

CAPÍTULO VII - 9. FLOTACIÓN

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. SISTEMAS DE FLOTACIÓN.....	2
3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU APLICACIÓN.....	4
3.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN RELACIÓN A LA SEDIMENTACIÓN CONVENCIONAL Y DE FLUJO INCLINADO	4
3.2. CONSIDERACIONES SOBRE LA FLOTACIÓN EN RELACIÓN A OTRAS TECNOLOGÍAS	5
4. CRITERIOS DE PROYECTO	6
4.1. PRE-TRATAMIENTO	6
5. DETALLES CONSTRUCTIVOS.....	7
6. OPERACIÓN	8
7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS INSTALACIONES DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (FAD)	9
8. EMPLEO DE LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA REMOCIÓN DE ALGAS.....	11
8.1. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN	11
8.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA EN ESTUDIO	11
8.3. ENSAYOS REALIZADOS.....	13
8.4. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	15
9. EMPLEO DE LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA REMOCIÓN DE PESTICIDAS.....	20
9.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS PESTICIDAS	20

9.2. REMOCIÓN DE PESTICIDAS POR OXIDACIÓN Y ADSORCIÓN	21
9.3. ENSAYOS PARA REMOCIÓN DEL PESTICIDA DIURON.....	22
9.3.1. <i>Equipamientos y Ensayos Programados</i>	22
9.3.2. <i>Flotación</i>	23
9.3.3. <i>Coagulación</i>	23
9.3.4. <i>Floculación</i>	23
9.3.5. <i>Filtración</i>	23
9.3.6. <i>Ozonización</i>	24
9.3.7. <i>Aplicación de CAP</i>	24
9.3.8. <i>Procedimientos de los Ensayos</i>	24
9.4. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	25
10. EMPLEO DE LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA REMOCIÓN DE COLOR	29
11. EJEMPLO	37
12. BIBLIOGRAFIA	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Características de la muestra de agua original	12
Tabla 2. Características del agua en estudio.....	13
Tabla 3. Resultados del Ensayo 1- Sulfato de Aluminio = 25 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 7,1	15
Tabla 4. Resultados del Ensayo 2- Sulfato de Aluminio = 30 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 7,0.....	15
Tabla 5. Resultados del Ensayo 3 - Sulfato de Aluminio = 35 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,9.....	15
Tabla 6. Resultados del Ensayo 4 - Sulfato de Aluminio = 25 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 7,1.....	16
Tabla 7. Resultados del Ensayo 5 - Sulfato de Aluminio = 30 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 7,0.....	16
Tabla 8. Resultados del Ensayo 6 - Sulfato de Aluminio = 35 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 6,9.....	16
Tabla 9. Resultados del Ensayo 7 - Sulfato de Aluminio = 25 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 30 mg/l, pH de coagulación = 7,1.....	16
Tabla 10. Resultados del Ensayo 8 - Sulfato de Aluminio = 30 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 30 mg/l, pH de coagulación = 7,1.....	16
Tabla 11. Resultados del Ensayo 9-Dosis de Sulfato de Aluminio = 35 mg/l, Dosis de Carbón Activado en Polvo = 30 mg/l, pH de coagulación = 7,0	17
Tabla 12. Resultados del Ensayo 10 - Sulfato de Aluminio = 40 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,95.....	17
Tabla 13. Resultados del Ensayo 11 - Dosis de Sulfato de Aluminio = 45 mg/l, Dosis de Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,8.....	17
Tabla 14. Resultados del Ensayo 12 - Sulfato de Aluminio = 40 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 6,95.....	17
Tabla 15. Resultados del Ensayo 13 - Sulfato de Aluminio = 45 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 6,9.....	17
Tabla 16. Resultados del Ensayo 14 - Sulfato de Aluminio = 40 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,9.....	18
Tabla 17. Características del agua en estudio.....	25
Tabla 18. Resultados del Ensayo 1 (Coagulación, floculación, flotación y filtración).....	25
Tabla 19. Resultados del Ensayo 2 (Aplicación de CAP, coagulación, floculación, flotación y filtración)	25
Tabla 20. Resultados del Ensayo 3 (Ozonización, coagulación, floculación, flotación y filtración).....	26
Tabla 21. Resultados del Ensayo 4 (Ozonización, aplicación de CAP, coagulación, floculación, flotación y filtración).....	26
Tabla 22. Gradiente medio de velocidad óptima (G_{op}) para cada tiempo de floculación investigado y valores respectivos de eficiencia de remoción del color aparente y turbiedad, para velocidad de flotación de 21 cm/min (302 m/d).....	35

FIGURAS

Figura 1. Esquema de una instalación convencional de flotación	2
Figura 2. Esquema de una instalación de flotación y filtración localizada	3
Figura 3. Esquema de una instalación de flotación y filtración. Variante del esquema de la Figura 2 ..	3
Figura 4. Esquema del equipo de flotación para ensayos de laboratorio (medidas en centímetros)...	11
Figura 5. Resultados de los análisis de carbono orgánico total efectuados en el agua filtrada obtenida en los diferentes ensayos	26
Figura 6. Turbiedad de los subnadales y de los filtrados obtenidos en los diferentes ensayos.....	27
Figura 7. Color aparente de los subnadales o agua flotada y de los filtrados obtenidos en los diferentes ensayos	28
Figura 8. Instalación piloto de reactores estáticos (Reali y Goularte, 1996)	29
Figura 9. Color aparente remanente en función del pH de coagulación para diferentes dosis de sulfato de aluminio y velocidades de flotación (Reali y Goularte, 1996). Las características del ensayo fueron: temperatura del agua = 25 ± 1 °C; relación de recirculación = 8%; presión en la cámara de saturación = 441 kPa	31
Figura 10. Fracción remanente de color aparente y turbiedad en función de la velocidad de flotación para diferentes relaciones de recirculación (porcentual en volumen) (Reali y Goularte, 1996). Las características de los ensayos fueron: DSA = 40 mg/l; $pH_{coag} = 6,3$; presión en la cámara de saturación = 441 kPa; temperatura del agua = 25 ± 1 °C	32
Figura 11. Fracción remanente de color aparente y turbiedad en función del tiempo de mezcla rápida para velocidades de flotación de $U_{F1} = 21,8$ cm/min y $U_{F2} = 13,3$ cm/min y para diferentes valores de gradiente medio de velocidad de mezcla rápida – Características de los ensayos: DSA = 40 mg/l; R = 8%; presión de saturación = 441 kPa; Temperatura del agua = $25 \pm 1,5$ °C	33
Figura 12. Color aparente y turbiedad remanente en función del gradiente medio de velocidad de floculación para diferentes tiempos de floculación y velocidad de flotación de $U_{F1} = 21,0$ y $U_{F2} = 10,4$ cm/min para las siguientes condiciones: DSA = 40 mg/l, pH de coagulación = $6,36 \pm 0,13$, presión de saturación = 441 kPa, fracción de recirculación = 8%, temperatura del agua: $25,0 \pm 1,4$ °C	34
Figura 13. Planta de la unidad de mezcla rápida.....	39
Figura 14. Corte A-A de la unidad de mezcla rápida	40
Figura 15. Esquema de planta de la batería de floculadores	41
Figura 16. Esquema de corte A-A de la batería de floculadores	41
Figura 17. Esquema de la cámara de presurización (corte)	44
Figura 18. Planta del sistema de flotación - filtración	44
Figura 19. Corte A - A	45
Figura 20. Corte B – B.....	45

1. INTRODUCCIÓN

En la flotación se produce la separación de las partículas, presentes en el agua cruda o agua coagulada y floculada con sales de aluminio o hierro y de polímeros eventualmente.

El proceso consiste en la introducción de burbujas de aire en la masa líquida, a fin de que al adherirse en la superficie de esas partículas, aumenten el impulso que provoca el ascenso de las mismas hacia la superficie.

En la flotación por aire disuelto, generalmente empleada en el tratamiento de agua de abastecimiento, las burbujas se generan por la reducción de presión en el flujo de agua saturada con aire.

Los tres principales tipos de flotación por aire disuelto son: flotación al vacío, microflotación y flotación presurizada. De los tres, la flotación presurizada es la más ampliamente utilizada. En este sistema, el aire es disuelto en el agua mediante presión.

Los tres procesos básicos de flotación presurizada que pueden utilizarse son:

- Presurización parcial del afluente.
- Presurización total del afluente.
- Presurización de la recirculación.

Para las aplicaciones en el tratamiento del agua que requieren remoción de flóculos frágiles, el sistema con presurización de la recirculación es el más recomendado.

2. SISTEMAS DE FLOTACIÓN

En la **Figura 1**, la **Figura 2** y la **Figura 3** se presentan esquemas que muestran la disposición habitual de las instalaciones cuando se utiliza el proceso de flotación. La instalación esquematizada en la **Figura 1** es la tradicionalmente encontrada en sistemas de tratamiento de desagües cloacales, con las unidades de flotación y de filtración funcionando totalmente independientes y es generalmente recomendada cuando el agua cruda posee gran cantidad de algas y color elevado.

El agua de recirculación entra en contacto con el agua floculada, mediante un distribuidor especial ubicado dentro de una cámara provista de un deflector. El líquido resultante pasa a continuación a la cámara de flotación, en donde el material suspendido y retenido en su superficie, es descargado a una canaleta colectora. A su vez, el efluente del proceso es descargado por el fondo de esa cámara. Esa alternativa de flotación puede tener una única unidad, cuyo efluente se distribuirá en varios filtros.

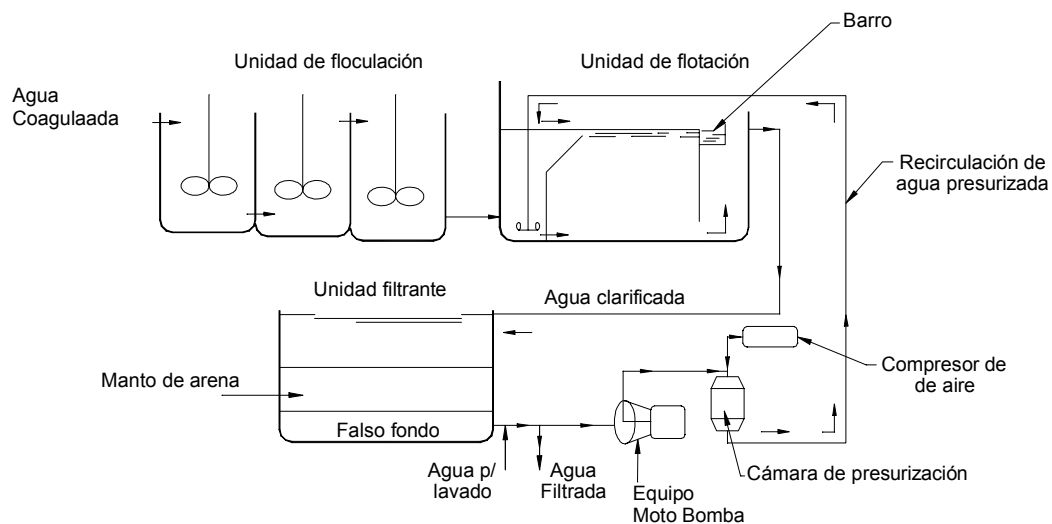


Figura 1. Esquema de una instalación convencional de flotación

En la **Figura 2** se tiene el esquema de la instalación en una misma unidad, en donde se desarrollan conjuntamente la flotación y la filtración. Al igual que en el esquema de la **Figura 1**, el agua de recirculación y el agua floculada se mezclan en una cámara que precede a esa unidad común.

En consecuencia en la planta de tratamiento se pueden proyectar varias unidades en paralelo.

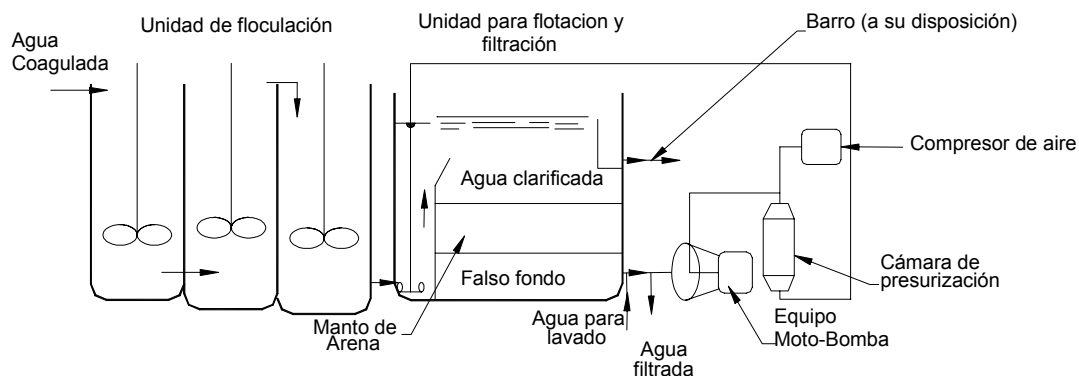


Figura 2. Esquema de una instalación de flotación y filtración localizada

En la **Figura 3** se muestra una variante del esquema de la **Figura 2**, en donde el agua recirculada es distribuida uniformemente en la masa líquida que está sobre la superficie del lecho filtrante.

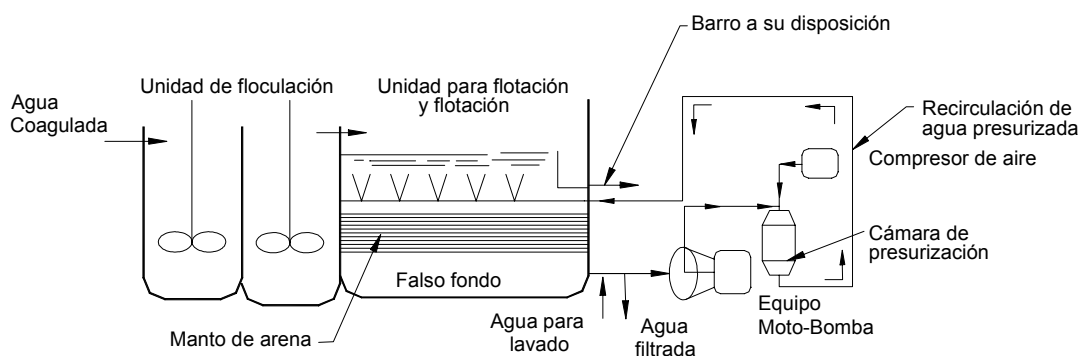


Figura 3. Esquema de una instalación de flotación y filtración. Variante del esquema de la Figura 2

3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU APLICACIÓN

3.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN RELACIÓN A LA SEDIMENTACIÓN CONVENCIONAL Y DE FLUJO INCLINADO

La calidad de agua a ser tratada determinará la utilización de flotación en lugar de sedimentación. Si en diferentes períodos del año, el agua cruda presenta turbiedad relativamente elevada, la decantación será la solución en lugar de la flotación, en tanto, en el caso de aguas con color verdadero elevado o con alta concentración de algas, la flotación pasa a ser la alternativa mas interesante, siempre que se proyecte ejecutar un tratamiento completo.

Las ventajas se resumen a continuación.

- Puede operar con cargas superficiales más elevadas, de 120 a 240 m³/m²d, en contraposición a la sedimentación convencional, de 15 a 40 m³/m²d que se realiza en conductos inclinados, de 80 a 160 m³/m²d.
- La planta resulta más compacta y las unidades son menores y más bajas.
- La dosis de coagulante y de auxiliares de coagulación/floculación son menores para producir agua clarificada de calidad semejante.
- Se obtiene una concentración relativamente elevada de sólidos en el material flotado, posibilitando utilizar unidades de espesamiento antes de la deshidratación del barro.
- Posibilidad de remoción de compuestos orgánicos volátiles y de sabor y olor en la cámara de flotación.
- Facilidad en la remoción de pequeños flóculos o de flóculos con menor peso específico, especialmente cuando el agua se presenta con color verdadero relativamente alto.
- Facilidad en la remoción de algas presentes en el agua cruda luego de la coagulación y floculación.
- Menor consumo mensual o anual de agua para lavado, pues las carreras de filtración resultan más largas.
- Rápida puesta en funcionamiento, con producción de agua clarificada con calidad satisfactoria en un tiempo inferior a 1 h (a pesar de que la literatura considera esta característica como ventaja, podría dudarse de la misma, pues el agua sedimentada consigue desde el inicio de la operación de los decantadores si la coagulación se realiza satisfactoriamente).

Las principales desventajas son las siguientes:

- Costos de implantación, operación y mantenimiento más elevados.
- Necesidad de mano de obra calificada para operación y mantenimiento.
- Menor tiempo disponible para corregir eventuales fallas en la coagulación.

- Necesidad de un monitoreo continuo de la coagulación.

3.2. CONSIDERACIONES SOBRE LA FLOTACIÓN EN RELACIÓN A OTRAS TECNOLOGÍAS

Comúnmente se ha realizado la comparación de la flotación con la sedimentación y no hay dudas en relación a su supremacía en términos de eficiencia, especialmente cuando el agua cruda presenta color verdadero relativamente elevado o si hay épocas del año cuando existen florecimiento algales. Mientras tanto, se ha comprobado el uso de otras tecnologías para aguas de ese tipo, más simples desde el punto de vista operacional y de menos costo de implantación, como la filtración directa ascendente o la dupla filtración-filtración. Siempre que la flotación surja como solución en lugar de la decantación, debido a la calidad del agua cruda, se deben también analizar otras alternativas en lugar del tratamiento en ciclo completo.

4. CRITERIOS DE PROYECTO

4.1. PRE-TRATAMIENTO

Mezcla Rápida - Coagulación

La coagulación se realiza con sales de aluminio o de hierro y/o polímero catiónico.

Existe necesidad de ejecutar ensayos específicos para determinar las dosis necesarias y el pH de coagulación.

La mezcla rápida se realiza en las siguientes condiciones:

- Tiempo: entre 5 y 60 s.
- Gradiente medio de velocidad: entre 500 y 1500 s⁻¹.

Floculación

En general, el tiempo de agitación en la floculación varía de 5 a 20 min, dependiendo del tipo de coagulante utilizado, con gradiente de velocidad variando entre 20 y 100 s⁻¹. Se recomienda el uso de un polímero para obtener en la cámara de flotación un manto de material flotado estable.

Caudal de Recirculación y Cámara de Presurización

En general, la recirculación varía entre 5 y 15%, o sea, el caudal de agua filtrada a ser presurizado y recirculado varía del 5 al 15% del caudal de agua a ser tratada.

La cámara de presurización, generalmente, se proyecta para las siguientes condiciones:

- Tiempo medio de detención = 2 a 5 min.
- Presión de saturación = 250 a 500 Kpa (2,5 a 5 atm).
- Velocidad de aplicación superficial : 1000 a 2000 m³/m²d.
- La cantidad de aire varía de 7 a 15 g/m³ de agua tratada.

Se recomienda el uso de anillos de plástico en el interior de la cámara de presurización para aumentar la eficiencia de solubilización del aire en el agua a ser presurizada.

Cámara de Flotación

- Tiempo medio de detención = 10 a 20 min.
- Carga superficial : 100 a 300 m³/m²d.
- Forma : rectangular o circular, dependiendo, principalmente, de la capacidad de la planta.

5. DETALLES CONSTRUCTIVOS

El tipo de construcción, totalmente en chapa metálica o parcialmente en hormigón, depende de la capacidad de la planta y del tipo de tecnología de flotación / filtración. Comúnmente pequeñas instalaciones se construyen en chapa metálica, efectuando la flotación y la filtración en una única unidad. En plantas mayores, la cámara de presurización se construye en chapa metálica y las unidades de floto-filtración, generalmente en hormigón. En realidad no existen restricciones en relación al tipo de material de construcción, debiendo realizarse una comparación de costo de ambos materiales en cada caso en particular.

6. OPERACIÓN

Además de los cuidados operacionales necesarios cuando exista coagulación química, seguida de floculación, hay otros requerimientos especiales en el caso de la flotación en lugar de la decantación. Es necesario tener operarios con buen grado de calificación, pues además del proceso de tratamiento en sí, existen cuidados especiales en relación a las bombas de recirculación del agua a ser presurizada, compresores de aire, cámara de presurización, etc.

Para que los parámetros sean optimizados cuando existe variación de la calidad del agua cruda, que requiere alteración de las dosis de productos químicos y posiblemente de los gradientes de velocidad en la mezcla rápida y floculación, es imprescindible realizar ensayos en laboratorio o en instalación piloto con escurrimiento continuo.

Adicionalmente, hay que tener cuidado con las variaciones de caudal de agua a ser tratada, pues además de las variaciones en los tiempos de detención en las unidades de mezcla rápida y de floculación, existe disminución de la carga superficial en la cámara de flotación, lo que dificulta sustentar el manto flotado.

7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS INSTALACIONES DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (FAD)

Los resultados que se obtienen en una instalación de flotación son función de los diversos parámetros que regulan su funcionamiento, destacándose:

- Eficiencia de la adherencia entre burbujas de aire y superficie de las partículas.
- Tamaño de las burbujas.
- Caudal de recirculación.
- Presión en la cámara de saturación.
- Velocidad ascensional en la cámara de flotación.
- Condiciones del pretratamiento químico.
- Tamaño y masa específica de los flóculos.
- Estabilidad del manto flotante.

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

- 1). Colisión de la burbuja con la partícula, debido a la turbulencia o atracción entre ambas y su adherencia.
- 2). Aprisionamiento de las burbujas en los flóculos o contacto entre flóculos que están sedimentando y burbujas de aire en ascenso.
- 3). Crecimiento de las burbujas de aire entre los flóculos.

Cuando se tienen partículas hidrofílicas (afines al agua), los mecanismos 2 y 3 parecen ser los responsables de la eficiencia de la flotación. En tanto, el mecanismo 1 parece predominar en conseguir una intercomunicación más estable de la burbuja de aire con las partículas que tienden a ser hidrofóbicas (no afines al agua).

En un trabajo desarrollado por Kitchener y Gouchin (1981), se observó que los tres mecanismos pueden suceder, pero el principal mecanismo en la flotación por aire disuelto para el tratamiento del agua son los mecanismos de colisión y adherencia.

El tamaño de las burbujas es muy importante en la flotación, pues las pequeñas, además de presentar mayor superficie específica para una misma cantidad de aire, necesitan desplazar menor cantidad de agua de la superficie de partículas a las cuales se van a adherir.

El máximo diámetro de burbuja para un escurrimiento laminar es 130 μm . Para tamaños de burbuja menores que 130 μm , para determinar la velocidad ascensional se puede utilizar la ley de Stokes, utilizada en la sedimentación con escurrimiento laminar.

$$U_t = \frac{g(\rho - \rho_g) d^2}{18 \mu} \quad (1)$$

donde:

U_t : velocidad de ascenso de la burbuja (LT^{-1})

g : aceleración de la gravedad (LT^{-2})

ρ : masa específica del agua (ML^{-3})

ρ_g : masa específica de la burbuja de gas (ML^{-3})

d : diámetro de la burbuja (L)

μ : viscosidad absoluta o dinámica del agua ($M \cdot T \cdot L^{-2}$)

El tiempo de contacto entre las burbujas y partículas en una cámara de flotación depende de la velocidad de ascenso terminal de las burbujas, la cual a su vez es proporcional al cuadrado del diámetro de las mismas.

$$\frac{t_{as1}}{t_{as2}} = \frac{U_{as1}}{U_{as2}} = \left(\frac{d_{b2}}{d_{b1}} \right)^2 \quad (2)$$

donde:

t_{as1}, t_{as2} = tiempo de ascenso respectivamente de las burbujas 1 y 2 (T)

U_{as1}, U_{as2} = velocidad de ascenso respectivamente de las burbujas 1 y 2 (LT^{-1})

d_{b1}, d_{b2} = diámetro respectivamente de las burbujas 1 y 2 (L)

En el caso de la flotación de aguas que contengan alto tenor de sólidos (como son los desagües generados en estaciones de tratamiento de agua), la relación aire-sólidos puede influir en la eficiencia de la remoción de sólidos, lo que implica una mayor relación de recirculación. Sin embargo en situaciones de flotación de aguas superficiales, con turbiedad que no sea muy elevada, ese parámetro deja de tener importancia y se utiliza el caudal de recirculación, usualmente en el orden del 5 al 15% del caudal de agua a ser flotado, como criterio de proyecto.

La presión en la cámara de saturación es usualmente mantenida entre 200 y 500 kPa y el tiempo de contacto es generalmente inferior a 5 min. El empleo de elementos de plástico de gran superficie específica en el interior de la cámara de saturación aumenta la eficiencia de la disolución de aire en el agua de recirculación.

La carga superficial en la unidad de flotación varía comúnmente entre 100 y 300 $m^3/m^2 \cdot día$ y el tiempo de detención está comprendido entre 10 y 20 min.

La mezcla rápida en la coagulación, la floculación, el tipo de coagulante químico y las propiedades del polímero, aplicados en el pretratamiento, interfieren significativamente en la eficiencia de la remoción de sólidos. Los polímeros son recomendados generalmente para que el manto de sólidos formados en la parte posterior de la unidad no se desagregue.

8. EMPLEO DE LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA REMOCIÓN DE ALGAS

8.1. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN

En la **Figura 4** se muestra el esquema de un tipo de instalación de laboratorio utilizada en la Escuela de Ingeniería de San Carlos de la Universidad de São Paulo, Brasil para la ejecución de ensayos de flotación. Está constituida por una cámara de saturación aire-agua construida en acrílico transparente y accesorios (manómetro, válvulas, purga de aire, mangueras de transferencia, etc.), por una cámara de flotación con escala volumétrica, por agitador y un conjunto motor reductor.

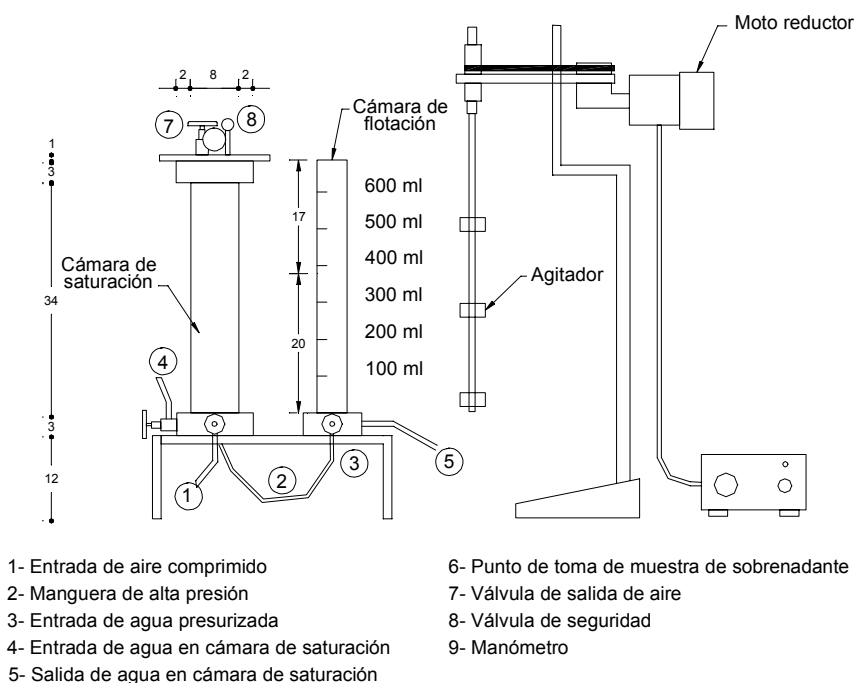


Figura 4. Esquema del equipo de flotación para ensayos de laboratorio (medidas en centímetros)

Los ensayos de laboratorio sirvieron de antecedente para el proyecto de una planta de potabilización.

8.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA EN ESTUDIO

En el proyecto de una Planta de Tratamiento de Agua se previó con el empleo de ozonización, aplicación de carbón activado en polvo, coagulación/floculación, flotación, filtración en arena y desinfección final. Para tener una idea de la remoción de algas y de

los compuestos orgánicos presentes en el agua a ser captada, se recogió una muestra de la misma y se efectuaron ensayos de tratamiento en laboratorio, incluyendo la pre-oxidación con ozono, adsorción en carbón activado en polvo, coagulación con sulfato de aluminio o cloruro férrico, flotación por aire disuelto y filtración en papel de filtro. En la **Tabla 1** se encuentran las características principales de la muestra de agua original.

Característica	Valor
pH	7,5
Color aparente (UC)	20
Color verdadero (UC)	10
Turbiedad (UT)	3,2
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	59,0
Dureza total (mg CaCO ₃ /l)	62,0
Cloruros (mg/l)	8,4
Conductividad eléctrica (μS/cm)	162,0
Fosfato total (mg PO ₄ ⁻³ /l)	0,22
Nitrógeno total (mg N/l)	1,82
Nitrógeno amoniacal (mg NH ₃ /l)	0,11
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ /l)	1,25
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ /l)	0,023
Sulfato (mg/l)	19,6
Carbono orgánico total (mg/l)	4,3
Coliformes totales (NMP/100 ml)	579,4
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	14,2
Oxígeno consumido (mg/l)	3,5
Sólidos totales (mg/l)	152,0
Sólidos totales fijos (mg/l)	32,0
Sólidos totales volátiles (mg/l)	120,0
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	2,0
Sólidos disueltos totales (mg/l)	150,0
Zinc (mg/l)	ND
Plomo (mg/l)	ND
Cadmio (mg/l)	ND
Níquel (mg/l)	ND
Hierro (mg/l)	0,08
Manganeso (mg/l)	0,08
Cobre (mg/l)	ND
Cromo total mg/l)	ND
Aluminio (mg/l)	ND
Calcio (mg/l)	1,45
Magnesio (mg/l)	3,40
Potencial Zeta (mV)	- 13,7
Concentración de algas (ind./l)	2,3 x 10 ⁴

ND : no detectado

Tabla 1. Características de la muestra de agua original

Debido a la baja temperatura del agua (10 a 12 °C) en la época cuando se obtuvo la muestra, presentó una pequeña concentración algal, razón por la cual hubo necesidad de enriquecer el medio con nutrientes específicos : (0,058 g/l de Ca(NO₃)₂, 0,01 g/l de K₂HPO₄, 0,025 g/l de MgSO₄ x 4 H₂O, 0,02 g/l de Na₂CO₃, 0,044 g/l de Na₂SiO₃ x 5 H₂O, 0,003 g/l de nitrato férrico, 0,003 g/l de ácido cítrico, trazas de metales) y de aplicación

continúa de luz para aumentar la concentración de algas de forma de reflejar una situación más crítica. En la **Tabla 2** se presentan los datos relativos a la caracterización del agua en estudio, utilizada para la ejecución de los ensayos.

Característica	Valor promedio
pH	8,2
Color aparente (UC)	220
Color verdadero (UC)	30
Turbiedad (UT)	9,8
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	87,0
Dureza total (mg CaCO ₃ /l)	84,0
Conductividad eléctrica (μS/cm)	228,0
Fosfato total (mg PO ₄ ⁻³ /l)	2,1
Nitritos (mg NO ₂ /l)	0,23
Nitrógeno total (mg N/l)	3,0
Carbono orgánico total (mg/l)	14,3
Sólidos totales (mg/l)	255,0
Sólidos totales fijos (mg/l)	32,0
Sólidos totales volátiles (mg/l)	223,0
Potencial Zeta (mV)	- 18,7
Concentración de algas (ind./l)	4,6 x 10 ⁷

ND: no detectado

Tabla 2. Características del agua en estudio

Los principales géneros de algas observados, tanto en la muestra original, como en el agua en estudio fueron: Scenedesmus, Staurastrum, Pediastrum (clorofíceas), Aulacoseira (o Melosira), Cyclotella (diatomáceas).

8.3. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos de pre-oxidación con ozono se realizaron en una instalación constituida por: generador de ozono a partir de oxígeno prácticamente exento de humedad, con producción máxima de 100 mg/h de ozono, columna de ozonización compuesta por una manguera transparente de 5 m de altura y diámetro de 19,0 mm y manguera de 4,8 mm con difusor de piedra porosa en su extremidad, inserta en la columna de ozonización.

Los ensayos de coagulación-floculación-flotación se realizaron en una instalación de flotación (ver **Figura 4**) la cual poseía cámara de presurización, cámara de flotación y accesorios y la filtración utilizando filtro de papel Whatman 40.

Se emplearon los siguientes productos: cloruro férrico PA (FeCl₃ x 6 H₂O), sulfato de aluminio PA [Al₂ (SO₄)₃ x 18 H₂O], ozono, carbón activado en polvo (90 % en peso con tamaño menor que 0,05 mm, número de iodo = 746, origen vegetal).

Los ensayos se realizaron con el agua de estudio de acuerdo a lo siguiente:

- Ozonización: tiempo de contacto = 10 min con dosis de ozono aplicado \cong 5 mg/l.

- Mezcla de Carbón: tiempo de agitación = 3 min con gradiente de velocidad = 100 s^{-1} .
- Mezcla del Coagulante: tiempo de agitación = 60 s, con gradiente de velocidad = 100 s^{-1} .
- Floculación: tiempo de agitación = 20 min con gradiente de velocidad = 20 s^{-1} .
- Flotación: velocidad media de ascenso = 6 cm/min.

Se midieron los siguientes parámetros en el agua luego de la flotación: pH de coagulación, color aparente, concentración de algas y carbono orgánico total. Parte del agua remanente luego de la flotación, se filtró en papel de filtro Whatman 40 buscando simular la filtración.

Antes de iniciar los ensayos de ozonización, adsorción, coagulación, flotación y filtración, se ejecutaron ensayos preliminares en equipamiento de reactores estáticos (Jar Test), habiéndose observado que las dosis de cloruro férrico y de sulfato de aluminio debían estar comprendidos entre 20 y 40 mg/l.

Se empleó la siguiente metodología para la ejecución de los ensayos 1 a 13:

- Se colocó un volumen del orden de 1 litro de agua desionizada en la cámara de saturación y se introdujo aire durante cerca de 30 min, manteniendo la presión de 4 atm.
- Se introdujo un volumen del orden de 650 ml de agua de estudio en la columna de ozonización, luego del ajuste de la temperatura a 20°C .
- Se abrió la válvula del cilindro de oxígeno, se dejó el oxígeno fluir por la columna de ozonización y se ajustó el caudal de oxígeno (en función de la presión en el manómetro de salida del oxígeno) para que resultase una producción de ozono de 20 mg/h (determinada previamente por medio de solución patrón conteniendo ioduro de potasio, conforme a los Standard Methods – 19° Ed.), para tener una dosis de ozono aproximadamente igual a 5 mg/l).
- Una vez ajustado el caudal de oxígeno se conectó el ozonizador, el cual se mantuvo en funcionamiento por 10 min.
- Luego del período de ozonización, el equipamiento se desconectó y se recogió el agua en la parte inferior de la columna, abriéndose la válvula de descarga.
- Un volumen de 450 ml de agua ozonizada inmediatamente se transfirió a la cámara de flotación.
- Seguidamente se adicionó carbón activado con agitación por un período de 3 min y se introdujo la solución del coagulante, manteniéndose constante el gradiente de velocidad ($\cong 100 \text{ s}^{-1}$) durante 60 s.
- Luego de la coagulación, se procedió a la floculación por el período estipulado (20 min) con gradiente de velocidad de 20 s^{-1} .
- Finalizada la floculación, se abrió la válvula aguja de interconexión de la cámara de saturación con la de floculación, de modo de aumentar el volumen de ésta a 500 ml, o sea, simulándose una recirculación de aproximadamente 10%.

- Luego de 2,5 min, se desconectó el agitador, se retiró el mismo y se recogió la muestra de agua en un punto de muestreo situado a 15 cm a partir del fondo de la cámara de flotación (velocidad de ascenso de 6,0 cm/min), la que conformó la muestra de agua flotada y en seguida, se procedió a la filtración en papel de filtro Whatman 40 dispuesto en un embudo apoyado en erlenmeier, hasta que resultó un volumen suficiente para la realización de los exámenes y análisis programados.

En el ensayo 14, se efectuaron tomas de agua remanente (subnadante) en los tiempos 1, 2, 3, 4 y 5 min, luego de introducir el agua presurizada en la cámara de flotación.

8.4. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En las Tablas que siguen se presentan los resultados obtenidos utilizando sulfato de aluminio como coagulante primario para dosis de 25, 30, 35, 40 y 45 mg/l. No se presentan los resultados con cloruro férrico, pues para dosis entre 15 y 50 mg/l, los mismos fueron insatisfactorios (valor del color aparente residual del sobrenadante mayor a 10 uC y del filtrado mayor a 5 uC y la concentración de carbono orgánico total mayor a 7,5 mg/l. resultaron insatisfactorios).

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	7,1	7,1
Color aparente (UC)	17,5	7,5
Turbiedad (UT)	2,64	1,67
Carbono orgánico total (mg/l)	4,04	----
Concentración de algas (ind./l)	$6,8 \times 10^5$	----

Tabla 3. Resultados del Ensayo 1- Sulfato de Aluminio = 25 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 7,1

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	7,0	7,0
Color aparente (UC)	12,5	2,5
Turbiedad (UT)	2,15	0,92
Carbono orgánico total (mg/l)	3,64	0,99
Concentración de algas (ind./l)	$9,8 \times 10^4$	$3,83 \times 10^6$

Tabla 4. Resultados del Ensayo 2- Sulfato de Aluminio = 30 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 7,0

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	6,9	6,9
Color aparente (UC)	12,5	5,0
Turbiedad (UT)	2,61	1,11
Carbono orgánico total (mg/l)	3,72	-----
Concentración de algas (ind./l)	$6,8 \times 10^4$	-----

Tabla 5. Resultados del Ensayo 3 - Sulfato de Aluminio = 35 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,9

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	7,1	7,1
Color aparente (UC)	17,5	7,5
Turbiedad (UT)	3,33	1,54
Carbono orgánico total (mg/l)	3,43	-----
Concentración de algas (ind./l)	-----	----

Tabla 6. Resultados del Ensayo 4 - Sulfato de Aluminio = 25 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 7,1

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	7,0	7,0
Color aparente (UC)	7,5	2,5
Turbiedad (UT)	2,63	0,96
Carbono orgánico total (mg/l)	3,75	0,37
Concentración de algas (ind./l)	$1,83 \times 10^6$	$6,66 \times 10^5$

Tabla 7. Resultados del Ensayo 5 - Sulfato de Aluminio = 30 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 7,0

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	6,9	6,9
Color aparente (UC)	10,0	5,0
Turbiedad (UT)	2,25	0,86
Carbono orgánico total (mg/l)	2,98	0,43
Concentración de algas (ind./l)	$1,29 \times 10^6$	$7,08 \times 10^5$

Tabla 8. Resultados del Ensayo 6 - Sulfato de Aluminio = 35 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 6,9

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	7,1	7,1
Color aparente (UC)	12,5	5,0
Turbiedad (UT)	3,53	1,23
Carbono orgánico total (mg/l)	3,89	-----
Concentración de algas (ind./l)	-----	-----

Tabla 9. Resultados del Ensayo 7 - Sulfato de Aluminio = 25 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 30 mg/l; pH de coagulación = 7,1

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	7,1	7,1
Color aparente (UC)	17,5	7,5
Turbiedad (UT)	2,77	1,69
Carbono orgánico total (mg/l)	3,18	-----
Concentración de algas (ind./l)	-----	-----

Tabla 10. Resultados del Ensayo 8 - Sulfato de Aluminio = 30 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 30 mg/l, pH de coagulación = 7,1

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	7,0	7,0
Color aparente (UC)	15,0	2,77
Turbiedad (UT)	2,77	0,92
Carbono orgánico total (mg/l)	3,11	0,16
Concentración de algas (ind./l)	1×10^6	$8,33 \times 10^4$

Tabla 11. Resultados del Ensayo 9-Dosis de Sulfato de Aluminio = 35 mg/l, Dosis de Carbón Activado en Polvo = 30 mg/l, pH de coagulación = 7,0

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	6,85	6,95
Color aparente (UC)	10,0	2,5
Turbiedad (UT)	2,01	1,05
Carbono orgánico total (mg/l)	4,59	0,76
Concentración de algas (ind./l)	$1,83 \times 10^6$	$8,75 \times 10^4$

Tabla 12. Resultados del Ensayo 10 - Sulfato de Aluminio = 40 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,95

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	6,8	6,8
Color aparente (UC)	7,5	2,5
Turbiedad (UT)	2,01	0,76
Carbono orgánico total (mg/l)	3,22	0,63
Concentración de algas (ind./l)	$8,33 \times 10^5$	$8,33 \times 10^4$

Tabla 13. Resultados del Ensayo 11 - Dosis de Sulfato de Aluminio = 45 mg/l, Dosis de Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,8

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	6,95	6,95
Color aparente (UC)	12,5	5,0
Turbiedad (UT)	2,44	1,42
Carbono orgánico total (mg/l)	4,47	-----
Concentración de algas (ind./l)	-----	-----

Tabla 14. Resultados del Ensayo 12 - Sulfato de Aluminio = 40 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 6,95

Parámetro	Subnadante Flotado	Filtrado
pH de coagulación	6,9	6,9
Color aparente (UC)	10,0	2,5
Turbiedad (UT)	2,25	0,83
Carbono orgánico total (mg/l)	3,21	0,07
Concentración de algas (ind./l)	$7,5 \times 10^5$	$3,25 \times 10^4$

Tabla 15. Resultados del Ensayo 13 - Sulfato de Aluminio = 45 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 20 mg/l, pH de coagulación = 6,9

Parámetro	Subnadante flotado para las velocidades de ascenso (cm/min)					Filtrado para las velocidades de ascenso (cm/min)				
	15	7,5	5,0	3,75	3,0	15	7,5	5,0	3,75	3,0
pH de coagulación			6,9					6,9		
Color Aparente (uC)	12,5	10,0	7,5	7,5	5,0	10,0	5,0	5,0	2,5	<2,5
Turbiedad (UT)	2,15	2,02	1,95	1,90	1,85	1,74	1,23	0,95	0,84	0,73

Tabla 16. Resultados del Ensayo 14 - Sulfato de Aluminio = 40 mg/l, Carbón Activado en Polvo = 10 mg/l, pH de coagulación = 6,9

Como la muestra de agua original presentó un pequeño número de algas, se utilizaron nutrientes para simular una situación que reflejase posibles condiciones futuras de florecimientos algales. Mientras tanto, no hubo crecimiento de cianobacterias en el agua de estudio, lo que debe haber sido consecuencia del medio de cultivo utilizado y de las condiciones ambientales. La temperatura de los ensayos se mantuvo en 20°C, pues raramente se ven florecimientos algales con agua con una temperatura inferior a 15°C.

Es interesante mencionar que se utilizó agua desionizada para la recirculación. Tal medida se adoptó simplemente para facilitar la ejecución de los ensayos. De esta forma, en los resultados obtenidos se debe considerar un factor de dilución del 10%, lo que podría aumentar ligeramente los parámetros presentados en las tablas anteriores.

Aunque hubiese sido fijada la presión en la cámara de saturación en 4 atm y el caudal de recirculación del orden del 10%, tales parámetros se podrían optimizar si hubiese volumen suficiente de la muestra del agua en estudio. Asimismo, se adoptaron los parámetros físicos de la mezcla rápida y de la floculación (tiempo de agitación y gradiente de velocidad medio), los cuales también deberían ser optimizados.

Es importante que se hagan tales consideraciones, pues los equipamientos tipo turbina permiten variar la velocidad de rotación y consecuentemente, el gradiente de velocidad en las plantas a escala real. La velocidad ascensional de 6,0 cm/min parecer haber sido correctamente elegida, pues al observar la **Tabla 16**, los resultados de remoción de turbiedad y color son satisfactorios para la velocidad de ascenso de 5,0 cm/min.

El uso de papel de filtro Whatman 40 para simular la filtración provee resultados generalmente peores que los observados en filtros de plantas de tratamiento, razón por la cual se puede esperar que la turbiedad, el color aparente y la concentración algal en el efluente de la planta a ser construida, sean menores que los resultados obtenidos en el presente estudio.

El volumen de barro flotado fue consistente (no decayendo luego de los 20 min). Luego de la ejecución de los ensayos, el volumen de barro flotado resultó variable (dependiendo de las dosis de carbón activado en polvo) entre 10 y 20 ml/l.

En base al trabajo realizado, principalmente se concluye que:

- La remoción de carbono orgánico total, importante hasta con dosis de 10 mg/l de carbón activado en polvo, indica la adsorción de gran parte de la materia orgánica presente en el agua estudiada o como consecuencia de la acción del ozono.
- La remoción de algas es considerable, disminuyendo su concentración desde el 10^7 al 10^5 en el agua flotada, o sea del orden del 99% y del 99,9% en el agua filtrada. En tanto, aunque resultasen concentraciones relativamente elevadas de algas en el agua filtrada en papel de filtro (del orden del 10^4 ind./l), generalmente se trataba de células inactivadas, debido probablemente a la acción del ozono.
- Tanto la turbiedad, como el color aparente del agua remanente luego de la flotación o del filtrado en papel de filtro Whatman 40, son altamente influenciadas por la velocidad de flotación.

A los efectos del proyecto, parece ser recomendable la adopción de 7,5 cm/min como máximo para la velocidad de ascenso.

- La cantidad de barro flotado resultó entre 10 y 20 ml/l, para el agua estudiada y dosis empleadas del carbón activado y coagulante.

9. EMPLEO DE LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA REMOCIÓN DE PESTICIDAS

9.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS PESTICIDAS

El consumo de pesticidas está aumentando a lo largo de los años, principalmente porque con el crecimiento demográfico acelerado verificado en este siglo, hubo un enorme interés en multiplicar la producción de alimentos, buscándose para ello recursos que proporcionen al productor del campo mejores rendimientos en sus cosechas. Dentro de estos recursos están la ingeniería genética, la preparación del suelo con adición de fertilizantes y los pesticidas.

Desde el punto de vista del Tratamiento de Agua para Consumo Humano, los fertilizantes que no son absorbidos por los cultivos agrícolas permanecen en el suelo y contribuyen a la eutroficación de las fuentes de agua. Los pesticidas pueden ser tóxicos para los animales de vida acuática y también para el ser humano y generalmente no son biodegradables, o sea degradados por la acción de microorganismos presentes en el medio ambiente, teniendo que ser por lo tanto removidos del agua.

Algunas tecnologías se están empleando en busca de una alternativa de tratamiento eficiente en lo que respecta a la remoción de pesticidas en una planta de tratamiento, destacándose la nanofiltración, ósmosis inversa, ozonización, adsorción en carbón activado en polvo y la flotación, además de la coagulación y/o floculación.

Existen varios pesticidas utilizados actualmente en la agricultura. La tendencia actual es que estos productos se tornen cada vez más específicos, procurando minimizar el impacto ambiental causado por su aplicación. A manera de ejemplo entre los innumerables productos encontrados en el mercado, puede mencionarse al herbicida Diuron, comúnmente encontrado en Brasil en muchas plantaciones de naranja, caña de azúcar, etc. Este herbicida posee las siguientes características principales:

- Nombre común: diuron.
- Nomenclatura IUPAC: 3-(3,4-diclorofenil)-1,1-dimetilurea.
- Otros nombres: DCMU, diclorofenidim, DMU.
- Nombres comerciales: Karmex, Diurex, Di-on, Vonduron, Diater, Unidron, Dynex, Cekiuron, Crisuron, Decimax, Ronex, Marmer.
- Familia química: urea.
- Fórmula molecular: $C_9H_{10}Cl_2N_2O$.
- Peso molecular: 233,10.
- Forma física: cristales incoloros.
- Punto de fusión: 158 a 159 °C.

- Estabilidad: estable en el medio neutro a temperaturas normales, se hidroliza a temperaturas elevadas y por la acción de ácidos y álcalis; se descompone a 180 –190 °C.
- Corrosividad: no corrosivo.
- Modo de acción: inhibe la fotosíntesis.
- Usos: control total de larvas dañinas y musgos en áreas que no son de cultivo. Control selectivo de la germinación de gramíneas y larvas en el cultivo de espárrago, árboles frutales, frutas cítricas, vides, olivares, ananás, bananas, caña de azúcar, algodón, hortalizas, alfalfa, legumbres, cereales, maíz, sorgo, etc.
- Tipos de fórmula: polvo humedecido; suspensión concentrada.
- Toxicidad a mamíferos: la dosis oral crítica para matar al 50% de las ratas muestreadas es de 3400 mg/kg.; levemente irritante a los ojos de conejos (polvo humedecido); no irritante a la integridad de la piel del cerdo de la india (pasta con 50% de agua); en 2 años de muestreos de alimentación, el nivel para que no tenga efecto en la ración diaria de las ratas fue de 250 mg/kg y de 125 mg/kg para perros.
- Toxicidad a pájaros: concentración requerida para matar el 50% de los animales muestreados en ocho días de dieta: codorniz de los Estados Unidos = 1730, codorniz japonesa > 5000, pato salvaje > 5000, faisán > 5000 mg/kg. de la ración.
- Toxicidad a peces: la concentración requerida para matar al 50% de los animales en 96 horas: trucha arco iris = 5,6 mg/l; pez luna de branquias azules = 5,9 mg/l.
- Toxicidad a abejas: no tóxico.
- Degradación en el suelo: la duración de su actividad en el suelo es de 4 a 8 meses, dependiendo del tipo de suelo y de la humedad.
- Antídotos y tratamiento médico: No se conoce antídoto específico; exige tratamiento sintomático.

9.2. REMOCIÓN DE PESTICIDAS POR OXIDACIÓN Y ADSORCIÓN

La remoción de pesticidas presentes en el agua cruda puede alcanzarse por varias maneras, entre de las cuales puede mencionarse: oxidación, aireación, adsorción en carbón activado en polvo, además de la coagulación y en algunos casos de la floculación, antes de la flotación y filtración.

La oxidación puede realizarse con varios productos, tales como cloro, dióxido de cloro u ozono. En general, tales productos se emplean para romper las interconexiones de los anillos aromáticos, facilitando la coagulación o adsorción de los subproductos. En el estudio a seguir del caso presentado fue utilizado el ozono.

El ozono se puede utilizar para desinfectar, oxidar metales y materia orgánica, reducir la dosis del coagulante, remover compuestos que causan sabor y olor al agua, reducir la concentración de precursores de THM, etc. Una vez utilizado, además de oxidar materia orgánica, el ozono al entrar en contacto con células de microorganismos provoca la desintegración de la pared celular, destruyendo la materia orgánica o formando nuevos

compuestos que, dependiendo de la calidad del agua cruda y de las dosis utilizadas, también pueden causar daños a los consumidores (Metcalf & Eddy, 1991).

En el proceso de adsorción, los compuestos orgánicos permanecen adsorbidos en la superficie del carbón activado en polvo (CAP) o carbón activado granular (CAG), debido a la acción de diversos tipos de fuerzas químicas como conexiones de hidrógeno, interacciones dipolo-dipolo y fuerzas de Van der Waals.

El CAP puede aplicarse en varias etapas del tratamiento, antes o después de la pre-oxidación, en la llegada del agua cruda o luego de la cámara de ozonización (si ésta fuese utilizada). El lugar de su introducción debe ser elegido procurando tener en cuenta las siguientes condiciones: mezcla eficiente y tiempo de contacto suficiente para garantizar la adsorción de los contaminantes; interferencia mínima con los demás productos químicos aplicados en la planta. Según Di Bernardo (1995), se mencionan en la literatura (bibliografía) dosis del orden de 5 a 25 mg/l de CAP, alcanzándose resultados satisfactorios en la remoción de compuestos orgánicos.

El carbón activado granular es generalmente utilizado en filtros especiales después de la filtración en medio filtrante de arena (o antracita y arena o antracita, arena y granate).

9.3. ENSAYOS PARA REMOCIÓN DEL PESTICIDA DIURON

9.3.1. Equipamientos y Ensayos Programados

Los equipamientos y materiales utilizados fueron:

- Equipamiento de flotación constituido por una cámara de saturación, válvula para despresurización y columna de flotación con un punto para obtención de muestras del subnadante y además un agitador de paletas utilizado en los procesos de coagulación y floculación (ver **Figura 4**).
- Generador de Ozono de la marca Gasozon con producción de 100 mg/h, acoplado a un cilindro de Oxígeno de alta presión que contenía 10 m³ a una presión de 200 Kgf/cm², marca White Martins.
- Papel de filtro Whatman 40 dispuestos en embudos apoyados en erlenmeyers.
- Carbón activado en Polvo con las siguientes características: numero de iodo = 730 mg I₂ /g CAP, tenor máximo de grises = 12%, número máximo de fenol = 3,0 g/L, masa específica aparente = 0,35 a 0,65 g/cm³.
- Aparato para medir Carbono Orgánico Total – COT, modelo TOC – 5000 A marca Shimadzu.
- Sulfato de aluminio comercial.
- pH-metro modelo E-520, marca Metrohm Herisau.
- Espectrofotómetro DR-2000, marca Hach.
- Turbidímetro modelo 2100-P marca Hach.

La muestra de agua cruda se obtuvo en uno de los cuerpos de agua que abastece el municipio de San Carlos (SP, Brasil), y posteriormente se le adicionó el herbicida. Para conocer la cantidad de Diuron aplicada, en términos de carbono orgánico total, se realizó la medida de COT en el agua cruda antes y después de agregar el producto. La diferencia en la cantidad de COT está relacionada con la presencia del Diuron.

El estudio se dividió en cuatro ensayos, cuyas técnicas de tratamiento se muestran a continuación:

Ensayo 1: Coagulación, Floculación, Flotación y Filtración.

Ensayo 2: Aplicación de CAP, Coagulación, Floculación, Flotación y Filtración.

Ensayo 3: Ozonización, Coagulación, Floculación, Flotación y Filtración.

Ensayo 4: Ozonización, aplicación de CAP, Coagulación, Floculación, Flotación y Filtración.

9.3.2. Flotación

El agua de la cámara de saturación fue sometida a una presión de 4 atm cerca de 10 minutos y la recirculación de agua en la columna de flotación fue del 10%. A través de un orificio situado a 0,15 m de la base de la columna se retiró la muestra para análisis luego de 3 min, correspondiendo por lo tanto, la velocidad de flotación de 5,0 cm/min.

9.3.3. Coagulación

La coagulación se produjo durante la mezcla rápida realizándose en la propia columna de flotación con la adición de sulfato de aluminio comercial con una dosis de 35 mg/l. La muestra de agua de estudio se agitó durante 60 segundos (tiempo de mezcla rápida) con una velocidad de rotación de 270 rpm (rotaciones por minuto).

9.3.4. Floculación

La floculación también se realizó en la columna de flotación durante 10 minutos, con una velocidad de rotación de 50 rpm.

9.3.5. Filtración

Parte del agua retirada de la columna de flotación se pasó por filtro de papel Whatman 40, el cual se utiliza en laboratorio para simular la filtración que tiene lugar en una unidad de filtración directa de una planta de tratamiento de agua.

9.3.6. Ozonización

La capacidad de generación de ozono se situó próxima a 100 mgO₃/h. En cada ensayo, un volumen de 550 ml de la muestra del agua en estudio se ozonizó durante 10 minutos, habiéndose aplicado una dosis del orden de 5 mgO₃/L.

9.3.7. Aplicación de CAP

La dosis de CAP utilizado en el agua en estudio, colocado en la cámara de flotación, fue de 30 mg/l, siendo el tiempo de mezcla igual a 1 min, con una velocidad de rotación igual a 270 rpm.

9.3.8. Procedimientos de los Ensayos

A continuación se describe el proceso de un ensayo completo:

- Ozonización de la muestra durante 10 min.
- Llenado del frasco del reactor estático (550 ml) con agua ozonizada.
- Accionamiento del equipo de agitación de modo de alcanzar la velocidad de rotación correspondiente a la mezcla rápida.
- Aplicación de la suspensión del CAP, manteniendo la agitación rápida por 60 s.
- Ajuste del pH de coagulación con suspensión de cal (cuando fuese necesario), 30 segundos luego de la adición del CAP.
- Aplicación del coagulante, con tiempo de mezcla rápida igual a 60 s, luego de la mezcla del CAP.
- Reducción de la velocidad de rotación del agitador para realizar la floculación.
- Transcurrido el tiempo de floculación, se desconecta el agitador, se levanta el eje del mismo y se introduce el agua presurizada en la cámara de flotación, de modo de promover la flotación del agua. La cantidad de agua introducida es función de la relación de recirculación (en este caso, igual a 10%).
- Obtención de la muestra de agua flotada (en este caso, velocidad de flotación de aproximadamente 5 cm/min), realizándose las lecturas de los parámetros correspondientes.
- Filtración del agua flotada en papel de filtro Whatman 40 y lectura de los parámetros correspondientes.

Los parámetros analizados fueron: COT, turbiedad y color aparente de las muestras del subnadante y de los filtros.

9.4. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos del agua se muestran en la **Tabla 17**.

pH	6,6
Turbiedad (UT)	16,0
Color aparente (UC)	88
Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)	10
Carbono orgánico total (mg/l)	6,88

Tabla 17. Características del agua en estudio

En la **Tabla 18** se muestran los resultados obtenidos en el Ensayo 1. Sólo para obtener datos comparativos se realizó paralelamente un ensayo de sedimentación con el agua floculada.

Los resultados obtenidos muestran una mejor eficiencia de la flotación. Sin embargo, conviene destacar que para cada tecnología hay que realizar un estudio de optimización de los parámetros de mezcla rápida y floculación, tales como dosis de coagulante, pH de coagulación, tiempo y gradiente de velocidad de la mezcla rápida y tiempo y gradiente de velocidad de floculación, para entonces establecer comparaciones entre las eficiencias de remoción de cada una.

Parámetro	Agua decantada	Agua flotada	Agua filtrada
COT (mg/l)	-	-	6,88
Turbiedad remanente (UT)	10,7	4,0	0,32
Color aparente remanente (UC)	59	31	7,0

Tabla 18. Resultados del Ensayo 1 (Coagulación, floculación, flotación y filtración)

En la **Tabla 19**, **Tabla 20** y **Tabla 21** se presentan los resultados del Ensayo 2, Ensayo 3 y Ensayo 4 respectivamente.

Parámetro	Agua flotada	Agua filtrada
COT (mg/l)	-	2,51
Turbiedad remanente (UT)	4,50	0,30
Color aparente remanente (UC)	42	6,0

Tabla 19. Resultados del Ensayo 2 (Aplicación de CAP, coagulación, floculación, flotación y filtración)

Parámetro	Agua flotada	Agua filtrada
COT (mg/l)	-	3,32
Turbiedad remanente (UT)	3,9	0,67
Color aparente remanente (UC)	31	8,0

Tabla 20. Resultados del Ensayo 3 (Ozonización, coagulación, floculación, flotación y filtración)

Parámetro	Agua flotada	Agua filtrada
COT (mg/l)	-	1,20
Turbiedad remanente (UT)	5,4	0,4
Color aparente remanente (UC)	49	4,0

Tabla 21. Resultados del Ensayo 4 (Ozonización, aplicación de CAP, coagulación, floculación, flotación y filtración)

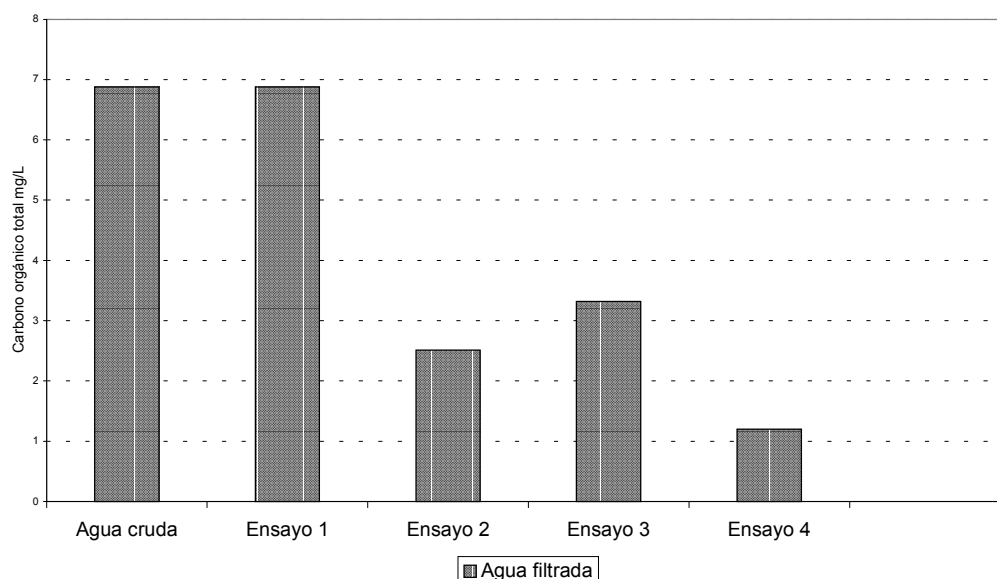


Figura 5. Resultados de los análisis de carbono orgánico total efectuados en el agua filtrada obtenida en los diferentes ensayos

De acuerdo al resultado del Ensayo 1, se observa que la coagulación y la floculación no fueron eficientes en la reducción del COT. Comparando los valores obtenidos en los Ensayos 2 y 3, se percibe que la aplicación del CAP tuvo un desempeño mejor que la ozonización, cuando se ejecutaron separadamente, pues el CAP absorbe la materia orgánica removiéndola, mientras que la aplicación de ozono transforma moléculas complejas en moléculas más simples para ser removidas posteriormente.

Finalmente en el Ensayo 4, en el cual se aplicaron todas las técnicas en conjunto, resultó el menor valor del COT. La **Figura 5** contiene los datos del COT del filtrado en ordenadas para cada ensayo realizado, incluyendo el agua de estudio. Como se puede observar, solamente en el ensayo 4, realizado con ozonización, aplicación de CAP, coagulación, floculación, flotación y filtración se consiguió un tenor del COT inferior a 2 mg/l, valor máximo adoptado por Di Bernardo en el agua tratada.

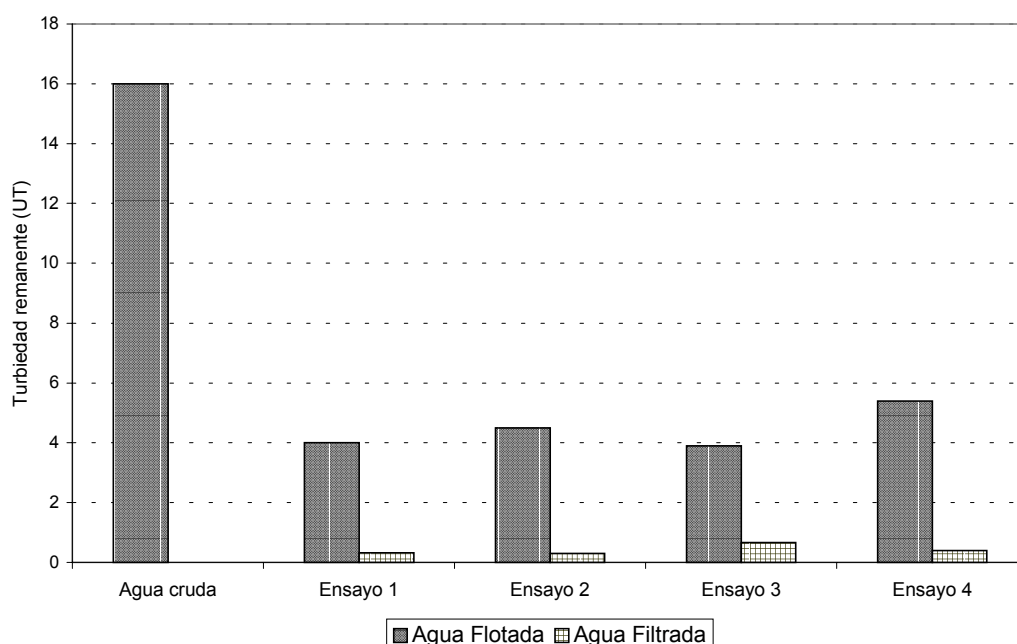


Figura 6. Turbiedad de los subnadales y de los filtrados obtenidos en los diferentes ensayos

Se observa en la **Figura 6**, la cual presenta datos de turbiedad de los subnadales después de la flotación en los diferentes ensayos, que la turbiedad de los subnadales obtenidos fue menor en los Ensayos 1 y 3, en los cuales no hubo adición del CAP. En los Ensayos 2 y 4, el aumento de la turbiedad fue consecuencia del uso del CAP y en todos los ensayos, se observó que la filtración contribuyó significativamente a la disminución de la turbiedad remanente. En todos los ensayos la turbiedad remanente en el agua filtrada fue inferior a 1,0 UT.

Analizando los valores de color aparente del agua flotada conforme a la **Figura 7**, se observa que el color aparente también, fue menor en los Ensayos 1 y 3, justamente en aquellos ensayos en donde no se adicionó el CAP. En el agua filtrada, los Ensayos 2 y 4 presentaron valores menores a este parámetro. En base a esos datos, se puede afirmar que la remoción del CAP introducido en el agua se realiza en los filtros, siendo indispensable la utilización de estos seguidamente en la flotación.

Solamente el agua filtrada del Ensayo 4 presentó color aparente remanente inferior a 5 UC, valor máximo de este parámetro en la Norma de Calidad de Agua Potable en Brasil.

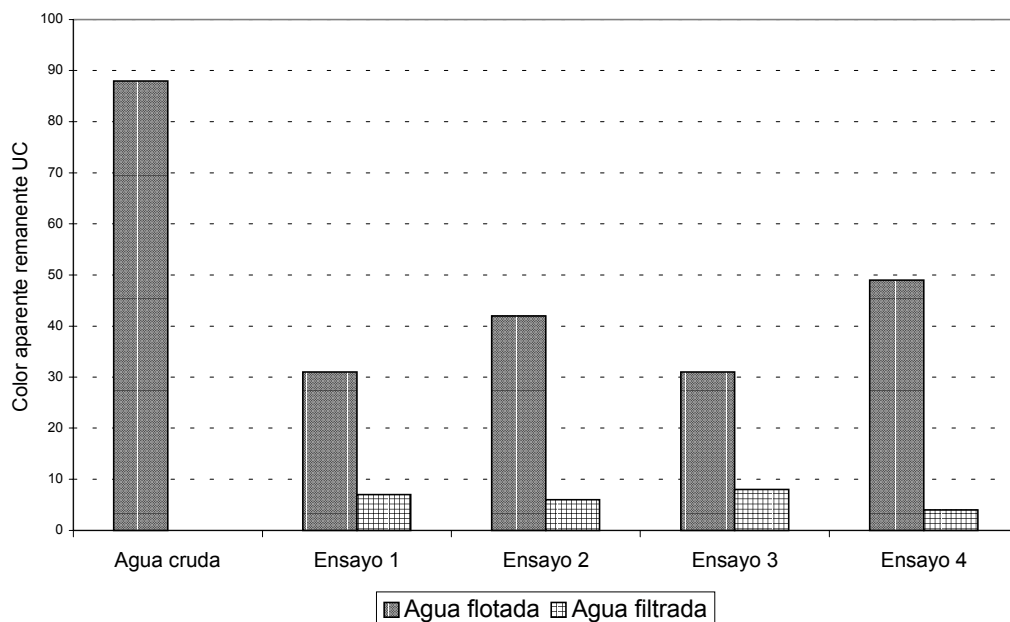


Figura 7. Color aparente de los subnadaantes o agua flotada y de los filtrados obtenidos en los diferentes ensayos

10. EMPLEO DE LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO PARA REMOCIÓN DE COLOR

En un trabajo reciente realizado por Reali y Goularte (1996), se verificó la influencia de la floculación sobre la flotación por aire disuelto, utilizando una instalación integrada por reactores estáticos, como se muestra en la **Figura 8**.

Los autores utilizaron agua preparada en laboratorio con las siguientes características:

- Color aparente = 84 a 99 UC.
- Color verdadero = 43 a 61 UC.
- Turbiedad = 6 a 8 UT.
- Alcalinidad = 26 a 30 mg CaCO₃/l.
- Conductividad eléctrica = 50 a 60 µS/cm.
- Temperatura = 25,3 ± 1,9 °C.

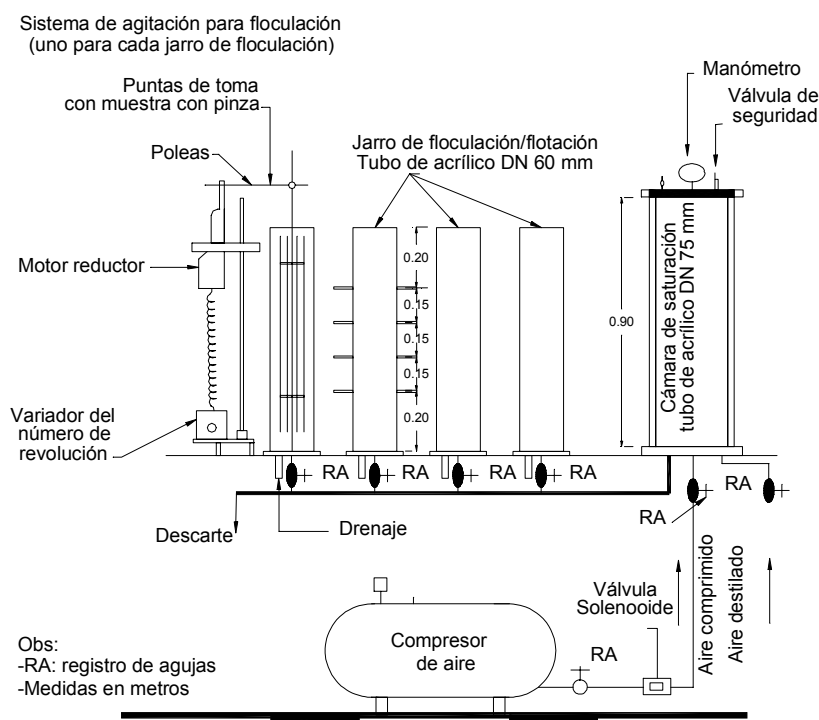


Figura 8. Instalación piloto de reactores estáticos (Reali y Goularte, 1996)

Los ensayos se realizaron en cuatro etapas, a saber:

Primera etapa:

Los ensayos tuvieron como objetivo la optimización de las dosis de coagulante y del pH de coagulación. Se utilizaron dosis de sulfato de aluminio (DSA) de 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 e 70 mg/l para pH de coagulación entre 5,5 e 7,5.

Los demás parámetros operacionales se mantuvieron constantes siendo: gradiente medio de velocidad de la mezcla rápida (G_{mr}) = 1100 s^{-1} , tiempo de la mezcla rápida (t_{mr}) = 20 s, gradiente medio de velocidad en la floculación (G_f) = 31 s^{-1} , tiempo de floculación (t_f) = 15 min, fracción de recirculación = 8% (en volumen), presión de saturación = 456 kPa y velocidad de flotación (U_F) = 31,6; 13,3; 6,7 y 2,9 cm/min (en cada ensayo se obtuvieron 4 muestras en diferentes momentos).

Segunda etapa:

La fracción de recirculación varió de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 % en volumen, con el objetivo de investigar la mejor cantidad de aire provista para la flotación. En esta etapa se utilizó DSA (dosis de sulfato de aluminio) = 40 mg/l, pH de coagulación = $6,3 \pm 0,1$ y U_F de 31,6; 13,3; 6,7; 4,0 y 2,9 cm/min. Los demás parámetros operacionales se mantuvieron constantes e iguales a los utilizados en la primera etapa.

Tercera etapa:

En esta oportunidad se buscó optimizar las condiciones de mezcla rápida en términos del gradiente medio de velocidad y tiempo. Los ensayos se realizaron para t_{mr} de 10, 20, 30 y 40 s y G_{mr} de 600, 700, 800, 900, 1000 y 1100 s^{-1} . Las muestras se obtuvieron para U_F de 21,8 y 13,3 cm/min. La fracción de recirculación utilizada fue del 8%. Los otros parámetros operacionales se mantuvieron constantes e iguales a los aplicados en la segunda etapa.

Cuarta etapa:

Los ensayos se efectuaron con la finalidad de adecuar el tiempo y el gradiente medio de velocidad de floculación con vista a la flotación. Se muestrearon t_f de 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 30 min y G_f de 20, 40, 60, 80 y 100 s^{-1} . Para t_f de 2 min, además de los G_f mencionados, se realizaron ensayos con G_f de 120, 140 y 160 s^{-1} . Los otros parámetros se mantuvieron constantes siendo: DSA = 40 mg/l, pH de coagulación = $6,37 \pm 0,13$, t_{mr} = 10 s, G_{mr} = 1000 s^{-1} , U_F = 21 y 10,4 cm/min, fracción de recirculación = 8% y presión de saturación = 456 kPa. A continuación se presentan los principales resultados obtenidos por los investigadores.

Dosis de coagulante y pH de coagulación:

En la **Figura 9** se presentan las curvas de color aparente remanente en función del pH de coagulación para DSA de 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 y 70 mg/l y para diferentes valores de U_F . Las muestras se obtuvieron para cuatro valores de U_F .

Las curvas para U_{F1} = 31,6 cm/min (455 m/d) ayudaron a un análisis global de los resultados y aunque se trata de una velocidad relativamente alta, se obtuvo color aparente remanente de aproximadamente 28% para DSA = 60 mg/l y pH = 6,23.

Para $U_{F2} = 13,3 \text{ cm/min}$ ($\cong 191 \text{ m/d}$) los menores valores de color aparente remanente (8 a 9%) o sea, mayor eficiencia de remoción, (91-92%) se obtuvieron para DSA de 40, 50 y 60 mg/l, con los respectivos valores de pH de 6,26; 6,22 y 6,23, siendo prácticamente equivalentes.

Las curvas de $U_{F3} = 6,7 \text{ cm/min}$ ($\cong 96 \text{ m/d}$) muestran el menor valor de color aparente remanente (3%) o sea, la mayor eficiencia en remoción de color aparente (97%) para DSA = 40 mg/l y pH = 6,26.

Para todas las DSA estudiadas, los resultados obtenidos para $U_{F4} = 2,9 \text{ cm/min}$ ($\cong 42 \text{ m/d}$) fueron bastante similares a los resultados obtenidos para $U_{F3} = 6,7 \text{ cm/min}$. El menor valor de color aparente remanente (3%) o sea, la mayor eficiencia de remoción obtenida de color aparente (97% para DSA = 40 mg/l con pH = 6,26 y DSA = 50 mg/l con pH = 6,22) fue igual a la mayor eficiencia obtenida para $U_{F3} = 6,7 \text{ cm/min}$.

Analizando las curvas presentadas en la **Figura 9**, o sea considerando el consumo de coagulante, velocidad de flotación, reflejándose ésta en la carga superficial (en el caso de una unidad de flotación por aire disuelto en escala real) y eficiencia de remoción obtenida, es posible elegir como dosis y pH óptimos la dosis de sulfato de aluminio de 40 mg/l para pH de coagulación de 6,26. Se observa que, para algunos valores de pH de coagulación, el color aparente remanente resultó superior a 100 % (o sea, mayor que el valor inicial). Esto ocurre debido al coagulante adicionado y a la ineficiencia de coagulación y de la floculación y consecuentemente, de la flotación.

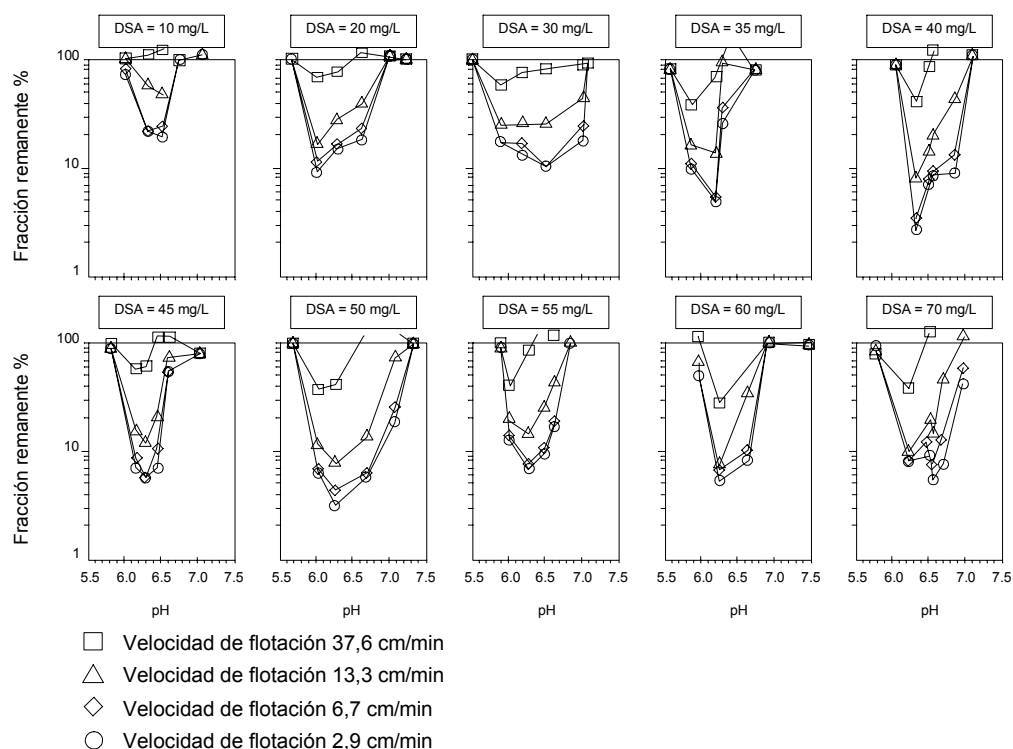


Figura 9. Color aparente remanente en función del pH de coagulación para diferentes dosis de sulfato de aluminio y velocidades de flotación (Reali y Goularte, 1996). Las características del ensayo fueron: temperatura del agua = $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$; relación de recirculación = 8%; presión en la cámara de saturación = 441 kPa

Fracción o relación de recirculación:

Los resultados obtenidos con la variación de la cantidad de aire entregada, la cual en esta investigación se efectuó mediante la variación de la fracción de recirculación, se presentan en la **Figura 10**. Esta Figura muestra la fracción remanente de color aparente y turbiedad en función de la velocidad de flotación para fracciones de recirculación de 2, 4, 6, 8, 10 y 12% (en volumen).

Se observa, en las curvas presentadas en la **Figura 10**, que los menores valores de la fracción remanente de color aparente y turbiedad ($\geq 15\%$) o sea, las mayores eficiencias de remoción ($\geq 85\%$ para U_F hasta 13,3 cm/min ó 191 m/d) se obtuvieron para una fracción de recirculación del 8% y 10%. En tanto, el 8% de recirculación presentó mayor eficiencia de remoción (46% para color aparente) para $U_F = 31,6$ cm/min, comparándose esta velocidad de flotación con la fracción de recirculación del 10% (13% de remoción de color aparente). Otra vez se observa que, para algunas velocidades de recirculación, la fracción del color aparente y de la turbiedad remanente resultaron superiores a 100 % (o sea, mayor que el valor inicial). Esto ocurre debido al coagulante adicionado y a la ineficiencia de la coagulación y de la floculación y consecuentemente de la flotación.

De esta forma, ante los resultados presentados en la **Figura 10** se concluye que para las condiciones de ensayo, la fracción de recirculación del 8% presentó los mejores resultados en términos de remoción de color aparente y turbiedad.

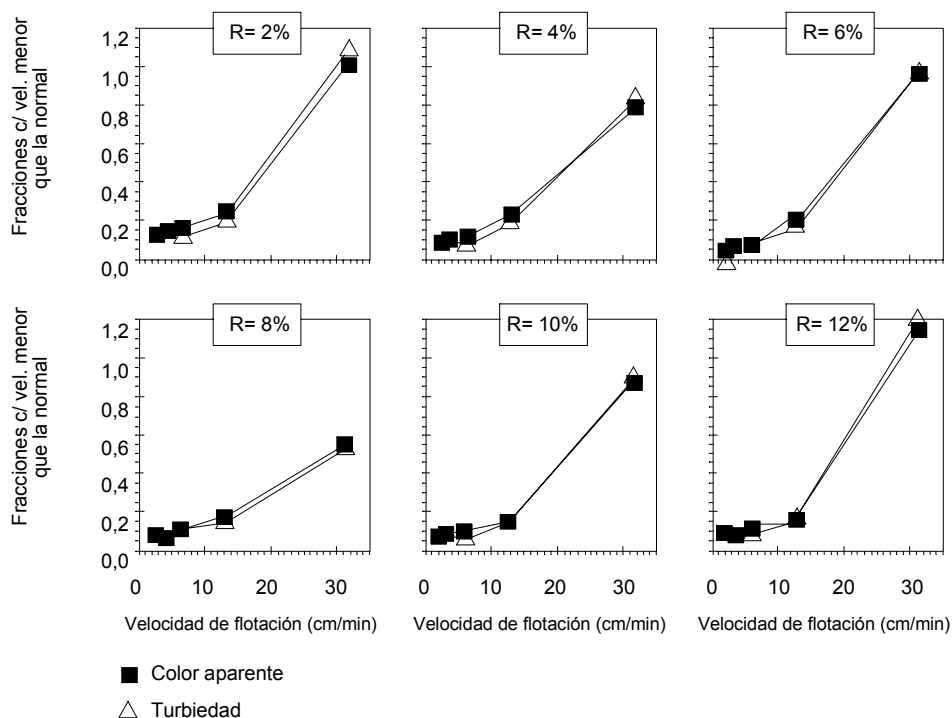


Figura 10. Fracción remanente de color aparente y turbiedad en función de la velocidad de flotación para diferentes relaciones de recirculación (porcentual en volumen) (Reali y Goularte, 1996). Las características de los ensayos fueron:

DSA = 40 mg/l; $pH_{coag} = 6,3$; presión en la cámara de saturación = 441 kPa;
temperatura del agua = 25 ± 1 °C

Mezcla rápida:

En la **Figura 11** se presentan los resultados de los ensayos en los cuales se varió el tiempo y el gradiente medio de velocidad de la mezcla rápida. Los resultados representan la fracción remanente de color aparente y de turbiedad para U_F de 21,8 y 13,3 cm/min ($\cong 314$ y 191 m/d, respectivamente).

La velocidad de flotación de 21,8 cm/min demostró ser de gran importancia, ya que los resultados de eficiencia de remoción de color aparente y turbiedad obtenidos para $U_F = 13,3$ cm/min se mantuvieron próximos unos de otros (la mayoría entre 6 y 12%, o sea, remoción de 88 y 94 %), lo que no dejaría muy claras las implicancias de los factores estudiados (t_{mr} y G_{mr}).

Dentro de los valores de G_{mr} estudiados, el valor de $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ presentó los menores valores de la fracción remanente o sea, las mejores eficiencias de remoción tanto de color aparente ($\geq 84\%$ para $U_F = 21,8$ cm/min) como para la turbiedad ($\geq 79\%$ para $U_F = 21,8$ cm/min) para los cuatro valores de t_{mr} estudiados.

En función de ello y de acuerdo con la tendencia de las curvas de eficiencias obtenidas, es posible concluir que para $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ con $t_{mr} = 10 \text{ s}$ se obtuvo un óptimo desempeño, llegándose a una fracción remanente del 10% para color aparente (remoción del 90%) y 14% para turbiedad (remoción de 86%) para una U_F de 21,8 cm/min.

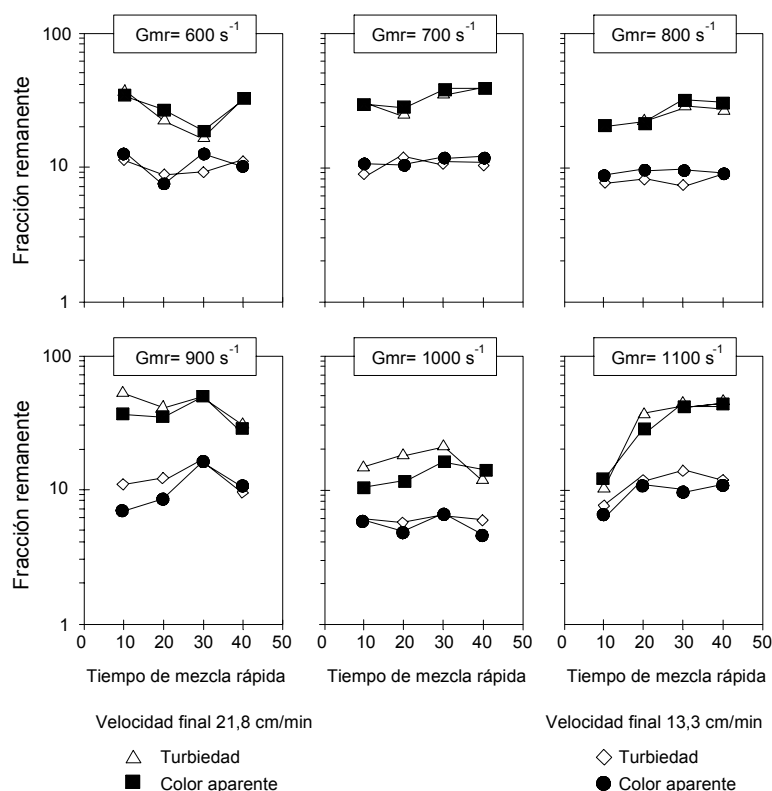


Figura 11. Fracción remanente de color aparente y turbiedad en función del tiempo de mezcla rápida para velocidades de flotación de $U_{F1} = 21,8 \text{ cm/min}$ y $U_{F2} = 13,3 \text{ cm/min}$ y para diferentes valores de gradiente medio de velocidad de mezcla rápida – Características de los ensayos: DSA = 40 mg/l; R = 8%; presión de saturación = 441 kPa; Temperatura del agua = $25 \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Floculación:

En la **Figura 12** se muestran los resultados obtenidos a partir de ensayos realizados buscando la adecuación del tiempo y del gradiente medio de velocidad de floculación.

Se presentan las curvas de valores remanentes de color aparente y turbiedad para U_F de 21 y 10,4 cm/min ($\cong 302$ y 150 m/d, respectivamente) y t_f de 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 y 30 minutos.

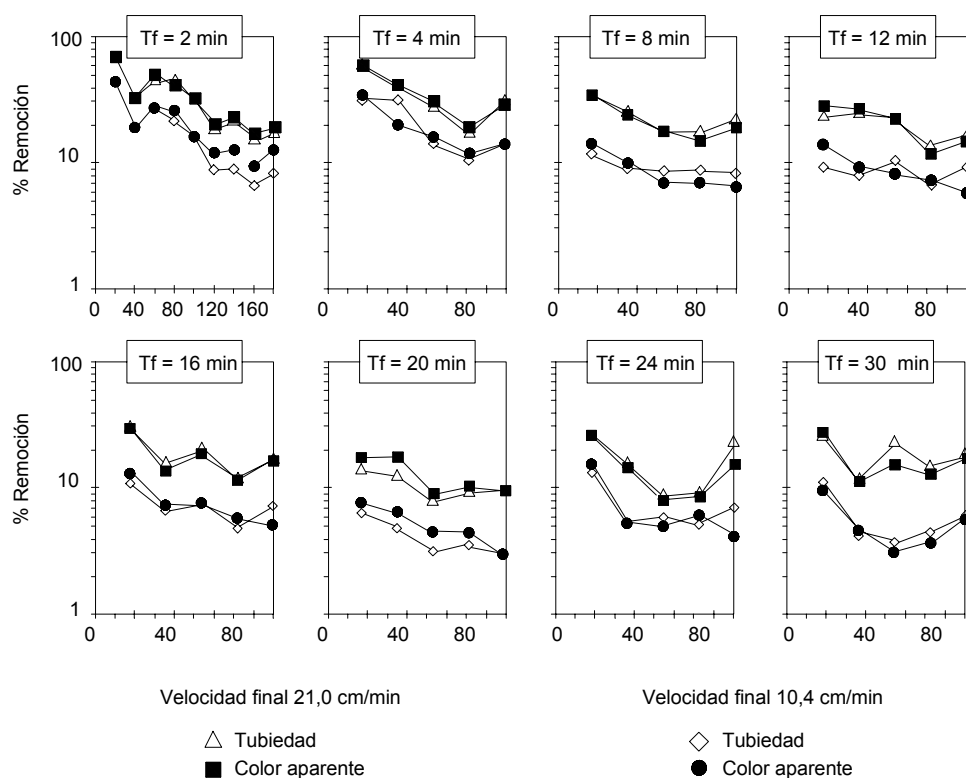


Figura 12. Color aparente y turbiedad remanente en función del gradiente medio de velocidad de floculación para diferentes tiempos de floculación y velocidad de flotación de $U_{F1} = 21,0$ y $U_{F2} = 10,4$ cm/min para las siguientes condiciones: DSA = 40 mg/l, pH de coagulación = $6,36 \pm 0,13$, presión de saturación = 441 kPa, fracción de recirculación = 8%, temperatura del agua: $25,0 \pm 1,4$ °C

En la **Tabla 22** se muestran los valores óptimos de gradiente de velocidad medio en la floculación (G_{op}) para cada uno de los tiempos estudiados y respectivas eficiencias de remoción de color y turbiedad para velocidad de flotación de 302 m/d.

Tiempo de floculación (min)	2	4	8	12	16	20	24	30
$G_{op} (s^{-1})$	160	80	80	80	80	60	60	40
% Remoción del color aparente	82	82	86	88	84	90	91	88
% Remoción de la Turbiedad	84	84	83	86	83	92	91	87

Tabla 22. Gradiente medio de velocidad óptima (G_{op}) para cada tiempo de floculación investigado y valores respectivos de eficiencia de remoción del color aparente y turbiedad, para velocidad de flotación de 21 cm/min (302 m/d)

En base a las informaciones obtenidas en la **Tabla 22** y **Figura 12**, se observa que el tiempo de floculación de 20 min, con G_{op} de $60 s^{-1}$, de la misma forma que el tiempo de 24 min con G_{op} de $60 s^{-1}$, arrojaron los mejores resultados de remoción de color aparente y turbiedad (en la faja de 90 al 91% de remoción de color aparente y 91 a 92% de remoción de turbiedad, para U_F de 302 m/d).

Por otro lado, en base a la **Figura 12**, se observa que el tiempo de floculación de 20 min con G_{op} de $60 s^{-1}$, para U_F de 150 m/d arrojó resultados mejores (5% de color aparente remanente o 95% de remoción de color aparente y 3,2% de turbiedad remanente o 96,8% de remoción de turbiedad) que aquéllos referentes al tiempo de 24 min con G_{op} de $60 s^{-1}$ (94,5% de remoción de color aparente y 94% de remoción de turbiedad).

De este modo con el tiempo de 20 min y G_{op} de $60 s^{-1}$, se obtuvieron los mejores resultados para el agua en cuestión. Se verificó que, con un tiempo de floculación de apenas 12 min y G_{op} de $80 s^{-1}$, se obtuvieron resultados muy buenos de remoción de color y turbiedad (88% y 86% respectivamente para, U_F de 302 m/d y 93% y 94%, respectivamente para U_F de 150 m/d).

Asimismo para el tiempo de floculación de 8 min con G_{op} de $80 s^{-1}$, se obtuvo una eficiencia razonable de flotación (93% de remoción de color y 91% de turbiedad para $U_F = 150$ m/d). Esto demuestra que la flotación fue capaz de operar con buena eficiencia para tiempos de floculación menores que los exigidos para la sedimentación (ensayos adicionales fueron realizados para comparar la sedimentación con la flotación, cuyos datos no son presentados), desde que se elevó el nivel de agitación (G_t), o sea que la flotación no requirió formación de flóculos grandes, presentando un buen desempeño en la remoción de flóculos más compactos.

En base al trabajo realizado los autores concluyeron que:

- La dosis óptima de sulfato de aluminio encontrada fue de 40 mg/l para pH de coagulación de 6,26, presentando eficiencia de remoción de color aparente igual o superior al 91% para: velocidad de flotación hasta 13,3 cm/min (\cong 191 m/d), fracción de recirculación del 8% y presión de saturación de 456 kPa.
- Comparando con las demás recirculaciones estudiadas, la fracción de recirculación del 8% con presión de saturación de 456 kPa produjo mejores resultados en relación a la remoción de color aparente y turbiedad, llegándose al 90% de la eficiencia de

remoción para: $U_F = 6,7 \text{ cm/min}$ ($\cong 96 \text{ m/d}$), $DSA = 40 \text{ mg/l}$ y pH de coagulación = 6,39.

- Para $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ con $t_{mr} = 10 \text{ s}$ se obtuvieron óptimos resultados, alcanzándose la eficiencia de remoción de color aparente del 90% y turbiedad del 86% para: $U_F = 21,8 \text{ cm/min}$ ($\cong 314 \text{ m/d}$), $DSA = 40 \text{ mg/l}$, pH de coagulación = 6,36, fracción de recirculación del 8% y presión de saturación = 456 kPa.
- Para el tipo de agua estudiada, el tiempo de floculación de 20 min con G_{op} de 60 s^{-1} proporcionó la mayor eficiencia de remoción de color aparente y turbiedad. Por otro lado, los resultados demostraron que la flotación operó bien con flóculos menores que aquéllos normalmente requeridos para la sedimentación, habiendo presentado buena eficiencia de remoción de color aparente (93%) para 12 min de floculación con G_{op} de 80 s^{-1} y U_F de 150 m/d.

11. EJEMPLO

Dimensionamiento de una instalación de Flotación – Filtración para un caudal $Q = 50 \text{ L/s}$

1) Caracterización del Agua a Tratar

- Color aparente = 85 a 100 UC
- Color verdadero = 40 a 60 UC
- Turbiedad = 6 a 8 UT
- Alcalinidad = 25 a 30 mgCaCO_3/l
- Conductividad eléctrica = 50 a 60 $\mu \text{ S/cm}$
- Temperatura = 20 a 30°C

2) Estudios de Tratabilidad

Los ensayos de tratabilidad se realizaron en una instalación piloto de escurrimiento continuo, habiéndose obtenido los siguientes parámetros optimizados:

Coagulación: dosis de sulfato de aluminio = 35 a 45 mg/l con $\text{pH}_{\text{coag}} = 6,15$ a 6,45.

Mezcla rápida: gradiente medio de velocidad $G_{\text{mr}} = 1.000 \text{ s}^{-1}$ con tiempo de agitación $t_{\text{mr}} = 15 \text{ s}$.

Floculación: gradiente medio de velocidad $g_{\text{mf}} = 60 \text{ s}^{-1}$ con tiempo de agitación $t_f = 15$ a 20 min.

Cámara de presurización: fracción de recirculación $R = 8$ a 15%, con presión de saturación $p_s = 400$ a 500 kPa, t_p tiempo medio de detención = 3 a 5 min.

U_F = velocidad de flotación: 8 a 17 cm/min (la eficiencia es prácticamente la misma).

r : relación peso aire/volumen de agua tratada: entre 6 y 10 g/m^3

3) Descripción General del Sistema de Flotación - Filtración

Se utilizará un sistema de Flotación – Filtración semejante al que se muestra en la **Figura 3** que consiste, básicamente de:

- 1 unidad de mezcla rápida mecanizada.

- 1 unidad de floculación constituida por 4 cámaras de floculación mecanizadas en serie.
- 4 unidades en donde se desarrollan la flotación y la filtración.
- Un dispositivo de recirculación y presurización.

4) Consideración General sobre el Método de Flotación – Filtración

Como la eficiencia de la flotación alcanzó cerca del 90% para la velocidad de flotación de 8 a 17 cm/min (115 a 245 m/d), se puede admitir que la velocidad de filtración también varió en ese intervalo, adoptándose el método de filtración con velocidad declinante variable, eliminándose la necesidad de un dispositivo de control de nivel o de caudal en cada filtro.

La extracción del material flotante se efectuará por lavado de un filtro cualquiera de la batería. En la **Figura 18** se muestran los esquemas de una unidad de Flotación – Filtración.

5) Dimensionamiento del Sistema

• Unidad de Mezcla Rápida

Los datos optimizados se obtuvieron de una instalación piloto de escurrimiento continuo. Para compensar posibles cortocircuitos, el tiempo medio de retención adoptada es de $t_{mr} = 15$ s aproximadamente.

Dimensiones y volumen útil

$L = 0,80$ m = lado de la base cuadrada del mezclador

$H = 1,20$ m = altura líquida

$V = L \cdot L \cdot H = 0,768$ m³ = volumen líquido

Potencia consumida y del motor

La potencia consumida es la necesaria en el eje del mezclador para producir el gradiente requerido, la potencia atribuida al motor se incrementa teniendo en cuenta su rendimiento y simultáneamente seleccionar un equipo normatizado.

Resulta:

$$P = \mu \cdot V \cdot G^2 = 768 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 768 \text{ W} = 1,045 \text{ CV} = \text{potencia consumida}$$

Siendo:

$$\mu = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = \text{viscosidad dinámica, para } T = 20^\circ\text{C} = \text{temperatura del agua}$$

$G_{mr} = 1.000 \text{ s}^{-1} = \text{gradiente de velocidad}$

$V = 0,768 \text{ m}^3 = \text{volumen líquido}$

$P_m = 2 \text{ CV} = \text{potencia del motor}$

Velocidad de rotación del mezclador

$$P = \rho \cdot K \cdot D_1^5 \cdot n^3$$

donde:

P = potencia consumida (N m/s)

$K = 5$ = coeficiente para el tipo de turbina adoptada

$D_1 = 0,25 \text{ m}$ = diámetro de la turbina proyectada

$\rho = 998 \text{ Kg/m}^3$ = masa específica del agua a 20°C

En consecuencia:

$$n = \left[P / (\rho \cdot K \cdot D_1^5) \right]^{1/3} = 5,39 \text{ rps} = 323 \text{ rpm} = \text{velocidad del mezclador}$$

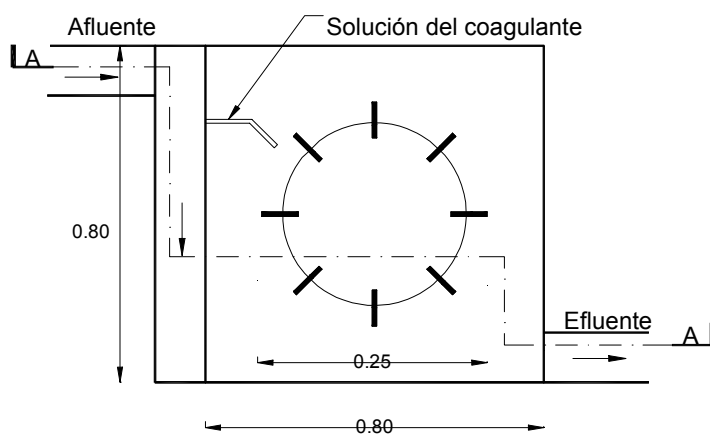


Figura 13. Planta de la unidad de mezcla rápida

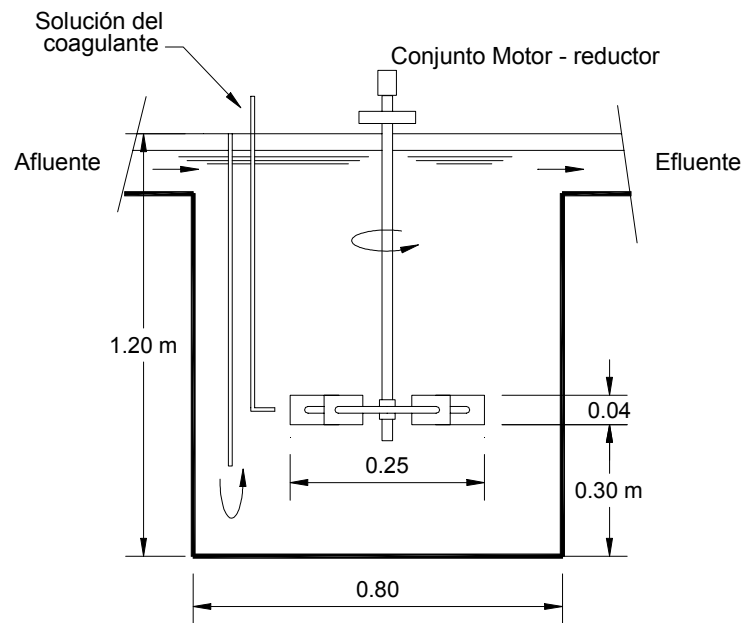


Figura 14. Corte A-A de la unidad de mezcla rápida

- **Unidad de Floculación**

Característica de la Unidad

Se compondrá de cuatro cámaras en serie dimensionadas para un tiempo medio total de detención $t_f = 20$ min, teniendo en cuenta que los datos optimizados se obtuvieron en una instalación piloto de escurrimiento continuo.

Dimensiones y volumen útil

$L = 2,20$ m = lado de la base cuadrada del mezclador

$H = 3,10$ m = altura líquida útil

$V = L \cdot H = 15,00$ m³ = volumen líquido de cada cámara

Potencia consumida y del motor

$$P = \mu \cdot V \cdot G^2 = 54 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 54 \text{ W} = 0,0735 \text{ CV} = \text{potencia consumida}$$

siendo:

$\mu = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ = viscosidad dinámica para $T = 20^\circ\text{C}$ = temperatura del agua

$G_f = 60 \text{ s}^{-1}$ = gradiente de velocidad adoptada

$V = 15,00$ m³ = volumen líquido

$P_m = 1/6 \text{ CV} = \text{potencia del motor}$

Tipo del equipo floculador adoptado

Teniendo en cuenta que el gradiente de velocidad optimizado tiene resultados relativamente elevados, es conveniente adoptar un equipo floculador del tipo turbina, aplicando la siguiente expresión:

$P = K_{tb} \cdot \rho \cdot D_{tb}^5 \cdot n^3 = 54 \text{ N} \cdot \text{m/s} = \text{potencia consumida, donde:}$

$K_{tb} = 1,3 = \text{coeficiente para el tipo de turbina adoptada}$

$\rho = 998 \text{ Kg/m}^3 = \text{peso específico del agua a } 20^\circ\text{C}$

$D_{tb} = 0,80 \text{ m} = \text{diámetro de la turbina}$

En consecuencia:

$n = \left[P / (K \cdot \rho \cdot D_{tb}^5) \right]^{1/3} = 0,5 \text{ rps} = 30 \text{ rpm} = \text{velocidad de rotación de cada floculador}$

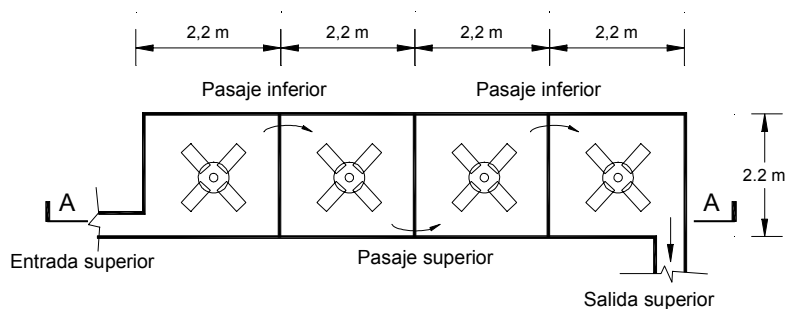


Figura 15. Esquema de planta de la batería de floculadores

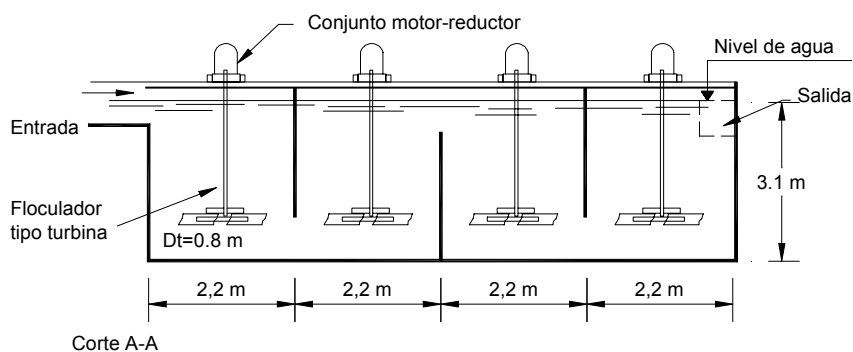


Figura 16. Esquema de corte A-A de la batería de floculadores

• **Unidad de Filtración – Flotación**

Número de Unidades: $N = 4$

Velocidad de filtración

La velocidad media de filtración será del orden de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

En un sistema de filtración con velocidad declinante con 4 unidades, efectuando cálculos con el método de Di Bernardo (ver Capítulo VII-11 Control de los Filtros Rápidos de la Fundamentación de las Normas), resultan velocidades entre 140 y $260 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. En esas condiciones el caudal máximo de filtración $Q_{f\text{máx}} = 22 \text{ l/s} = 1900,8 \text{ m}^3/\text{d}$ corresponde al filtro recién lavado de la batería y el caudal mínimo $Q_{f\text{mín}} = 12 \text{ l/s} = 1036,8 \text{ m}^3/\text{s}$ para el filtro más sucio.

Considerando el caudal de recirculación $Q_r = 1,8 \text{ l/s} = 108 \text{ l/min}$, corresponde el $1,8 / 22 = 0,0818 \approx 8,2 \%$ del caudal del filtro limpio y $1,8 / 12 = 0,15 = 15\%$ del correspondiente al filtro sucio

Caudal afluente al sistema de flotación – filtración

Para $N = 4$ = número de unidades de flotación-filtración, el caudal total afluente al sistema que incluye el de diseño de 50 L/s y el de recirculación de $4 \cdot 1,8 \text{ l/s}$, es:

$$Q_a = 50 + 4 \cdot 1,8 = 57,2 \text{ l/s} = 3432 \text{ l/min}.$$

Dimensiones

$L = 3,50 \text{ m}$ = longitud de la cámara de filtración de cada unidad

$B = 2,00 \text{ m}$ = ancho de la cámara de filtración de cada unidad

$A_f = L \cdot B = 7,00 \text{ m}^2$ = área de cada cámara de filtración

$b = 0,60 \text{ m}$ = ancho del canal de descarga interno del filtro

$e = 0,15 \text{ m}$ = espesor de la pared interna de la cámara

$A_F = L (b + e + B) = 9,60 \text{ m}^2$ = área de la cámara de flotación

Velocidad de la flotación

$$U_{F \text{ máx}} = Q_{f \text{ máx}} / A_F = 1900,8 / 9,60 = 198,00 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{d} = 13,75 \text{ cm} / \text{min} = \text{velocidad máxima de flotación}$$

$$U_{F \text{ mín}} = Q_{f \text{ mín}} / A_F = 1036,8 / 9,60 = 108,00 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{d} = 7,50 \text{ cm} / \text{min} = \text{velocidad mínima de flotación}$$

Unidad de recirculación

Flujo de aire = $F_a = Q \cdot r = 0,050 \cdot 8 = 0,40 \text{ g/s} = 34,56 \text{ Kg. / d}$, siendo:

$Q = 0,050 \text{ m}^3 / \text{s}$ = caudal a tratar

$r = 8 \text{ g} / \text{m}^3$ = relación aire / volumen de agua tratada, valor adoptado

Masa específica del aire = $\rho_a = 6 \text{ Kg./m}^3$ a 5 atm

Caudal del aire en las condiciones de operación = $Q_{ai} = F_a / \rho_a = 34,56 / 6 = 5,76 \text{ m}^3 / \text{d} = 240 \text{ l/h}$

Caudal total agua a recircular = $Q_R = N \cdot Q_r = 4 \cdot 1,8 \text{ l/s} = 7,2 \text{ l/s} = 622,08 \text{ m}^3 / \text{d}$, siendo:

$N = 4$ = número de unidades de filtración – flotación

$Q_r = 1,8 \text{ L/s}$ = caudal a recircular en cada unidad

Volumen de la cámara de presurización = $V_p = Q_R \cdot t = 7,2 \cdot 60 \cdot 5 = 2160 \text{ L} = 2,160 \text{ m}^3$, para $t_p = 5 \text{ min}$ = tiempo de permanencia adoptado

Área de la cámara de presurización = $A_p = \Pi \cdot D^2 / 4 = 3,14 \cdot 1,00^2 / 4 = 0,785 \text{ m}^2$, para $D = 1,00 \text{ m}$ = diámetro de la cámara

Altura útil de la cámara de presurización = $H_p = V_p / A_p = 2,160 / 0,785 = 2,75 \text{ m}$

Velocidad de aplicación = *carga hidráulica en la cámara de presurización* = $U_p = q = Q_R / A_p = 622,08 / 0,785 = 792,5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{d}$

Cantidad de aire de disuelto necesario en el agua presurizada = $F_{ai} \cdot t / V_p = 34,56 \cdot 5 \cdot 10^6 / (1440 \cdot 2160) = 55,6 \text{ mg aire / l}$

Tipos de cámaras de presurización: hay varios modelos, algunos con rellenos de anillos de plástico. Para aumentar la disolución del aire en el agua, el caudal de aire Q_{ai} debe ser aumentado por lo menos en un 50%, dependiendo de la eficiencia de la solución del aire en el agua de recirculación en el interior de la cámara de saturación.

Caudal a producir por el compresor = $Q_C = 1,5 Q_{ai} = 1,5 \cdot 240 = 360 \text{ l/h}$. Se adopta $Q_C = 400 \text{ l/h}$, considerado un 67% el aumento anteriormente indicado.

Instalaciones complementarias: debido a que la presión del agua presurizada es del orden de 5 atm, hay que proyectar válvulas reductoras de la presión, del tipo cónico, en la entrada de cada filtro para que haya liberación y aumento del tamaño de las burbujas. En general, se tiene una tubería perforada a lo ancho de la entrada del agua floculada a la unidad de flotación-filtración, con la cual se logra la distribución uniforme del agua presurizada en

la unidad. Hay que tener en cuenta la pérdida de carga que se produce en los orificios de la cañería, normalmente de acero inoxidable, correspondientes a la distribución de agua presurizada en el interior de los filtros.

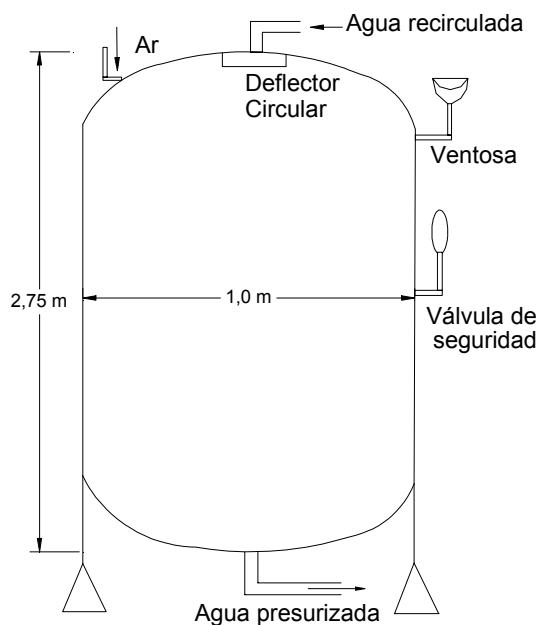


Figura 17. Esquema de la cámara de presurización (corte)

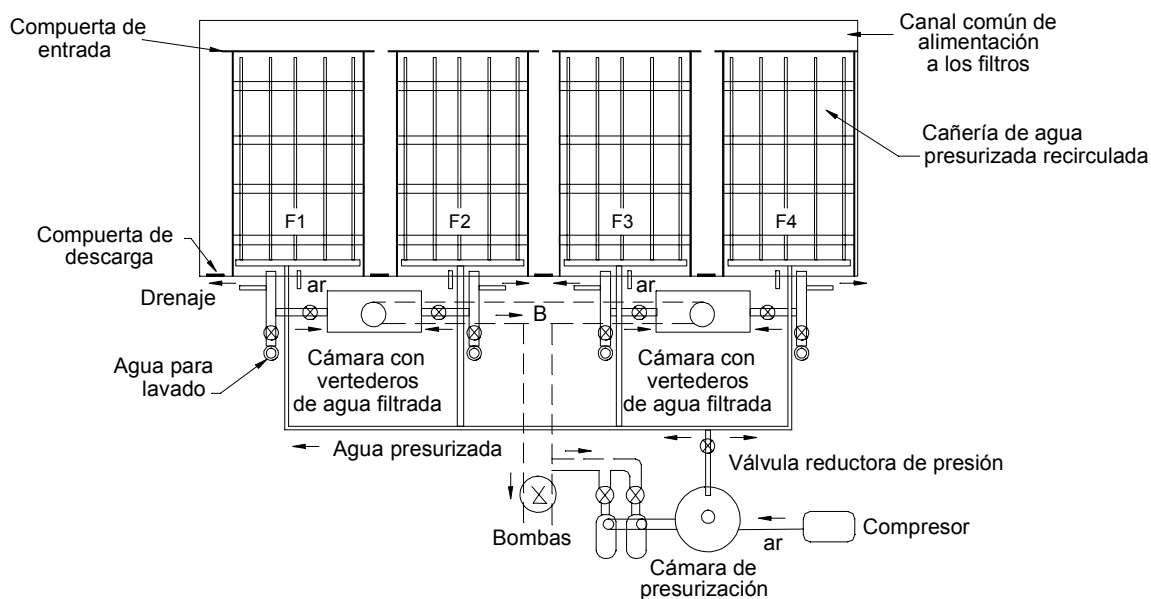


Figura 18. Planta del sistema de flotación - filtración

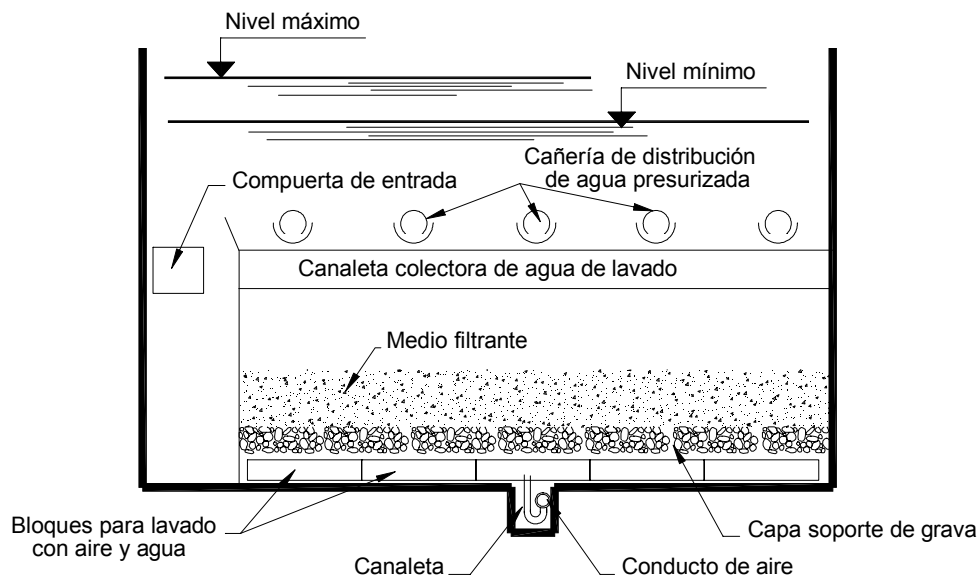


Figura 19. Corte A - A

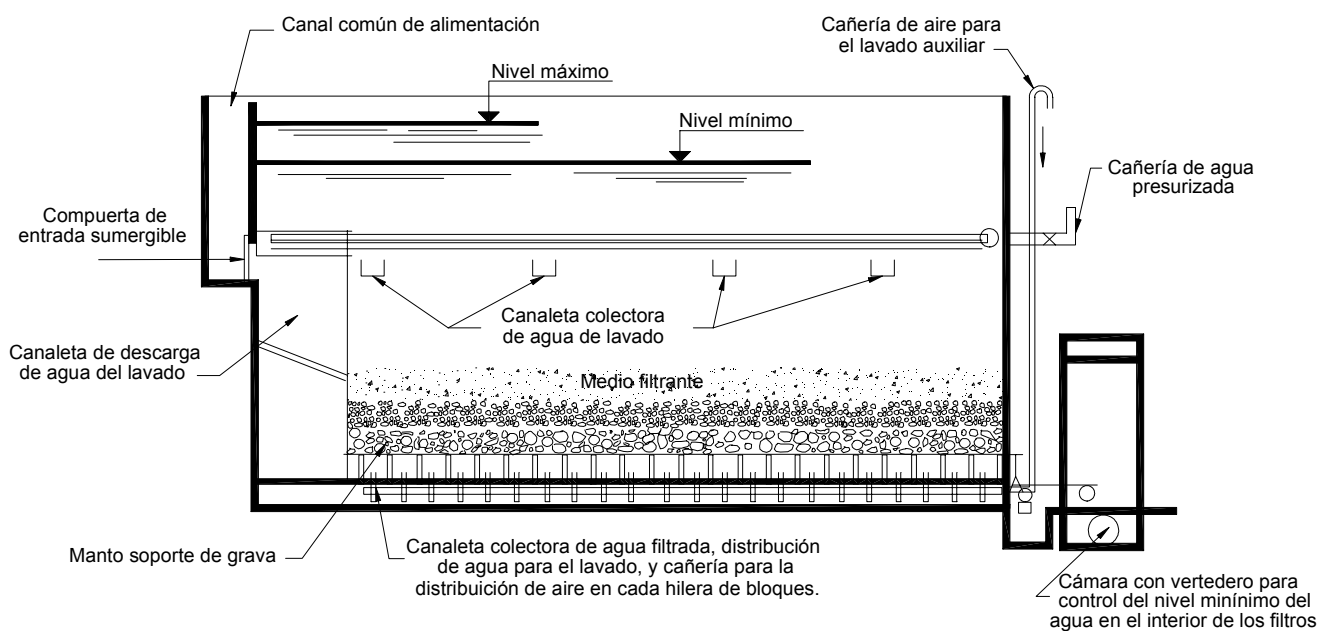


Figura 20. Corte B - B

12. BIBLIOGRAFIA

- Bunker Jr., D. Q.; Edzwald, J. K.; Dahlquist, J.; Gillberg, L. (1995). Pretreatment Considerations for Air Flotation: Water Type, Coagulants and Flocculation. In: IVES, K. L.; Bernhardt, H. J., eds. Flotation Processes in Water and Sludge Treatment. Water Science and Technology, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 63-71.
- Di Bernardo, L., 1993, Métodos e Técnicas de Tratamento de Água, vol. I e II, ABES, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Di Bernardo, L., 1995, Algas e suas Influências na Qualidade das Águas e nas Tecnologias de Tratamento, ABES, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Edzwald, J. K. (1995). Principles and Applications of Dissolved Air Flotation. In: Ives, K. L.; Bernhardt, H. J., eds. Flotation processes in water and sludge treatment. Water Science and Technology, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 1-23.
- Edzwald, J. K.; Wingler, B. J. (1990). Chemical and Physical Aspects of Dissolved-air Flotation for the Removal of Algae. Aqua. v. 29, p. 24-35.
- Janssens, J. G. (1992). Developments in Coagulation, Flocculation and Dissolved Air Flotation. Water/Engineering & Management. p.26-31, Jan.
- Longhurst, S. J.; Graham, N. J. D. (1987). Dissolved Air Flotation Potable Water Treatment: A Survey of Operational Units in Great Britain. The Public Health Engineer, v. 14, n. 6, p. 71-76, Apr.
- Malley, J. P., Edzwald, J. K. (1991). Concepts for Dissolved-air Flotation Treatment of Drinking Waters. Aqua, v. 40, n. 1, p. 7-17.
- Reali, M. A. P. & Goularte, S. A. D. (1996) - Influência da Floclulação sobre a Flotação por Ar Dissolvido XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Anales Electrónicos México, D. F.
- Zabel, T. (1985). The Advantages of Dissolved-air Flotation for Water Treatment. Management and Operations, Journal AWWA, p. 42-46, May.