liberado depende de la presión del saturador y de la relación de reciclo; sin embargo, la calidad del agua tratada depende solamente de la cantidad total del aire suministrado y no de los valores individuales de presión y relación de reciclo empleada.

2.3 Pretratamiento para la Flotación.

El pretratamiento envuelve la desestabilización de las partículas por adición de químicos (coagulantes) y la agregación de las partículas por floculación. Para asegurar condiciones de flotación favorables y una máxima efectividad es indispensable incorporar al proceso FAD coagulación química y floculación; los aspectos del tratamiento en la operación FAD son extremadamente importantes, particularmente cuando los compuestos coloidales o aceite emulsificado están presentes.

En FAD los químicos son adicionados para flocular el aceite y los sólidos suspendidos de modo que las burbujas puedan quedar atrapadas en el floc y/o adherirse a él para flotar estos a la superficie.

La desestabilización de una emulsión O/W es un proceso en dos pasos: la coagulación que envuelve la neutralización de cargas y formación de microflocs, y la floculación que da por resultado una aglomeración física de los microflocs y el entrapamiento de los sólidos suspendidos.

2.4 Parámetros de Operación.

Los parámetros que deben considerarse para el diseño y funcionamiento de un sistema de flotación por aire disuelto son: relación aire/sólidos, presión que debe aplicarse al saturador y relación de reciclo.

2.4.1. Relación Aire/Sólidos (A/S). El funcionamiento del sistema FAD depende en gran medida de la relación A/S; este término combina la cantidad de sólidos suspendidos, cantidad de aire liberado y carga hidráulica

dentro de una sola variable. La relación A/S esta definida como la razón en peso de la cantidad de aire liberado a la de sólidos suspendidos presente en el agua residual:

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

Generalmente, cuando se trata de remoción de aceite, la relación A/S es la razón en peso de la cantidad de aire liberado a la de aceite y sólidos suspendidos presente en el agua residual. La relación A/S esta definida por la ecuación:

$$A/S = \frac{S_a (f Pa/k - 1)R}{C_{AS}F} \quad (2.2)$$

en la cual:

- R = Flujo de reciclo, l/s.
- F = Flujo alimentado, l/s.
- CAS = Aceite y sólidos suspendidos en la alimentación, mg/l.
- Sa = Saturación del aire a presión atmosférica, mg/l atm.
- Pa = Presión absoluta del sistema, kPa.
- k = 101.325 kPa/atm.
- f = Fracción de saturación obtenida en la celda de presurización.

La relación A/S es un parámetro gobernante de la velocidad de ascenso de los aglomerados partícula-burbuja. Si el aire es insuficiente para enfrentarse con los sólidos suspendidos, grasas y aceite emulsionado entrantes, una cantidad significativa de éstos estará presente en el efluente.

La relación A/S se estima a partir de estudios realizados a escala de laboratorio en unidades de flotación o en planta piloto. El intervalo típico de valores para la relación A/S es de 0,001 y 0,01 mg/mg.

Para una relación A/S óptima dada, es indiferente (dentro de ciertos límites) que una combinación de presión del saturador y relación de reciclo sea adoptada, con tal de que la relación A/S sea mantenida.

2.4.2 Presión aplicada al saturador. El intervalo de valores típicos para la presión en el saturador es de 345 a 585 kPa. La presión óptima en el saturador aproximadamente parece ser de 345 kPa. para casi todas

las velocidades de flujo de agua residual y concentraciones de aceite y sólidos suspendidos.

La presión mínima en el saturador es de 300 kPa, ya que para presiones más bajas de 300 kPa. aumentan las dificultades para alcanzar la saturación completa, debido a la reducción de las fuerzas impulsoras y la eficiencia del sistema saturador asume una importancia más grande desde el punto de vista económico. La disolución de aire a bajas presiones es por lo tanto notoriamente menos eficiente que a presiones más altas.

2.4.3 Relación de Reciclo. La relación de reciclo es la razón (alimento al saturador)/(agua residual alimentada) y usualmente se expresa como un porcentaje.

En la práctica los requerimientos de aire son descritos en términos de la relación de reciclo por su utilidad como variable de operación, puesto que es un indicador aproximado del aire suministrado. Normalmente son aplicadas razones de reciclo dentro del intervalo del 5 al 30%, sin embargo la relación de reciclo depende en gran parte de las condiciones específicas de operación, requeridas para proporcionar una eficiencia adecuada en el proceso de flotación.

La combinación de la relación de reciclo y presión del saturador debe ser seleccionada con base en las bombas y compresores disponibles, con la salvedad de que la presión del saturador no sea menor de 300 kPa., pues por debajo de 300 kPa., el funcionamiento del saturador llega a ser ineficiente.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se realizaron diferentes ensayos con el fin de establecer la eficiencia de solubilidad del aire en el agua en la celda de presurización construida y la remoción de aceite y sólidos del agua residual industrial a través del proceso de flotación (FAD), luego de sufrir pretratamiento químico.

3.1 Procedimiento

Con el propósito de trabajar con un agua residual industrial con desecho aceitoso típica, se determinó utilizar una concentración de aceite 6000 ppm, ya que esta se encuentra en el intervalo de dicho tipo de aguas (500 a 10000 ppm), y una concentración de 100 ppm de agente emulsionante; luego se ajustó el pH con NaOH hasta un valor de 6,8 que dio como resultado una emulsión altamente estable.

Prueba de jarras. La dosis óptima de alumbre fue escogida de experimentos (previos a la FAD) que envuelven variación en la cantidad de alumbre en la prueba de jarras, diseñada para determinar la dosis necesaria para la desestabilización de las gotitas de aceite.

Muestras de un litro de agua residual como las antes mencionadas, son agitadas rápidamente durante 30 segundos después del ajuste del pH y la adición de los coagulantes el cual es seguido por un período de floculación de 15 min. con un grado de agitación más lento. Se retiraron muestras para determinar la concentración de los sólidos suspendidos.

• Solubilidad del aire en la celda de presurización.

La cantidad de aire disuelto en la corriente que proviene del saturador es medida indirectamente. El volumen de aire desprendido (ml/s) de la corriente del saturador es determinado por medio de un medidor de gas. La validez de este método se establece asegurando condiciones de saturación y comparando las concentraciones teóricas de saturación con las concentraciones equivalentes determinadas experimentalmente, método que proporciona una medida conveniente de la cantidad real de aire desprendido de la corriente que proviene del saturador, y también proporciona un medio para estimar la eficiencia de diferentes procedimientos de saturación.

Flotación por aire disuelto. Los experimentos comprenden la adición de coagulante y ajuste del pH (de 2,0 a 3,0) con un período de mezcla rápida de 30 segundos, a aproximadamente 200 r.p.m., seguido por una floculación o período de mezcla lenta (40 r.p.m.); la duración del período de floculación fue de 15 minutos. Este fue seguido por 10 minutos de flotación en una columna, usando relaciones de reciclo en un intervalo de 10 a 60% y una presión constante de 413,68 kPa. El término reciclo es una palabra inapropiada para pruebas discontinuas, pero es comúnmente usada en estos procesos.

Después del período de flotación se tomaron muestras para determinar la cantidad de aceite y sólidos remanentes y determinar así la eficiencia de remoción (figuras 3, 4, 5 y 6).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

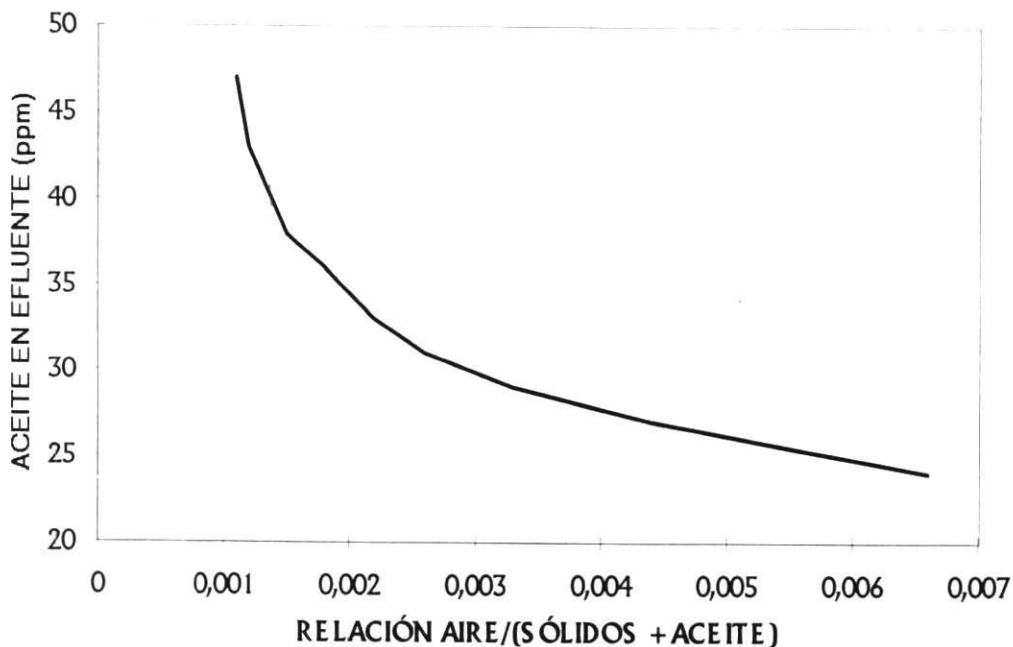
- Los experimentos de la prueba de jarras indicaron que la mejor floculación de las gotitas de aceite fue lograda con una dosis de sulfato de aluminio (alumbre) de 400 ppm y mostraron también que la presencia de sólidos suspendidos (arcilla) dan una floculación relativamente mejor.
- El intervalo de pH óptimo para la floculación fue de 2,0 a 3,0. A éste pH, el ion aluminio es más positivo y puede funcionar más efectivamente para neutralizar las cargas negativas de las gotitas de aceite.
- En los ensayos de solubilidad se observa que a velocidades de flujo mayores en el saturador, la eficiencia de transferencia de aire se incrementa levemente; esto se debe probablemente al incremento de los niveles de turbulencia a flujos más altos, lo cual sirve para incrementar el coeficiente de transferencia de masa (ver tabla 1).

TABLA 1.
Concentraciones reales de aire y eficiencia de saturación.

PARÁMETROS	ENSAYO 1	ENSAYO 2
Caudal (l/s)	0,008	0,024
Concentración (mg/l) 95,86	98,01	
Eficiencia de saturación	96,76	98,93

- En las pruebas de flotación se observa que la eficiencia de remoción para el aceite aumentó con la relación A/S (figura 3); además se observa que la eficiencia de remoción del aceite es más alta que aquella de los sólidos suspendidos (figuras 4 y 6), debido a la tendencia natural del aceite a flotar y porque la naturaleza hidrofóbica de las gotitas de aceite aumenta la probabilidad de que una colisión con una burbuja pueda resultar en adhesión (tabla 2).

FIGURA 3. Remoción de aceite como una función de la relación A/S.



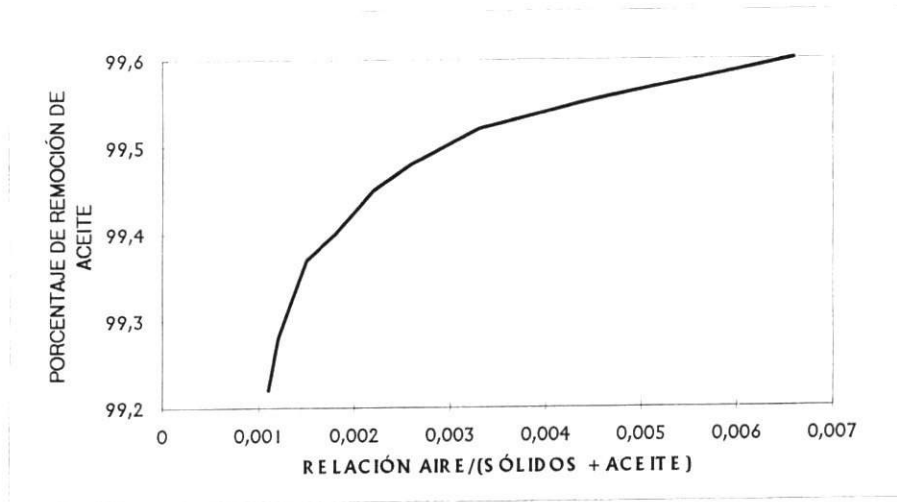


FIGURA 4. Eficiencia de remoción de aceite como una función de la relación A/S.

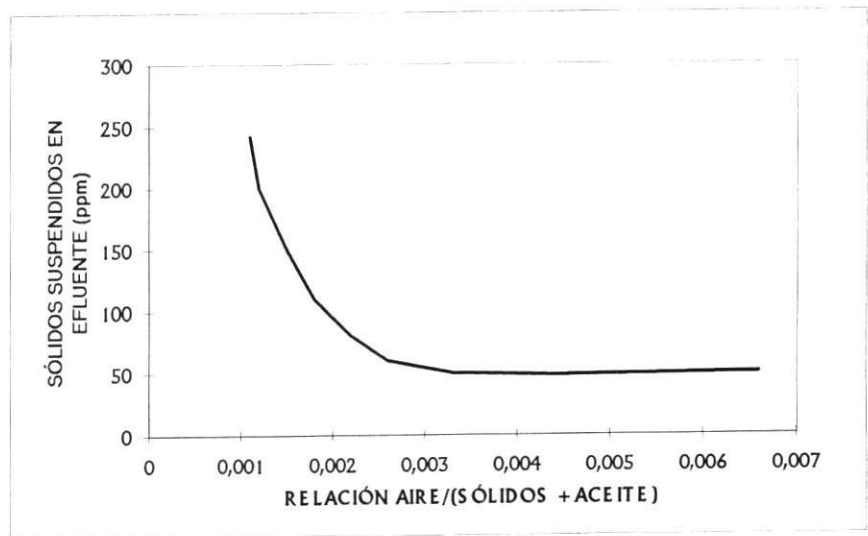


FIGURA 5. Remoción de sólidos suspendidos como una función de la relación A/S.

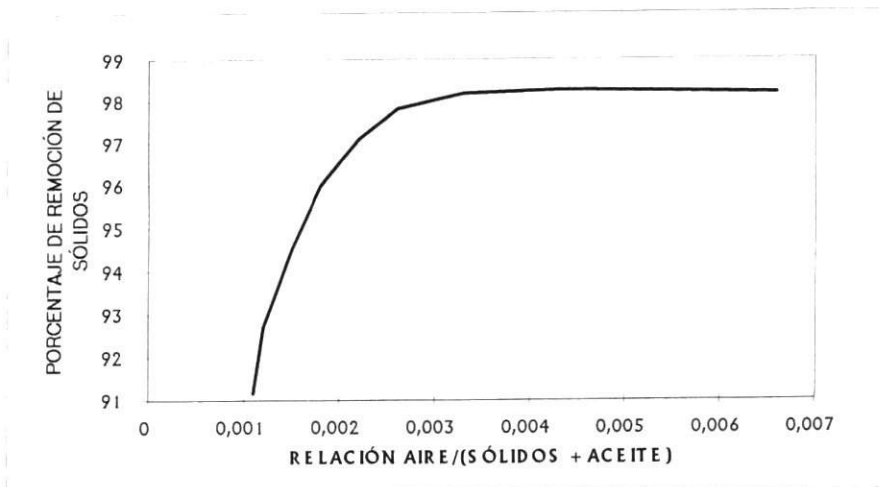


FIGURA 6. Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos como una función de la relación A/S.

TABLA 2. Remoción de aceite y sólidos suspendidos por FAD.

A/S	Sólidos remanentes (ppm)	% remoción sólidos	Aceite remanente (ppm)	% remoción aceite
0,0011	242	91,16	47	99,22
0,0022	80	97,08	33	99,45
0,0033	50	98,17	29	99,52
0,0044	48	98,25	27	99,55
0,0066	50	98,17	24	99,60

- Concentración inicial de aceite: 6000 ppm
- Concentración inicial de sólidos: 2738 ppm

BIBLIOGRAFÍA

1. BOTES, V. and VAN VUUREN, R.J. Dissolved air flotation for the removal of algae and inorganic turbidity on a large scale. *Water Supply*. vol.9: pp 133-139.1991.
2. BRATBY, J.R. treatment of raw wastewater overflows by dissolved-air flotation. *Journal WPCF*. Washington. vol.54, No. 12: pp 1558-1565. Diciembre, 1982.
3. BRATBY, J.R. and MARAIS, G.V. Dissolved air (pressure) flotation and evaluation of inter-relationships between process variables and their optimisation for design. *Water S.A.* vol. 1, No. 2: pp 57-69. Julio, 1975.
4. BRATBY, J.R. and MARAIS, G.V. Saturador performance in dissolved-air (pressure) flotation. *Water Research*. Oxford. vol.9: pp 929-936. 1975.
5. EDZWALD, J.K; MALLEY, J.P. and YU, C. A conceptual model for dissolved air flotation in water treatment. *Water Supply*. vol.9: pp 141-150. 1991.
6. EDZWALD, J.K. and WALSH, J.P and KAMINSKI, G.S. Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. *Journal AWWA*. Denver, Colorado. vol.84: pp 92-100. Marzo, 1992.
7. FORD, D.L. and ELTON, R.L. Removal of oil and grease industrial wastewaters. *Chemical Engineering*. vol.60, No. 10: pp 49-56. Octubre, 1977.
8. HAHN, H.H. Sedimentation and flotation: present status and necessary development: an introduction. *Water Supply*. vol.9: pp 111-122. 1991.
9. HO, C.C. and TAN, Y.K. Comparison of chemical flocculation and dissolved air flotation of anaerobically treated palm oil mill effluent. *Water Research*. Oxford. vol.23: pp 395-400. Abril, 1989.
10. JANSSENS, J.G. Developments in coagulation, flocculation and dissolved air flotation. *Water/Engineering and Management*. vol.139: pp 26-31. Febrero, 1992.

11. KITCHENER, J.A. and GOCHIN, R.J. The mechanism of dissolved air flotation for potable water: basic analysis and a proposal. *Water Research*. Oxford. vol 15: pp 585-590. 1981.
12. LOVETT, D.A. and TRAVERS, S.M. Dissolved air flotation for abattoir wastewater. *Water Research*. Oxford. vol.20: pp 421-426. Abril, 1986.
13. NOLAN, B.T. y otros. Multi-stage air flotation of tar sand wastewater. *Journal of Energy Engineering*. vol.112: pp 14-24. Abril, 1986.
14. RAMALHO, R.S. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona. Reverté, S.A., 1991. 705 p.
15. STEINER, J.L. y otros. Air flotation treatment of refinery waste water. *Chemical Engineering Progress*. vol.74, No. 12: pp 39-45. Diciembre, 1978.
16. VAN HAM, N.J. y otros. The effect of air distribution on the induced air flotation of fine oil in water emulsions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. vol.61: pp 541-547. Agosto, 1983.
17. WELTY, J.R y otros. Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. México. Limusa S.A., 1989. 887 p.
18. ZABEL, T. The advantages of dissolved-air flotation for water treatment. *Journal AWWA*. Denver, Colorado. vol.77: pp 42-46. Mayo, 1985.

* **Carlos Alberto Echeverri Londoño:**

Ingeniero Químico. Ingeniero Grupo de Higiene Ambiental e Industrial, Universidad de Antioquia. Miembro Asociación Colombiana de Ingeniería Química, Capítulo de Antioquia (Vicepresidente 1996-1997).

1. El término "floc" (pág. 63) es una palabra tomada del inglés, la cual se utiliza comúnmente para referirse a los flóculos o coágulos formados por la adición de un coagulante.