

## CAPÍTULO VIII - 10. AERACIÓN Y DESORCIÓN

### ÍNDICE

---

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
<b>3. TIPOS DE AERADORES .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. AERADORES DE CAÍDA DE AGUA .....</b>	<b>5</b>
3.1.1. <i>Aeradores de Pulverización .....</i>	<i>5</i>
3.1.2. <i>Aeradores de Bandejas Múltiples.....</i>	<i>5</i>
3.1.3. <i>Aeradores en Cascadas y Vertederos.....</i>	<i>7</i>
3.1.4. <i>Aerador Manual Para la Remoción de Hierro y Manganeseo.....</i>	<i>9</i>
<b>3.2. SISTEMAS DE AERACIÓN POR AIRE DIFUSO .....</b>	<b>10</b>
3.2.1. <i>Sistemas de Difusores Porosos .....</i>	<i>11</i>
3.2.2. <i>Sistemas de Difusores no Porosos.....</i>	<i>14</i>
<b>3.3. SISTEMAS DE AERACIÓN MECÁNICA.....</b>	<b>15</b>
3.3.1. <i>Aeradores de Superficie.....</i>	<i>16</i>
3.3.2. <i>Aeradores de Turbina .....</i>	<i>16</i>
3.3.3. <i>Torres Rellenas .....</i>	<i>16</i>
<b>4. LIMITACIONES .....</b>	<b>25</b>
<b>5. CRITERIOS TÉCNICOS.....</b>	<b>26</b>
<b>5.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2. APLICACIÓN DE ESTUDIOS A ESCALA PILOTO .....</b>	<b>29</b>
<b>5.3. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....</b>	<b>30</b>
<b>5.4. EFICIENCIA DEL SISTEMA.....</b>	<b>30</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>32</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Unidades y factores de conversión para la constante de Henry.....	<b>3</b>
<b>Tabla 2.</b> Constantes de Henry para compuestos seleccionados .....	<b>4</b>
<b>Tabla 3.</b> Información típica para el diseño de aeradores de bandeja .....	<b>6</b>
<b>Tabla 4.</b> Parámetros típicos para el diseño de cascadas de oxigenación .....	<b>9</b>
<b>Tabla 5.</b> Velocidades típicas de flujo de aire .....	<b>13</b>
<b>Tabla 6.</b> Propiedades del aire y del agua .....	<b>19</b>
<b>Tabla 7.</b> Parámetros de diseño típicos para la remoción de compuestos orgánicos volátiles más frecuentes <sup>a</sup> .....	<b>26</b>
<b>Tabla 8.</b> Eficiencias de remoción típicas para sistemas de aeración difusa .....	<b>31</b>

## FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Aeradores de bandejas .....	7
<b>Figura 2.</b> Cascadas de aeración .....	8
<b>Figura 3.</b> Aerador de cascadas.....	8
<b>Figura 4.</b> Aerador de cascadas.....	8
<b>Figura 5.</b> Aerador de cascadas tipo escaleras .....	9
<b>Figura 6.</b> Aerador manual para la remoción de hierro y manganeso .....	10
<b>Figura 7.</b> Tubos porosos.....	12
<b>Figura 8.</b> Difusores porosos.....	13
<b>Figura 9.</b> Difusores no porosos.....	14
<b>Figura 10.</b> Aeradores mecánicos.....	15
<b>Figura 11.</b> Sistema de aeración de torre rellena .....	17
<b>Figura 12.</b> Tipos de distribuidores .....	17
<b>Figura 13.</b> Placa de distribuidor de tipo orificio utiliza en una torre rellena.....	18
<b>Figura 14.</b> Materiales de relleno utilizados en torres de desorción .....	18
<b>Figura 15.</b> Torre de desorción .....	20
<b>Figura 16.</b> Número de unidades de transferencia para absorbedores o desorbedores.....	23
<b>Figura 17.</b> Torre rellena utilizada para la remediación de aguas subterráneas .....	24
<b>Figura 18.</b> Efecto del tipo de contaminante en el diseño de la torre rellena .....	27
<b>Figura 19.</b> Altura del relleno vs. Eficiencia de remoción para el tricloroetileno .....	28
<b>Figura 20.</b> Sistema de torre rellena a escala piloto .....	29



## **1. INTRODUCCIÓN**

Tradicionalmente la aeración se ha utilizado como una unidad de proceso de tratamiento de agua destinada a mejorar su sabor o bien contribuir a la economía del proceso. Las primeras aplicaciones de la aeración consistieron en la remoción de sulfuro de hidrógeno, que produce olores y sabores, o la remoción de dióxido de carbono, a fin de reducir la demanda de cal en el proceso de ablandamiento.

Posteriormente, con la identificación de compuestos orgánicos volátiles (en inglés volatile organic compounds –VOC-) como factores de riesgo para la salud, se extendió su aplicación. Actualmente, la aeración se emplea también en procesos donde el contacto íntimo entre el agua y el aire permite remover trazas de sustancias volátiles que aquella contiene. Este proceso se conoce como desorción o bien en la literatura inglesa como stripping.

## 2. GENERALIDADES

El objetivo básico de la aeración es la mejora de las características físicas y químicas del agua destinada a usos domésticos, comerciales e industriales. En algunos casos se requiere la disminución de la concentración de ciertas sustancias volátiles que se encuentran presentes en el agua, tales como:

- Aquellas que producen sabores y olores, tales como el sulfuro de hidrógeno y algunos compuestos orgánicos volátiles (VOC's).
- Aquellas que acentúan la acción corrosiva del agua, tales como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. Aunque el oxígeno puede considerarse también como perteneciente a esta categoría, en las plantas de tratamiento de aguas raras veces aumenta su concentración, mediante los métodos habituales de aeración para las condiciones de temperatura y presión utilizadas.
- Aquellas que reaccionan o interfieren con los productos químicos empleados en el tratamiento del agua. Entre estas sustancias, puede mencionarse al dióxido de carbono en el tratamiento por ablandamiento y a los procesos de remoción de hierro y sulfuro de hidrógeno que generalmente preceden a la fluoración.
- Diversos gases, como por ejemplo el metano.

En otros casos, puede requerirse la incorporación de ciertas sustancias volátiles en el agua, como por ejemplo:

- Los gases procedentes de la atmósfera, especialmente el oxígeno, que es de gran utilidad para mejorar el sabor y olor del agua así como para la oxidación del hierro, manganeso, sulfuro de hidrógeno y, hasta cierto punto, de la materia orgánica.
- Aquellas sustancias que modifican las características del agua con la finalidad de prepararla para la siguiente etapa de tratamiento. En el proceso de recarbonatación, una vez efectuado el ablandamiento, con un exceso de cal, se incorpora dióxido de carbono mediante difusores para neutralizar la alcalinidad presente. El dióxido de carbono también puede emplearse durante la aeración de las aguas de elevado contenido en sulfuro con el fin de disminuir el valor de pH y, en consecuencia, aumentar la volatilidad del sulfuro de hidrógeno para facilitar su eliminación.

Los procesos de aeración emplean sistemas de contacto gas-líquido que mejoran la transferencia de los compuestos volátiles de la fase líquida a la fase gaseosa. A fin de optimizar dicha transferencia se han diseñado una serie de equipos que pueden categorizarse en dos grandes grupos:

- Inyección de agua en aire.
- Inyección de aire en agua.

En ambos sistemas, la energía mecánica genera una interfase aire-agua a través de la cual ocurre la transferencia de contaminantes.

Según la categorización mencionada podemos agrupar las tecnologías empleadas de la siguiente manera:

- Aeración por caída de agua.
- Aeración por aire difuso.
- Aeración mecánica.
- Torres spray.
- Torres rellenas y de platos.

La viabilidad de que ocurra la desorción de un compuesto dependerá de sus propiedades fisicoquímicas, según lo expresa la Ley de Henry. Para una mezcla acuosa que contiene una baja concentración de compuestos orgánicos volátiles, la distribución de un compuesto en particular entre la fase líquida y la fase gaseosa bajo el equilibrio estará dada por la ley de Henry, según la siguiente expresión:

$$P_A = H_A \cdot X'_A \quad (1)$$

Donde:

$P_A$  = Presión parcial del compuesto A en la fase gaseosa [atm]

$X'_A$  = Fracción molar del compuesto A en la fase líquida en equilibrio con la fase gaseosa

$H_A$  = Constante de Henry [atm]

Cuando se utiliza la ley de Henry y se compara la constante para diferentes compuestos, se deberá tener cuidado en el uso de unidades consistentes. Así por ejemplo, si la concentración en la fase líquida está expresada en mol/l (o en kmol/m<sup>3</sup>) y  $P_A$  está en atm, la constante de Henry es en atm · l/mol o atm · m<sup>3</sup>/kmol. Muchas veces la constante de Henry se expresa como un número adimensional cuando tanto la concentración del compuesto en el agua y en el aire están en fracciones molares o en las mismas unidades de masa/volumen. En la **Tabla 1** se resumen las diversas formas en que se expresa la constante de Henry y los factores de corrección.

Concentración en fase gaseosa	Concentración en fase líquida	Constante de Henry	
		Símbolo	Unidades
atm	Fracción molar	$H_A$	atm
atm	mol/m <sup>3</sup>	$H_M$	atm·m <sup>3</sup> /mol
g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>	$H_C$	Adimensional
Fracción molar	Fracción molar	$H'_C$	Adimensional

Factores de conversión:

$$H_A = H_M \cdot 55,6 \cdot 10^3$$

$$H'_C = H_M \cdot 55,6 \cdot 10^3$$

$$H_C = H_M \cdot 44,64 \quad (H_C = H_M/R.T)$$

Fuente: Lankford et.al., 1990

**Tabla 1.** Unidades y factores de conversión para la constante de Henry

La constante de Henry es dependiente de la temperatura, expresándose su efecto de la siguiente forma:

$$\log H = A - \frac{B}{(T - T_o)} + \frac{C}{T} \quad (2)$$

Donde:

$T$  = Temperatura [°K]

$A, B, C, T_o$  = Constantes empíricas

Como regla general, los compuestos que tienen una constante de Henry  $H_M$  mayor de  $10^{-3}$  atm.m<sup>3</sup>/mol se consideran como “fáciles de desorber”, aquellos con un  $H_M$  entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$  atm.m<sup>3</sup>/mol son “difíciles de desorber”, mientras que los que tienen  $H_M$  menor de  $10^{-5}$  atm.m<sup>3</sup>/mol son llamados “no desorbibles”. En la **Tabla 2** se presentan algunos ejemplos de compuestos para cada uno de los tres grupos indicados.

Compuesto	Fórmula	Constante de Henry $h_m$ [atm . m <sup>3</sup> /mol]	Característica
Cloruro de vinilo	CH <sub>2</sub> CHCl	6,38	Fácil de desorber
Tricloroetileno	CCHCl <sub>3</sub>	$1,0 \cdot 10^{-2}$	
1,1,1 – Tricloroetano	CCH <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	$7,0 \cdot 10^{-3}$	
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	$6,0 \cdot 10^{-3}$	
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	$4,0 \cdot 10^{-3}$	
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	$3,0 \cdot 10^{-3}$	
1,1,2 – Tricloroetano	CCH <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	$7,7 \cdot 10^{-4}$	Difícil de desorber
Bromoformo	CHBr <sub>3</sub>	$6,3 \cdot 10^{-4}$	
Pentaclorofenol	C <sub>6</sub> (OH)Cl <sub>5</sub>	$2,1 \cdot 10^{-6}$	No desorbible
Dieldrin	-	$1,7 \cdot 10^{-8}$	

Fuente: Lankford et.al., 1990

**Tabla 2.** Constantes de Henry para compuestos seleccionados



### 3. TIPOS DE AERADORES

#### 3.1. AERADORES DE CAÍDA DE AGUA

##### 3.1.1. Aeradores de Pulverización

Los aeradores de pulverización, llamados también de fuente o surtidores, consisten en una serie de toberas fijas, montadas sobre una parrilla de distribución de tuberías que dirigen el flujo de agua hacia arriba, verticalmente o en ángulo inclinado, de tal manera que el agua se rompe en gotas pequeñas. Este tipo de aerador se utiliza frecuentemente para la remoción de  $\text{CO}_2$  y la incorporación de oxígeno.

El tamaño, número y distancia entre toberas dependerá de la energía a consumir, del área disponible y de la interferencia entre fuentes adyacentes. Generalmente se emplean toberas de 2,5 a 3,8 cm de diámetro, ya que las de menor diámetro tienden a atascarse y requieren un mantenimiento mucho más complicado. Los caudales de descargas oscilan entre 4,7 a 11 l/s (17 a 40  $\text{m}^3/\text{h}$ ) a presiones de 0,7  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , espaciadas entre 0,6 y 3,6 m. El área requerida varía generalmente entre 0,11 y 0,32  $\text{m}^2$  por l/s tratado (3 a 9  $\text{m}^2$  por 100  $\text{m}^3/\text{h}$  de capacidad).

Es deseable que la instalación sea de material anticorrosivo, ya que la corrosión, tanto interior como exterior, puede ser un problema serio en este tipo de sistemas de aeración. Aunque las fuentes son estéticamente atractivas y proveen una relación alta de área por unidad de volumen para toberas de gotas finas, tienen la desventaja de ofrecer tiempos muy cortos de exposición, del orden de los 2 segundos en un chorro vertical con altura de operación de 6 m. Al mismo tiempo la superficie que requieren es tan grande que no pueden alojarse económicamente y, por regla general, no funcionan cuando las temperaturas se encuentran por debajo de los cero grados centígrados.

##### 3.1.2. Aeradores de Bandejas Múltiples

Un aerador de bandejas múltiples consiste en una serie de bandejas equipadas con ranuras, fondos perforados o mallas de alambre, sobre las cuales se distribuye el agua para que caiga en un recipiente colector, que se encuentra en la base. Para mejorar la eficiencia en el intercambio de gases y la distribución de agua, suele colocarse un relleno grueso de coque, piedra, ladrillo triturado o esferas de material cerámico, de diámetros que oscilan entre 5 y 15 cm. Estos rellenos gruesos son especialmente eficaces cuando se emplean como fase preparatoria en la separación del hierro y manganeso, ya que dichos medios se recubren con películas que catalizan las reacciones oxidantes de los minerales favoreciendo su precipitación.

Generalmente se utilizan de 3 a 5 bandejas, siendo el espaciamiento entre las mismas de 30 a 75 cm. El área requerida varía entre 0,05 y 0,15  $\text{m}^2$  por l/s de agua tratada (1,35 a 4,3  $\text{m}^2$  por 100  $\text{m}^3/\text{h}$  de capacidad).

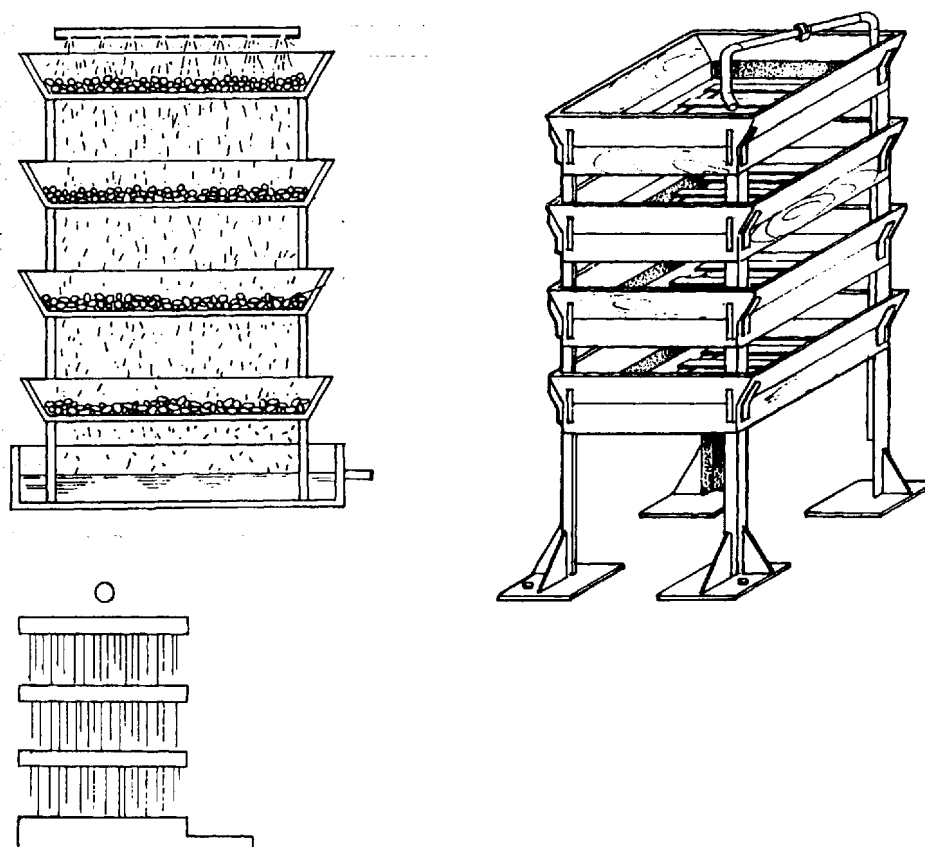
La ventilación es un factor importante en el diseño de estos aeradores y por lo tanto debe estudiarse cuidadosamente el sitio de su localización. La corrosión y el crecimiento biológico son factores de importancia en el diseño de estos aeradores, por lo cual se

construyen con materiales resistentes, tales como el acero inoxidable, aluminio, hormigón o maderas especialmente tratadas. En la **Tabla 3**, que se presenta a continuación, se incluyen los factores de diseño utilizados para los aeradores de bandejas:

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
<i>Carga Hidráulica</i>	550-1.800	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Awwa
<i>Caudal/Area total de bandejas</i>	<700	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Awwa
	300 - 600	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Arboleda et.al.
	500 - 1.600	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Feachem et.al.
	120	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Smethurst et.al.
	60 - 300	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Steel et.al.
	<300	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Committee G. Lakes
	600 - 1.200	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	Montgomery et.al.
<i>Número de bandejas</i>	3 - 5		
	4 - 6		Feachem et.al.
	>3		Committee G. Lakes
<i>Altura total del aerador</i>	1,2 - 3	m	Feachem et.al.
<i>Lecho de contacto</i>			
Espesor	15 - 30	cm	
Coque o piedra, diámetro	4 - 15	cm	
Coque o piedra, diámetro	5	cm	Feachem et.al.
Esferas de cerámica, diámetro	5 - 15	cm	Steel et.al.
<i>Orificios de distribución, diámetro</i>	5 - 6	mm	Feachem, Steel
	5 - 12	mm	Committee G. Lakes
<i>Separación entre orificios</i>	2,5	cm	Feachem,
	2,5 - 7,5	cm	Committee G. Lakes
<i>Profundidad de agua en la bandeja</i>	15	cm	
<i>Separación entre bandejas</i>			
	30 - 75	cm	Committee G. Lakes
<i>Eficiencia en remoción de CO<sub>2</sub></i>	<30	cm	
	30 - 60	%	Feachem et.al.

Fuente: Romero Rojas J. (1995)

**Tabla 3.** Información típica para el diseño de aeradores de bandeja



Fuente: Romero Rojas J. (1995)

**Figura 1.** Aeradores de bandejas

### 3.1.3. Aeradores en Cascadas y Vertederos

En este tipo de aeradores, el agua se deja caer, en láminas o capas delgadas, sobre uno o más escalones de hormigón. El aerador de cascada produce una gran pérdida de carga aunque, en contrapartida, ofrece un diseño simple. Algunos autores señalan que con una cascada y 40 cm de profundidad de suministro se pueden aerar 9.000 m<sup>3</sup>/d de agua con remociones del 50 al 60% de CO<sub>2</sub> (Romero Rojas J., 1995).

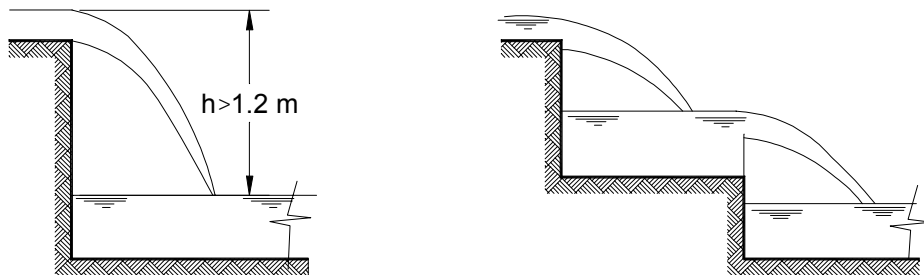
El aerador de cascadas se diseña como una escalera, en donde la aeración será más completa cuanto mayor sea el área horizontal. La aeración ocurre en las zonas donde se producen salpicaduras, en forma similar a lo que ocurre en un río turbulento, por lo cual se acostumbra a colocar salientes, bloques o vertederos en los extremos de los escalones.

La carga hidráulica de estos aeradores puede ser de 10 a 30 l/s.m<sup>2</sup> u 864 a 2.592 m/d, donde la carga hidráulica es la relación entre el caudal aplicado y el área horizontal del aerador; la altura de los escalones, de 20 a 40 cm, y la altura total de 1 a 3 metros.

La aeración en vertederos y aliviaderos es factible cuando existe suficiente energía disponible; en ese caso el sistema es económico, no se requiere energía adicional y el mantenimiento es sencillo. Es posible mejorar la aeración creando turbulencia, ya que se

tiene una mayor relación de área/volumen, cuando el agua cae libremente de un nivel superior a uno inferior, o bien aumentando la rugosidad del canal.

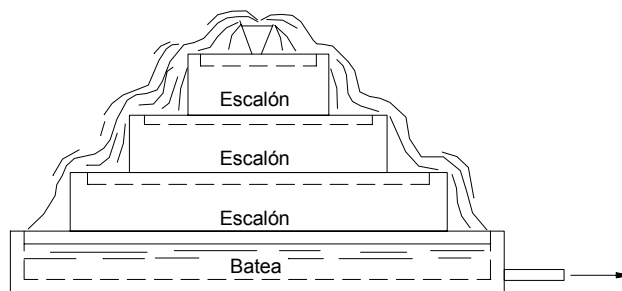
Existen estudios que indican que es más eficiente un sistema de cascadas múltiples con caídas menores de 1,2 m que una sola caída con altura mayor a 1,2 m. (Ver **Figura 3**, **Figura 4** y **Figura 5**).



Fuente: Romero Rojas J. (1995)

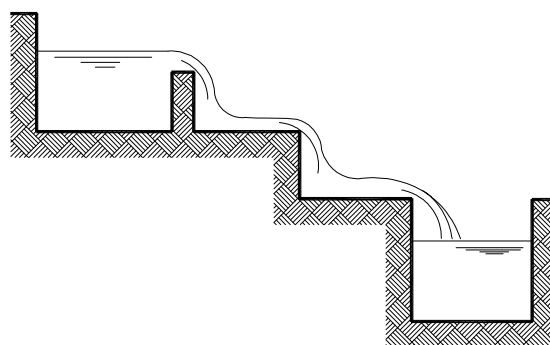
**Figura 2.** Cascadas de aeración

Estos mismos estudios sugieren que la aeración óptima se obtiene para un valor de caudal de  $235 \text{ m}^3/\text{h.m}$  ( $5.640 \text{ m}^3/\text{m.d}$ ) expresado por metro de ancho del vertedero.



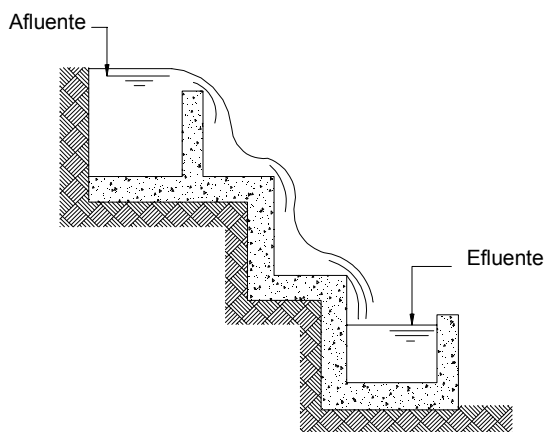
Fuente: Romero Rojas J. (1995)

**Figura 3.** Aerador de cascadas



Fuente: Romero Rojas J. (1995)

**Figura 4.** Aerador de cascadas



Fuente: Romero Rojas J. (1995)

**Figura 5.** Aerador de cascadas tipo escaleras

En la **Tabla 4**, presentada a continuación, se incluyen algunos parámetros típicos que se emplean para el diseño de cascadas de oxigenación.

Parámetro	Valor	Unidad
Carga Hidráulica lineal para caudal promedio	1.200 – 6.200	m <sup>3</sup> /m*d
Carga Hidráulica lineal típica para caudal promedio	3.000	m <sup>3</sup> /m*d
Altura del escalón	15 – 30	cm
Altura típica del escalón	20	cm
Longitud del escalón	30 – 60	cm
Longitud típica del escalón	45	cm
Altura de la cascada	1,8 - 5	m

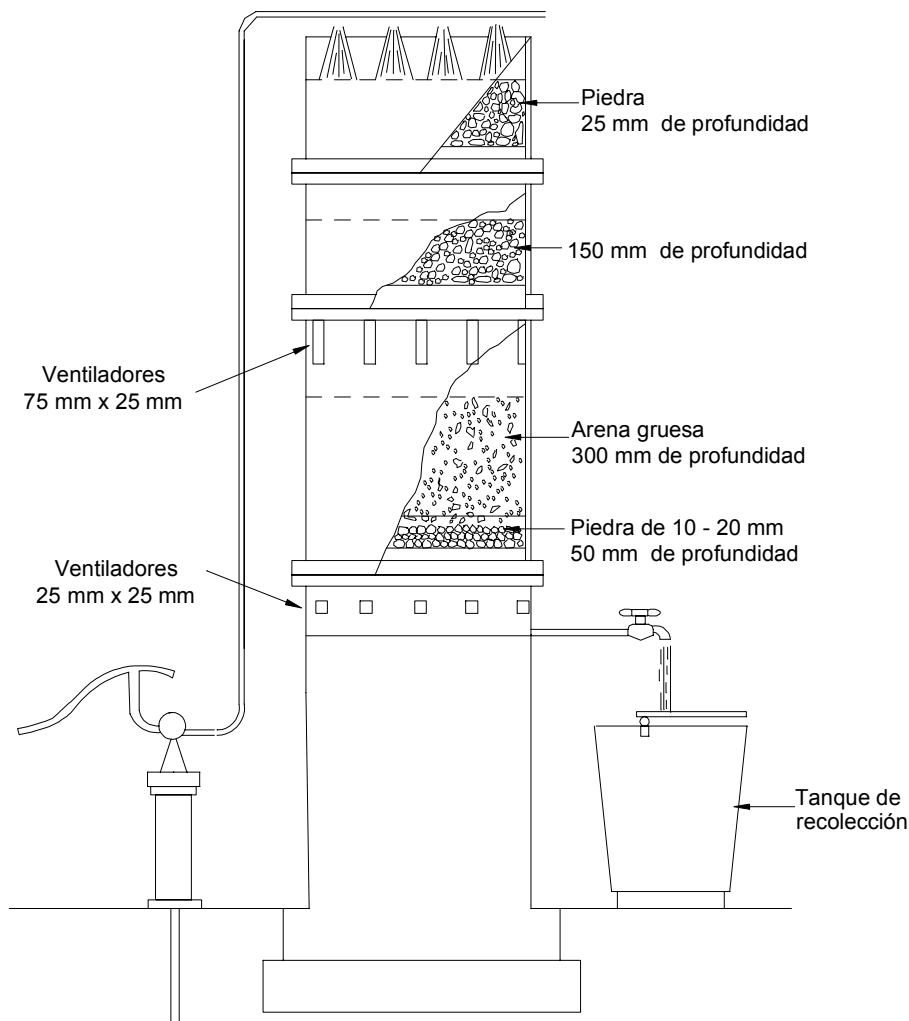
Fuente: Romero Rojas J. (1995)

**Tabla 4.** Parámetros típicos para el diseño de cascadas de oxigenación

### 3.1.4. Aerador Manual Para la Remoción de Hierro y Manganeseo

En la **Figura 6**, se muestra un aerador de operación manual desarrollado en la India para la remoción de hierro y manganeso en el medio rural. El aerador consta de tres cilindros colocados uno sobre otro.

En cada uno de los dos cilindros superiores se colocan 15 cm de piedra de 20 a 50 mm, mientras que en la capa del cilindro inferior se coloca un espesor de 30 cm de arena gruesa sobre un lecho de soporte de grava de 5 cm de espesor y grava de 1 a 2 cm (Romero Rojas J., 1995).



Fuente: Romero Rojas J. (1995)

**Figura 6.** Aerador manual para la remoción de hierro y manganeso

### 3.2. SISTEMAS DE AERACIÓN POR AIRE DIFUSO

La aeración por difusión es el proceso mediante el cual se burbujea aire en un volumen de agua contaminada. El aire se comprime hasta la carga hidrostática requerida y luego se libera a través de difusores. El propósito de los difusores es distribuir el aire uniformemente a través de la sección transversal del líquido y para producir el tamaño de burbuja deseado. A medida que la burbuja asciende se produce la transferencia de masa a través de la interfase aire-agua hasta que finalmente abandona la columna de agua o se satura con el contaminante. La velocidad de transferencia de masa y su extensión puede mejorarse incrementando la profundidad del tanque, mejorando la dispersión de la burbuja, aumentando la relación volumétrica aire-agua y disminuyendo el tamaño de la burbuja.

Las unidades de difusión de aire proporcionan, con un gasto igual de energía, un tiempo de aeración más largo que la del tipo de caída de agua, debido a que las burbujas ascendentes tienen una velocidad media más baja que las gotas descendentes. Desde el

punto de vista del intercambio de gases, el tipo de difusión de aire es más ventajoso. Sin embargo, otros factores, tales como la turbulencia, la relación área superficial – volumen y el espesor de la película superficial, también influyen sobre el rendimiento del aerador y el aerador del tipo de caída de agua es más ventajoso considerando estos aspectos. Los aeradores de difusión de aire conservan la carga hidráulica y no están expuestos a problemas relacionados con la disminución de la temperatura, sin embargo, suelen exigir costos de instalación superiores a los del tipo de caída de agua.

En general, las unidades de difusión de aire constan de depósitos rectangulares de hormigón provistos de tuberías perforadas, tubos o placas difusoras porosas, que se ubican cerca del fondo. El aire comprimido se inyecta a través del sistema para formar burbujas finas que, al ascender a través del agua, producen turbulencia. Estos depósitos suelen tener una profundidad de 2,7 a 4,5 m y un ancho de aproximadamente 4 m. Los tanques más profundos requieren mayor compresión de aire, lo cual se traduce en un aumento de los costos operativos; mientras que a profundidades menores se acorta el tiempo de contacto entre las burbujas y el agua y, en consecuencia la eficacia del proceso. Es por ello que a fin de obtener una mezcla eficaz se suelen utilizar relaciones ancho/profundidad no mayores de 2:1. La longitud de los depósitos es función del período de retención buscado, que en general está comprendido entre 10 y 30 minutos.

Por regla general, los difusores de aire se montan en un lado del depósito con el objeto de comunicar al agua un flujo en espiral que provoque turbulencia y favorecer la transferencia de gases. La cantidad de aire aplicada dependerá de la situación particular que se persiga, pero, en general oscila entre los 75 y 1.125 L/m<sup>3</sup> de agua tratada.

Cuando se emplean difusores porosos el aire de entrada debe pretratarse en un filtro electrostático a fin de reducir al mínimo el riesgo de ensuciamiento.

Antiguamente, estos sistemas se clasificaban como aeradores de burbuja fina o gruesa, designación que supuestamente reflejaba su eficiencia en cuanto a la transferencia de oxígeno. Desafortunadamente, resulta difícil definir el límite entre ambas categorías, por lo cual en la actualidad se prefiere categorizar a los sistemas de difusión de aire de acuerdo a sus propiedades físicas. En consecuencia, se clasifica a los diversos aparatos en tres grandes grupos: difusores porosos, difusores no porosos y otros.

### **3.2.1. Sistemas de Difusores Porosos**

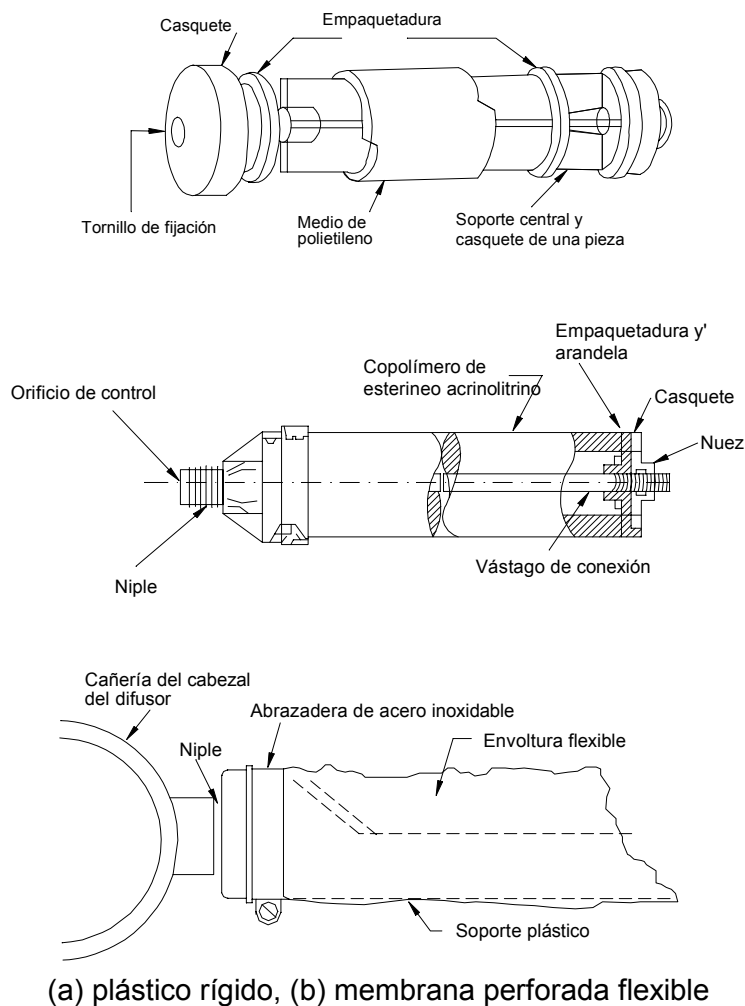
Generalmente se dividen en dos categorías: (a) materiales rígidos de cerámica o plástico y (b) membranas perforadas de plásticos flexibles o caucho.

El difusor más antiguo y ampliamente utilizado es el poroso rígido del tipo cerámico. Está constituido por partículas minerales de forma irregular que forman una malla de canales interconectados a través de la cual fluye el aire comprimido. Como el aire emerge de la superficie del difusor, el tamaño de poro, la tensión superficial y la velocidad de flujo del aire, influirán en el tamaño de la burbuja. En la actualidad, el difusor poroso rígido más común se construye de óxido de aluminio, aunque se están desarrollando materiales porosos plásticos que presentan una serie de ventajas sobre los primeros, tales como: menor peso, composición inerte y mayor resistencia a roturas según el material de que se trate. Sin embargo, presentan algunas desventajas entre las que se pueden mencionar: fragilidad de algunos plásticos y su susceptibilidad al estiramiento y colapso de orificios o poros a lo largo del tiempo. Los difusores porosos plásticos se fabrican a partir de una

gran variedad de polímeros termoendurecidos, siendo los más comunes el polietileno de alta densidad (HDPE) y el acrilonitriloestireno (SAN).

Los difusores de membrana difieren de los difusores rígidos porque no contienen una malla de canales interconectados. Por métodos mecánicos se crean membranas que presentan pequeños orificios individuales o perforaciones para permitir el pasaje del gas. Estos difusores perforados son membranas flexibles muy finas, construidas de un material termoplástico o elastómero. Tal como ocurre con los plásticos porosos, las membranas perforadas ofrecen la ventaja de ser muy livianas. Como contrapartida una de las desventajas de la membrana plástica es que puede cambiar sus propiedades con el tiempo, dependiendo de los materiales de construcción, forma y dimensiones, así como de ciertas condiciones ambientales.

En la **Figura 7** y **Figura 8**, se pueden observar diversos formatos de difusores porosos, tales como placas, domos, discos y tubos. Los difusores de domo son discos de 18 cm de diámetro con los bordes doblados hacia abajo, construido de material cerámico y montado sobre un asiento de PVC al cual se lo fija con un tornillo central.



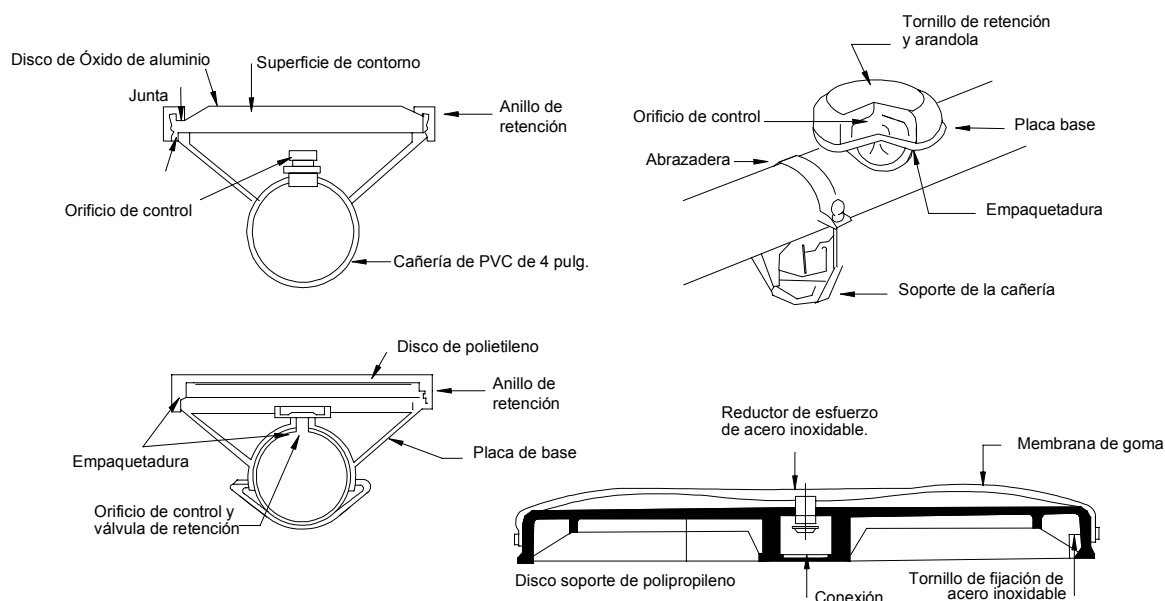
Fuente: WEF (1992)

**Figura 7. Tubos porosos**



El disco, presenta un diámetro de 18 a 24 cm para materiales plásticos porosos y cerámicos, mientras que para el caso de membranas perforadas el valor se encuentra comprendido entre los 20 y 51 cm. Al igual que para el caso de los domos, el disco se monta sobre un asiento de PVC pero puede ser asegurado con un tornillo central o un anillo perimetral.

La mayoría de los difusores tubulares tienen el mismo formato general: 51 a 61 cm de longitud con un diámetro externo de 6 a 8 cm.



(a) discos, (b) difusores de domo, (c) discos perforados

Fuente: WEF (1992)

**Figura 8. Difusores porosos**

Con excepción de los diseños de placas antiguos, cada difusor poroso está equipado con un orificio de control de flujo para asegurar una distribución uniforme del aire.

En la **Tabla 5** se resumen los rangos de velocidad de flujo de aire para algunos de los difusores anteriormente descritos.

Tipo de difusor	Velocidad de flujo [m <sup>3</sup> /min]
Domos	0,01 – 0,07
Discos	
Cerámicos	0,01 – 0,08
Membranas perforadas	0,03 – 0,57
Tubos	0,03 – 0,14

Fuente: WEF (1990)

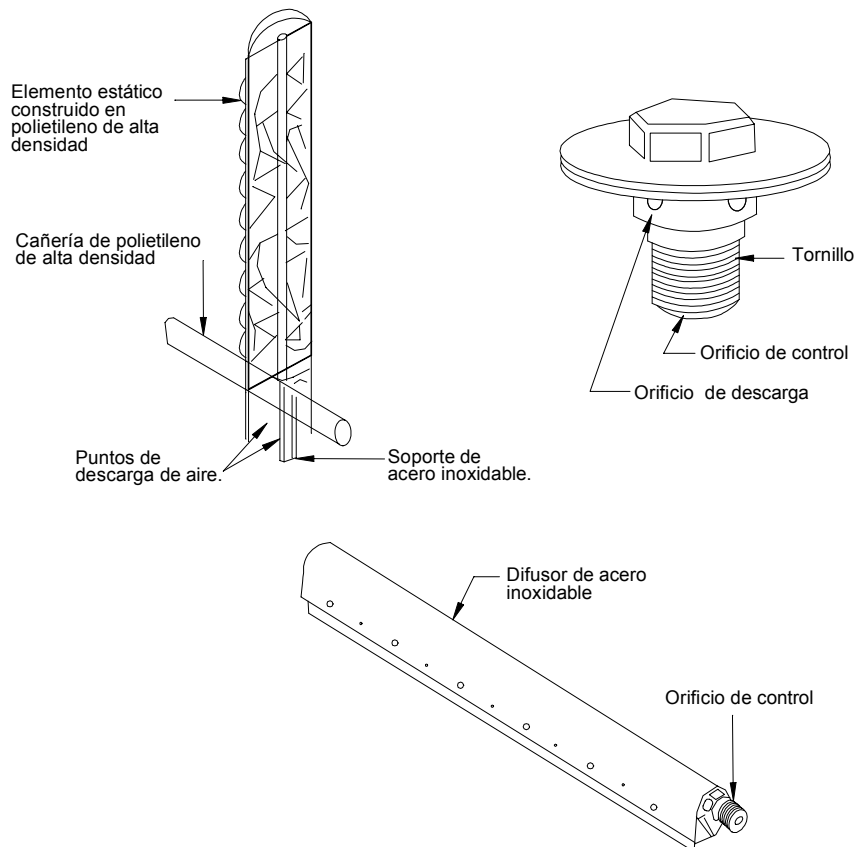
**Tabla 5. Velocidades típicas de flujo de aire**

### 3.2.2. Sistemas de Difusores no Porosos

Los difusores no porosos, disponibles en una amplia variedad de formatos y materiales, tienen orificios más grandes que los difusores porosos. Los orificios fijos pueden variar desde simples perforaciones practicadas en una cañería hasta aberturas diseñadas especialmente en fabricaciones metálicas o plásticas.

Las cañerías perforadas, rociadores y los tubos ranurados son diseños típicos de difusores no porosos, que en muchos casos permiten ajustar la velocidad del flujo de aire, a través del cambio de tamaño o número de orificios por los cuales pasa el aire.

Esta tecnología se utiliza con frecuencia para el tratamiento de fuentes de abastecimiento, así como para la remoción de compuestos orgánicos volátiles (VOC's). La aeración por difusión para la remoción de VOC's tiene un costo energético mucho mayor que las torres rellenas, por lo cual se consideran únicamente cuando el proceso tiene lugar en tanques existentes, lo que permite competir con los costos de inversión que requieren las torres rellenas.



(a) tubos estáticos, (b) orificio, (c) tubo

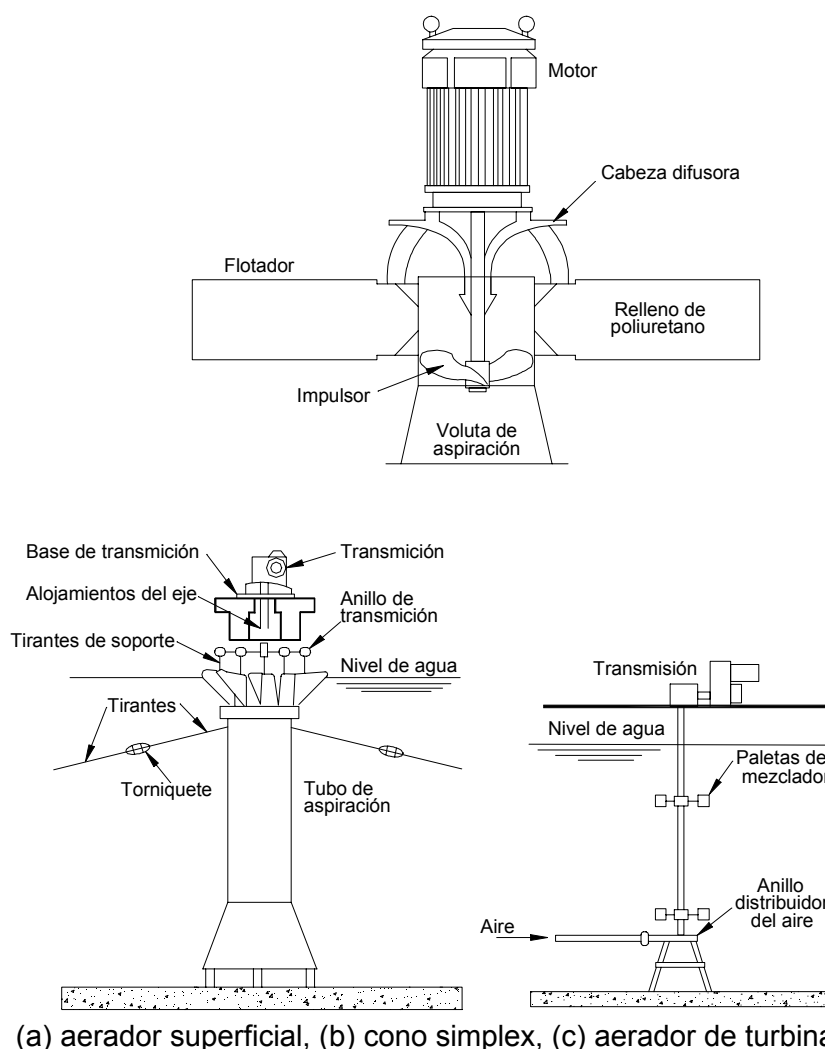
Fuente: WEF (1992)

**Figura 9.** Difusores no porosos

### 3.3. SISTEMAS DE AERACIÓN MECÁNICA

Los aeradores mecánicos que se utilizan con mayor frecuencia son los de superficie y los de turbina, que se pueden observar en la **Figura 10**. En los aeradores superficiales, el oxígeno que se introduce proviene de la atmósfera, mientras que en los aeradores de turbina, el oxígeno se introduce por el fondo del tanque. En ambos casos, la acción del aerador y de la turbina, ayudan a mantener mezclado el contenido del tanque de aeración, proveyendo de este modo el contacto entre el aire proveniente de la atmósfera y el agua.

Dentro de los principales parámetros de diseño considerados se puede hacer referencia a la potencia de aeración, el tipo de aerador, la profundidad del tanque y el tiempo de residencia hidráulico.



Fuente: Metcalf (1977)

**Figura 10.** Aeradores mecánicos

### 3.3.1. Aeradores de Superficie

Los aeradores mecánicos de superficie son los sistemas de aeración más sencillos. Consisten en rotores sumergidos en forma total o parcial, montados en el centro del tanque de aeración y que agitan enérgicamente el agua a tratar, provocando un cambio rápido de la interfase aire-agua, facilitando de este modo la disolución del aire.

Los rotores pueden fabricarse de acero, hierro, aleaciones no corroibles y plástico reforzado con fibra de vidrio. Generalmente, el rotor es impulsado por un motor eléctrico, mediante un engranaje reductor de velocidad. Ambos se montan sobre una plataforma que se soporta por pilares que se encuentran apoyados en el fondo del tanque o por medio de vigas apoyadas en los muros. También se han desarrollado aeradores mecánicos flotantes para su empleo en tanques o lagunas en los cuales fluctúa la altura de la superficie del agua.

Los aeradores superficiales pueden agruparse en cuatro categorías generales: de flujo radial y baja velocidad, de flujo axial y alta velocidad, aparatos de aspiración y rotores horizontales.

### 3.3.2. Aeradores de Turbina

La mayoría de los aeradores mecánicos son del tipo de flujo ascendente, y basan su eficiencia en la agitación violenta de la superficie y en el arrastre de aire. También puede utilizarse un tubo de aspiración para controlar la configuración de la corriente del líquido circulante dentro del tanque de aeración. El tubo de aspiración consiste en un cilindro con extremos ensanchados montado en forma concéntrica respecto del impulsor y que se extiende exactamente desde encima de la solera del tanque de aeración hasta justo por debajo del impulsor.

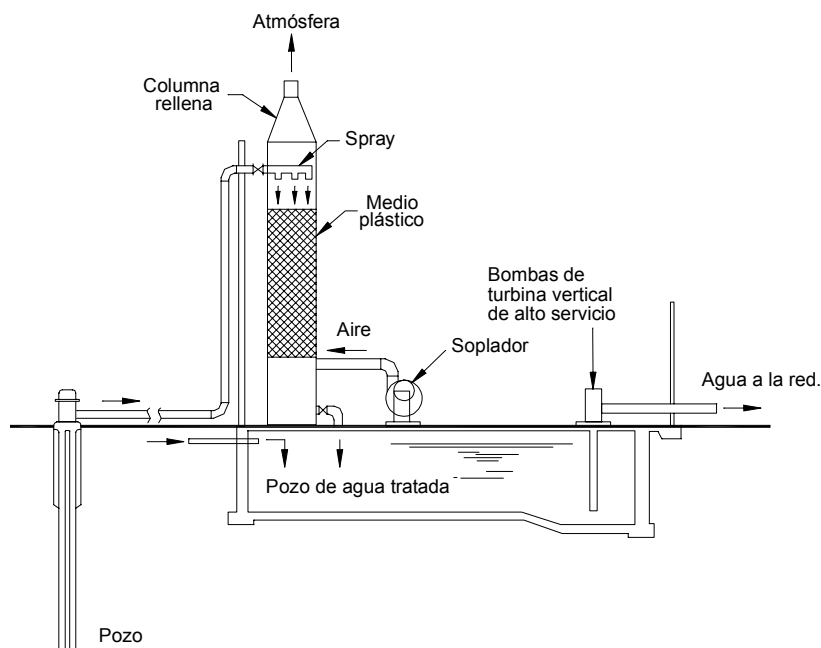
### 3.3.3. Torres Rellenas

Los principios de diseño para la desorción en torres rellenas se han estudiado en gran detalle en la literatura en los últimos 30 a 40 años. La mayoría de las aplicaciones en ingeniería química implican diseños de sistemas para tratar soluciones concentradas. Sin embargo, los procedimientos desarrollados en la industria de procesos químicos se ha extendido recientemente a cubrir el rango completo de concentraciones, incluyendo el caso de soluciones diluidas encontradas en las aplicaciones de tratamiento de agua y de efluentes líquidos.

Un sistema de torre rellena desorbedora típica está compuesto por una boquilla en su extremo superior para distribuir el agua contaminada sobre el relleno contenido en la columna, un ventilador para forzar al aire en contracorriente al flujo de agua y un colector en el extremo inferior para recoger el agua descontaminada. La **Figura 11** muestra un esquema de una instalación típica de torre rellena.

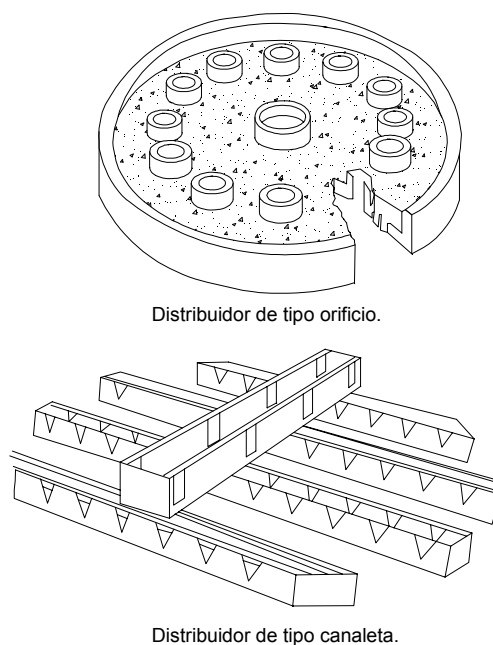
Las columnas se construyen de plástico reforzado con fibra de vidrio, aluminio, acero inoxidable o cemento. Dentro de la columna se coloca un separador de nieblas para evitar que se pierda agua con el venteo, material de relleno y distribuidores de líquido para separar el afluente en una gran cantidad de pequeñas corrientes. Los diseños de distribuidores de líquido que se utilizan con mayor frecuencia son del tipo placa con

orificios y de canaletas, que se pueden observar en la **Figura 12** y **Figura 13**. También pueden utilizarse distribuidores de boquillas spray o bien cabezales con orificios.



Fuente: EPA 625/4-89/023, 1990

**Figura 11.** Sistema de aeración de torre rellena



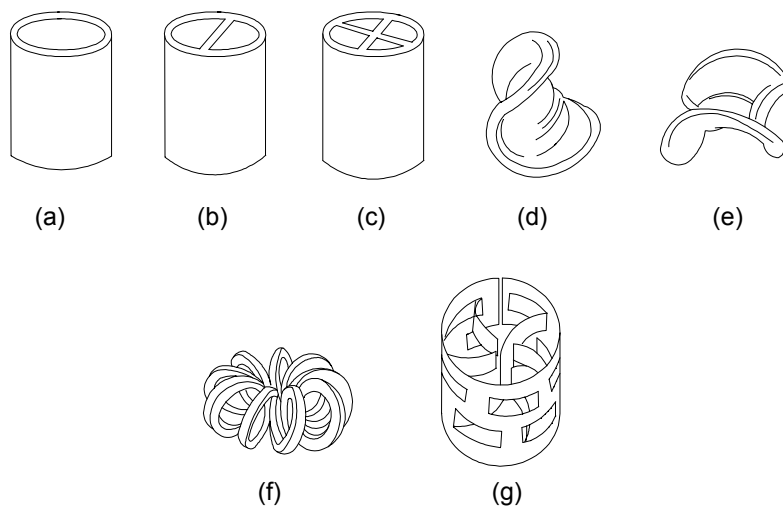
Fuente: EPA 625/4-89/023, 1990

**Figura 12.** Tipos de distribuidores

Fuente: EPA 625/4-89/023, 1990

**Figura 13.** Placa de distribuidor de tipo orificio utiliza en una torre rellena

El material de relleno está constituido por piezas individuales ubicadas irregularmente en la columna, presentándose de diversos materiales tales como cerámica, acero inoxidable y plástico. En la **Figura 14** se observan algunos de los materiales de relleno descritos con anterioridad. En general suelen utilizarse los rellenos plásticos por su bajo peso y costo, con respecto al resto de los materiales. También se utilizan rellenos ordenados, que se presentan en forma de lámina o planchas corrugadas y unidas entre sí, que se colocan cuidadosamente en la columna. Esta configuración ofrece mayores eficiencias, aunque su precio es mayor.



(a) anillo Raschig, (b) anillo Lessing, (c) anillo de partición, (d) monturas Berl, (e) monturas Intalox, (f) Tellerette, (g) anillo Pall.

Fuente: AWWA (1990)

**Figura 14.** Materiales de relleno utilizados en torres de desorción

Estos sistemas pueden ofrecer en algunos casos equipamiento auxiliar, consistente en un intercambiador de calor para mejorar la eficiencia de remoción, sistemas de control automático con controladores de nivel de líquido y de emisiones gaseosas, así como sistemas de tratamiento tales como unidades de carbón activado, equipos de oxidación catalítica o térmica.

Las expresiones matemáticas que describen el proceso de desorción, surgen de la aplicación de un balance de masa a lo largo de la columna y de ecuaciones cinéticas, que servirán para predecir la remoción que tendrá lugar en la torre. La **Figura 15** muestra en forma esquemática la sección transversal de una torre con una velocidad de aire **G** que asciende conteniendo las concentraciones **e** en el efluente e **i** en el afluente del gas. Por otra parte se tiene la velocidad de líquido **L** que contiene **c** cantidad del gas. Si no tiene lugar una reacción química, entonces se tendrá un balance de masa simple dado por la siguiente expresión:

$$\text{Pérdida del gas en la corriente gaseosa} = \text{Ganancia del gas en la corriente líquida}$$

Si la concentración del contaminante en la corriente gaseosa es muy diluida de modo que los volúmenes de aire y agua presentes no cambian por la pequeña transferencia del gas, entonces puede considerarse válida la siguiente expresión:

$$L \, dc = G \, dp \quad (3)$$

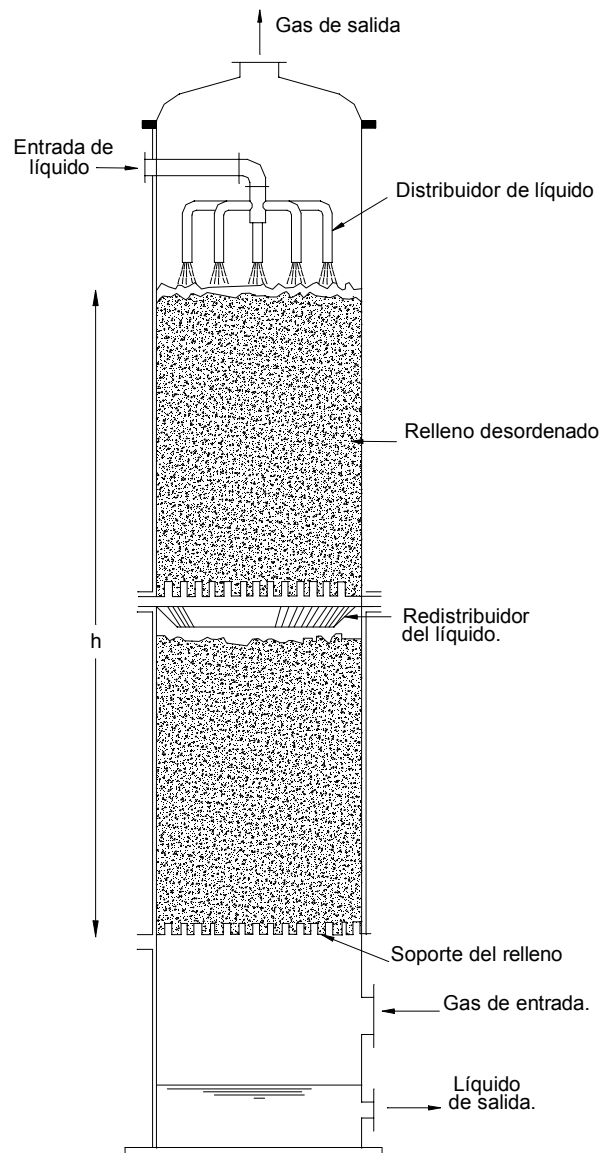
donde **L** es la velocidad del líquido y **G** la velocidad del gas.

Las velocidades de gas y líquido pueden expresarse utilizando diferentes unidades. Sin embargo debe tenerse cuidado para asegurar la consistencia de las mismas en la aplicación específica. Así, si la velocidad se expresa en m/s, la carga volumétrica debe estar expresada en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · s, la carga másica en kg/m<sup>2</sup> · s, y la carga molar en mol/m<sup>2</sup> · s. La conversión entre la carga másica y la velocidad se realiza utilizando la densidad del agua  $\rho_L$ , o del aire  $\rho_G$ , que se pueden encontrar en la **Tabla 6**, mientras que la conversión entre carga molar y velocidad puede realizarse utilizando el valor de concentración molar del agua (55,6 mol/L) o del aire, mediante la expresión: (mol de aire / V) = 1 / (0,082 · T), donde **T** es la temperatura (°K), y **V** el volumen (L).

Propiedades	Agua			Aire		
	10 °C	20 °C	30 °C	10 °C	20 °C	30 °C
Viscosidad $\mu$ , Kg/m · s	0,00131	0,0010	0,0008	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$
Densidad $\rho$ , Kg/m <sup>3</sup>	1.000	998	996	1,25	1,20	1,16
Tensión superficial <b>S</b> , n/m	0,074	0,073	0,071			

Fuente: AWWA (1990)

**Tabla 6.** Propiedades del aire y del agua



Fuente: AWWA (1990)

**Figura 15.** Torre de desorción

La ecuación cinética establece que para cualquier punto de la torre

$$\frac{dc}{dt} = K_L \cdot a \cdot (c_t - c_s) \quad (4)$$

$$dt = \frac{dc}{K_L \cdot a \cdot (c_t - c_s)}$$



Donde

$K_L$  = coeficiente de transferencia global, cm/h

$a$  = área interfacial específica =  $A / V$ ,  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$

$A$  = área interfacial a través de la cual se produce la transferencia,  $\text{cm}^2$

$V$  = volumen que contiene el área interfacial,  $\text{cm}^3$

$c_t$  = concentración en el seno del líquido al tiempo  $t$ , mg/L

$c_s$  = concentración en equilibrio con el gas al tiempo  $t$ , mg/L

Multiplicando por  $L$  ambos miembros, se obtiene:

$$L \cdot dt = dh = \frac{L \cdot dc}{K_L \cdot a \cdot (c_t - c_s)} \quad (5)$$

Donde  $dh$  es el diferencial de altura.

El término  $(c_t - c_s)$  es la fuerza impulsora de la reacción y cambia punto a punto, porque  $c_t$  cambia con la profundidad.

$$H = \frac{L}{K_L \cdot a} \cdot \int \frac{dc}{d \cdot (c_t - c_s)} = \frac{L}{K_L \cdot a} \cdot \iint \frac{dc}{d \cdot (c_t - c_s)} \quad (6)$$

Si se supone que las soluciones son diluidas, que la Ley de Henry es válida, y que la concentración del contaminante en la entrada de la corriente gaseosa es igual a cero, entonces se pueden presentar las ecuaciones en un formato más simple. En la simplificación, la altura del relleno la torre  $H$  expresada en m, se define como el producto de la altura de una unidad de transferencia (HTU) expresado en m, por el número de unidades de transferencia (NTU) requerido para la remoción deseada.

$$H = HTU \cdot NTU \quad (7)$$

La altura de una unidad de transferencia es un término artificial de la teoría de la transferencia de masa y que indica la altura del relleno que resultará en una cierta velocidad de remoción standard de un contaminante del agua.

La HTU es una función del medio de relleno, de las condiciones operativas y de las propiedades fisicoquímicas de la solución y del compuesto desorbido.

$$HTU = \frac{L}{K_L a \cdot C_o} \quad (8)$$

Donde:

$L$  = Carga de la corriente líquida [ $\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$C_o$  = Densidad molar del agua ( $55,6 \text{ kmol}/\text{m}^3$ )

$K_L a$  = Producto del coeficiente de transferencia de masa global del líquido  $K_L$  en m/s, y el área interfacial específica  $a$  en  $m^2/m^3$  en el medio de relleno.

El  $K_L a$  depende del compuesto a ser desorbido, el medio de relleno, y las cargas de agua y aire. Los valores de  $K_L a$  o de HTU pueden obtenerse a menudo de los fabricantes de los rellenos o bien de la literatura.

El número de unidades de transferencia es la porción integral de la expresión. Si se aplican las consideraciones anteriormente definidas, entonces la integral puede expresarse como:

$$NTU = \frac{R}{(R-1)} \cdot \frac{\ln(C_i / C_e) \cdot (R-1)}{R} \quad (9)$$

Donde:

$R$  = Factor de desorción

$C_i, C_e$  = Concentración de contaminante que ingresa y sale de la torre, respectivamente [mg/l]

$$R = \frac{H_A \cdot G}{P \cdot L} \quad (10)$$

Donde:

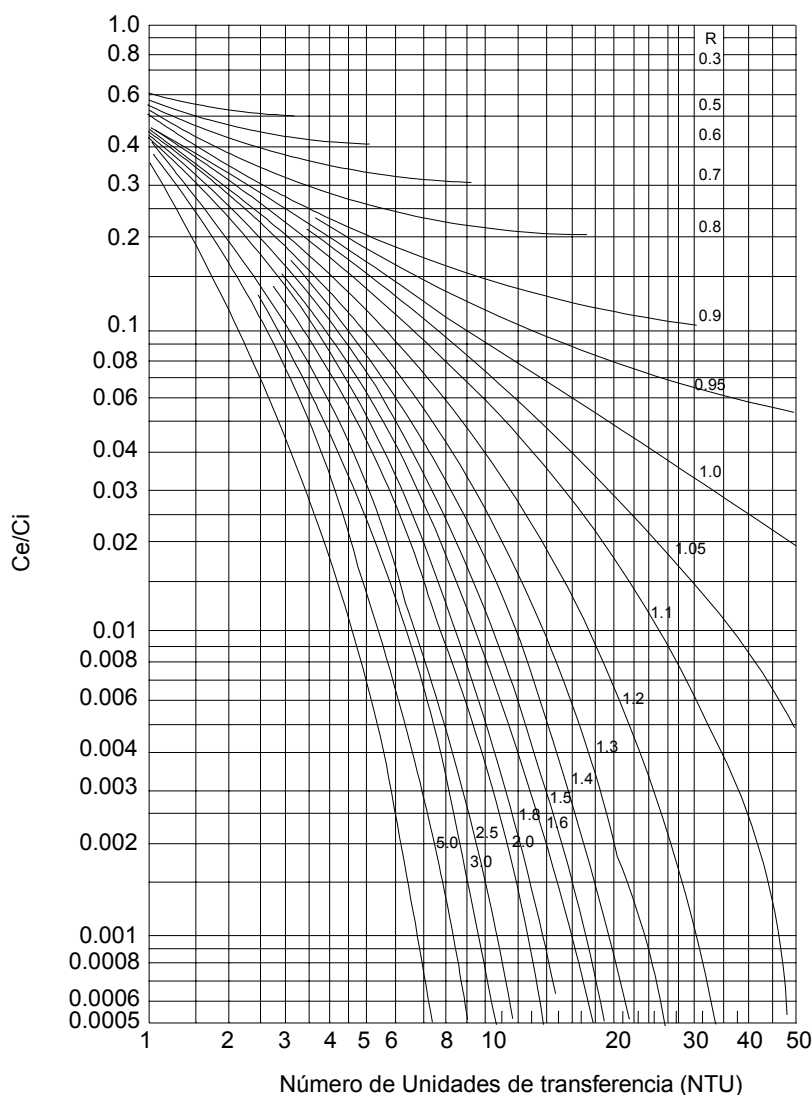
$P$  = Presión atmosférica [atm]

$G$  = Carga de aire [ $kmol/m^2 \cdot s$ ]

$H_A$  = constante de Henry [atm]

Uno de los factores que hace esta relación útil es que Treybal graficó la expresión que define a las NTU, de modo que conociendo el factor de desorción y la remoción deseada, NTU puede encontrarse rápidamente. Este gráfico se muestra en la **Figura 16**.

La configuración de torre rellena suele utilizarse también para la remediación de aguas subterráneas contaminadas.



Fuente: Awwa (1990)

**Figura 16.** Número de unidades de transferencia para absorbedores o desorbedores

Tal como se muestra en la **Figura 17**, para esta aplicación suele utilizarse un sistema compuesto por una boquilla spray en la parte superior de la columna, un soplador para forzar el aire en contracorriente con el flujo de agua y un colector en la base de la torre para recoger el agua tratada.

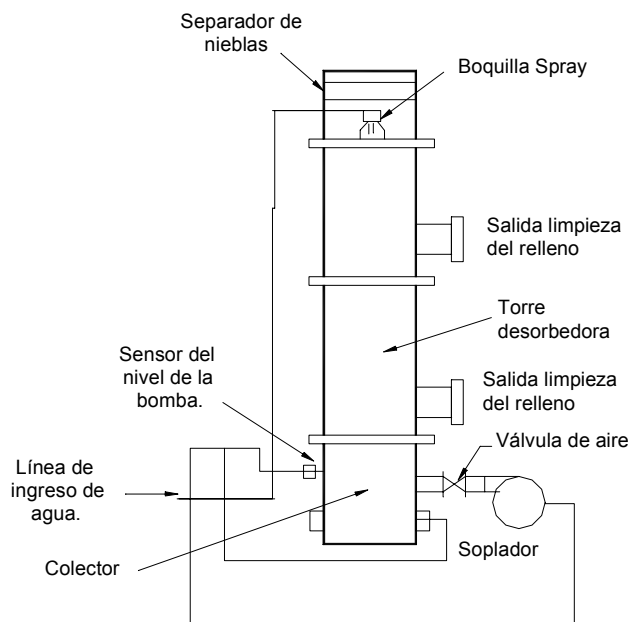
Esta tecnología resulta ineficiente para la remoción de contaminantes inorgánicos. La constante de la ley de Henry suele utilizarse para determinar si la desorción con aire será efectiva para la remoción de un compuesto dado. En general los compuestos orgánicos con constantes mayores que  $0,01 \text{ atmósferas} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$  pueden ser tratados por este tipo de tecnología. Algunos de los compuestos separados con éxito a través de la desorción con aire que se pueden mencionar son: benceno/tolueno/etilbenceno/xileno (BTEX), cloroetano, tricloroetileno (TCE), dicloroetileno (DCE), y percloroetileno (PCE).

Algunos de los factores que limitan la aplicabilidad y efectividad del proceso son:

- La presencia de compuestos inorgánicos, como por ejemplo hierro en concentración mayor a los 5 mg/L, o dureza mayor de 800 mg/L, o bien el ensuciamiento biológico del equipamiento que puede requerir un pretratamiento de la corriente de entrada o la limpieza periódica de la columna.
- El valor de la constante de la ley de Henry para los compuestos orgánicos volátiles presentes en la corriente de agua y la cantidad y tipo de relleno utilizado en la columna.
- Los compuestos con baja volatilidad a temperatura ambiente pueden requerir precalentamiento de la corriente de agua de ingreso al sistema.
- Los gases de salida pueden requerir de tratamiento adecuado antes de su descarga al ambiente.

La eficiencia de remoción típica para un sistema de torre de 4,6 a 6 metros de relleno se encuentra en el orden del 99%. Esta eficiencia puede mejorarse agregando otra torre en serie, calentando la corriente de agua contaminada, incrementando la relación aire/líquido, o precalentando la corriente de aire.

El principal inconveniente que presentan las torres rellenas es el obturamiento del relleno, que reduce la velocidad de flujo de aire. Este obturamiento puede producirse por oxidación de especies inorgánicas que ingresan con la corriente de agua de alimentación, tales como hierro y manganeso, por la precipitación de calcio, o por el crecimiento biológico sobre el material de relleno.



Fuente: Van Deuren J. Et.al (1997)

**Figura 17.** Torre rellena utilizada para la remediación de aguas subterráneas

## 4. LIMITACIONES

Por lo general, la aeración no es un método eficaz para la eliminación de los sabores y olores desagradables debido a que la mayor parte de las sustancias que provocan estas características no tienen la volatilidad suficiente. Este fenómeno puede observarse para el caso de los aceites esenciales de las algas, que se liberan cuando estos organismos se desintegran. Por ejemplo, se observó que cuando el organismo *Symura* era el que provocaba estas características, se lograba la eliminación de olores tan sólo en un 50% mediante el empleo de aeración.

Las funciones más importantes de la aeración son la eliminación del dióxido de carbono antes de la operación de ablandamiento con soda cáustica, cal y la adición de oxígeno destinada a la separación de hierro y manganeso. Sin embargo, las ventajas que se derivan de estos procesos no siempre están exentas de efectos adversos. En algunos casos, se observó que el oxígeno disuelto en el proceso de aeración acentuaba sus características corrosivas, obteniéndose aguas rojas en los sistemas de calefacción de agua.

Además, la aeración por sí sola no suele ser suficiente para producir la precipitación del hierro y manganeso en presencia de materia orgánica. En estos casos, la materia orgánica reacciona con ambos metales para formar complejos que no precipitan en forma satisfactoria por la aeración.

El empleo de aeradores después del tratamiento, o como único tratamiento de las aguas de pozo debería evaluarse cuidadosamente, especialmente si se tiene en cuenta que el agua puede estar expuesta a la contaminación bacteriana.

Cuando se desea aplicar el sistema de aeración para la remoción de dióxido de carbono del agua de abastecimiento o bien para el control de olores y sabores, es necesario evaluar el costo de la alternativa de adición de productos químicos que puedan cumplir con el mismo objetivo. Por ejemplo, en los casos en que el agua cruda de un sistema de abastecimiento presente un cierto contenido de dióxido de carbono, será necesario adicionar más cal para neutralizar el dióxido de carbono que se eliminaría por aeración. Algo similar puede verificarse al evaluar la cantidad de adsorbente, por ejemplo carbón activado en polvo (CAP), necesario para lograr un nivel de remoción de olor y sabor semejante al que se podría lograr por aeración.

## 5. CRITERIOS TÉCNICOS

### 5.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA

Para el caso de columnas rellenas la eficiencia de los sistemas de aeración se encuentra afectada por el tamaño de la columna y el flujo de aire, verificándose un aumento en la remoción al incrementar el flujo de aire y aumentar la altura de la columna.

Dentro de las consideraciones de diseño consideradas se puede hacer referencia a:

- Tipo de contaminante orgánico
- Concentración de contaminante
- Tipo de material de relleno
- Altura del material de relleno
- Relación aire/agua
- Caudal de la corriente líquida
- Temperatura de la corriente líquida

En la **Tabla 7** que se presenta a continuación se resumen los parámetros de diseño típicos para algunos compuestos orgánicos volátiles que se encuentran con frecuencia en el agua de abastecimiento.

Compuesto	Constante de Henry	Relación aire/agua	Altura del desorbedor de aire [m]	Diámetro de la columna rellena [m]
Tricloroetileno	0,116	29,9	11,41	2,43
Tetracloroetileno	0,295	11,8	13,13	1,79
Tetracloruro de carbono	0,556	6,2	13,46	1,49
1,1,1 – Tricloroetano	0,172	20,1	12,02	2,12
1,2 – Dicloroetileno	0,023	150,6	10,04	4,47
Diclorometano	0,048	71,59	8,58	3,34
cis – 1,2 –Dicloroetileno	0,093	37,10	10,46	2,62
Cloruro de vinilo	265,000	0,013	17,87	0,57
Benceno	0,106	32,69	10,88	2,51
Tolueno	0,117	29,62	11,71	2,42
m – Xileno	0,093	37,26	12,15	5,50
Clorobenceno	0,069	50,29	11,28	6,82
1,2 – Diclorobenceno	0,090	38,67	12,14	2,66

Notas: <sup>a</sup> Caudal líquido: 8200 m<sup>3</sup>/d, concentración en el agua de ingreso: 100,0 µg/l, objetivo de tratamiento del agua: 1,0 µg/l, temperatura del aire en la columna: 10 °C, caída presión del aire en el relleno: 50,0 (N/m<sup>2</sup>)/m de relleno, material de relleno: monturas plásticas de 3 pulgadas

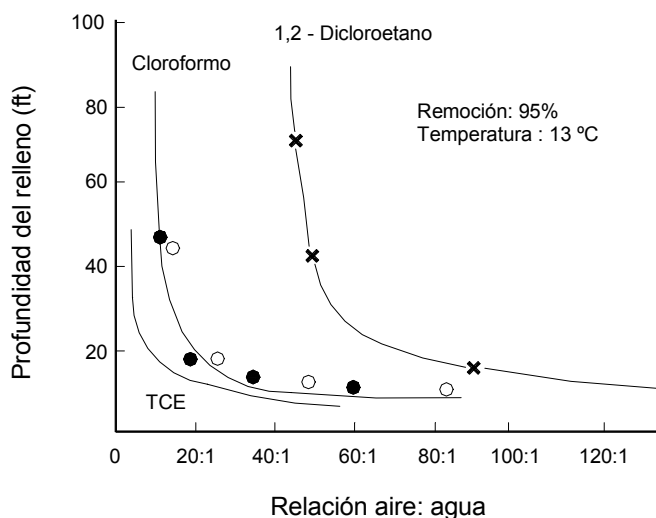
**Tabla 7.** Parámetros de diseño típicos para la remoción de compuestos orgánicos volátiles más frecuentes <sup>a</sup>

Según el tipo de contaminante, se requerirá de diferentes diseños para poder lograr el grado de separación requerido. De la **Tabla 7** surge que la aplicabilidad de la aeración será función de la volatilidad del contaminante y por lo tanto del valor que adopte su Constante de Henry.

Los materiales de relleno están diseñados para proveer en forma simultánea una caída de presión baja a lo largo del lecho y un área de contacto aire/agua máxima. En general, están contruidos de plástico o cerámica y se presentan en las siguientes formas: super intalox, tellerettes, tri-packs, anillos pall, monturas berl y anillos Raschig (**Figura 14**). Según el nivel de remoción deseado para el contaminante y la relación aire/agua se determinará la altura del material de relleno.

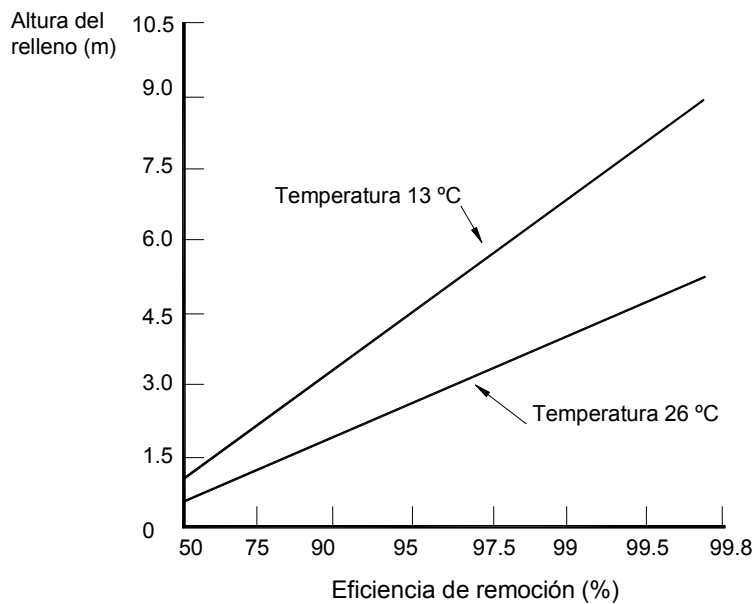
La relación aire/agua en la columna es función de la temperatura del agua y del nivel deseado de remoción del contaminante. Esta relación determina el tamaño del soprador del sistema, el cual constituye la parte principal de los costos operativos de los sistemas de torres rellenas. El rango típico de la relación aire/agua está comprendido entre 30/1 y 100/1. La carga superficial de agua está comprendida entre 60 y 73 (m<sup>3</sup>/h)/m<sup>2</sup>, mientras que el diámetro de la columna asumirá un valor derivado de la carga aplicada.

Estos factores afectan la eficiencia de remoción en forma significativa. Así por ejemplo, en la **Figura 18** se puede observar la gran diferencia en las velocidades de remoción obtenidas con el mismo espesor de relleno para tres contaminantes distintos. Por otra parte, en la **Figura 19** se presenta un gráfico para el tricloroetileno, en el cual puede observarse que ante un aumento de la temperatura del agua se obtiene una disminución en la altura del relleno para alcanzar el mismo nivel de remoción de contaminante.



Fuente: EPA 625/4-89/023 (1997)

**Figura 18.** Efecto del tipo de contaminante en el diseño de la torre rellena



Fuente: EPA 625/4-89/023 (1997)

**Figura 19.** Altura del relleno vs. Eficiencia de remoción para el tricloroetileno

Para el caso de la aeración difusa, las consideraciones críticas de diseño del proceso son:

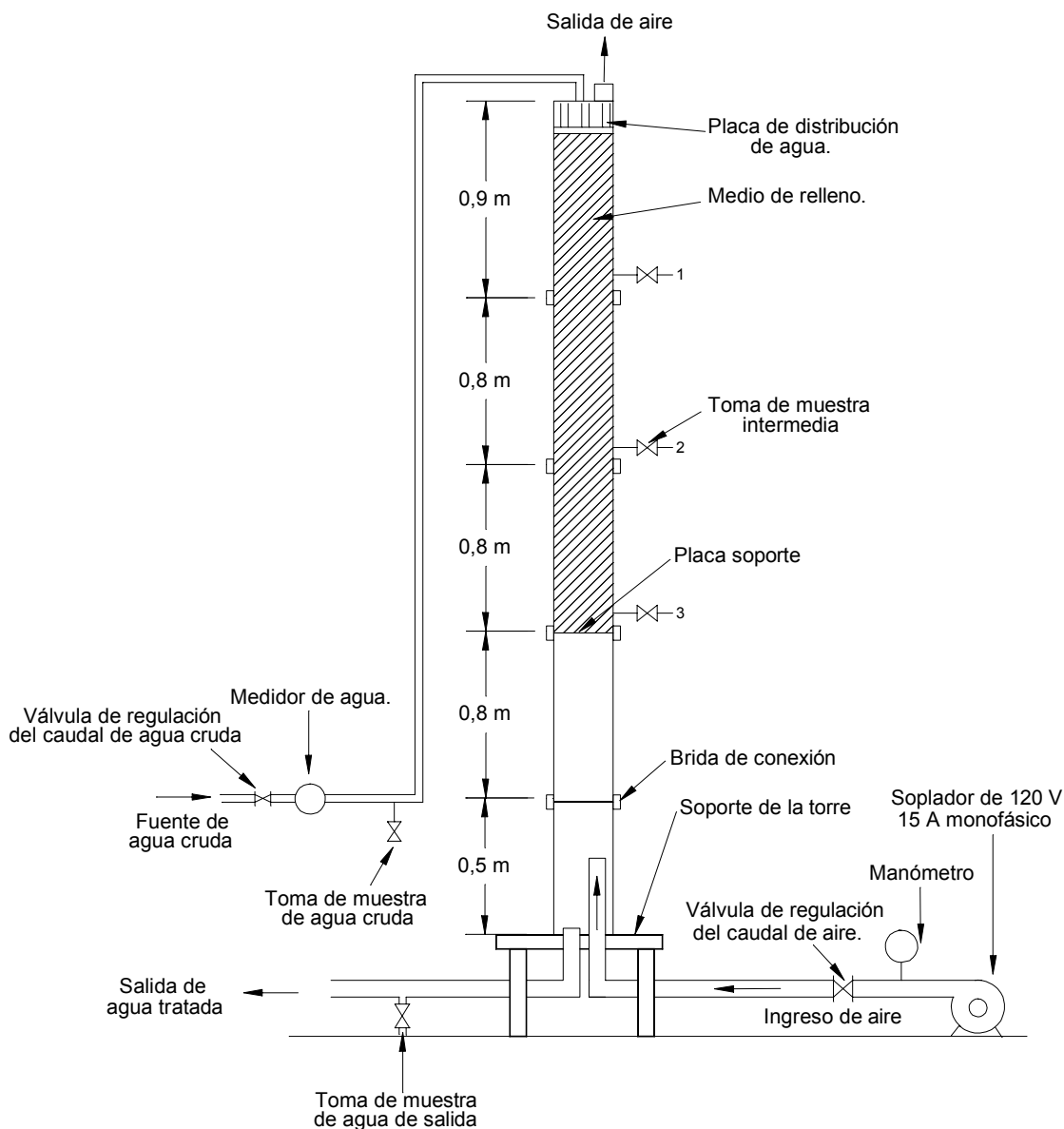
- Tipo de difusor y tamaño de las burbujas de aire
- Profundidad de la cámara: 1,5 a 3 metros
- Relación aire-agua: 5:1 a 15:1
- Tiempo de retención: 10 a 15 minutos
- Aspectos hidráulicos de la cámara de aeración

Una de las consideraciones de diseño más importantes para el caso de difusores es el método de introducción del aire y el tamaño de burbuja resultante. Los difusores de aire utilizan placas porosas, tubos, o cañerías perforadas ubicadas a lo largo del fondo o lados de la cámara. Los aspectos hidráulicos de la cámara de aeración afectan la uniformidad con la cual tiene lugar el proceso de aeración, y en consecuencia, la integridad de la remoción. En general, el método aplicado para asegurar las condiciones hidráulicas adecuadas es la incorporación de baffles que permitan obtener condiciones de flujo pistón.



## 5.2. APLICACIÓN DE ESTUDIOS A ESCALA PILOTO

Las columnas a escala piloto suelen utilizarse para evaluar el impacto de las distintas cargas de alimentación aportadas por la corriente de agua, el efecto de los distintos flujos de aire, las relaciones aire-agua y la importancia del material de relleno. En la **Figura 20** se presenta un diagrama esquemático de un sistema de torre rellena a escala piloto típico.



Fuente: EPA 625/4-89/023 (1997)

**Figura 20.** Sistema de torre rellena a escala piloto

Para asegurar que los resultados de los ensayos a escala piloto sean precisos, puede resultar conveniente tomar las siguientes precauciones:

- Colocar cuidadosamente el material de relleno en la columna para evitar canalizaciones y espacios vacíos.
- Nivelar la columna para evitar canalizaciones y efectos de pared.
- Seleccionar puntos representativos para la toma de muestras.
- Recoger y analizar muestras duplicadas para comparar y verificar los resultados obtenidos.
- Verificar los resultados de laboratorio.

### 5.3. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En general, las columnas rellenas se operan en forma automática, aunque suele requerirse de una visita diaria que permita verificar que todo el equipamiento esté trabajando en forma satisfactoria. Los requerimientos de mantenimiento generalmente consisten en una cantidad de horas mensuales para realizar una inspección y mantenimiento preventivo de los motores de las bombas y del soplador como así también reemplazar los filtros de aire.

En algunas instalaciones de torres rellenas se han registrado dificultades relacionadas con el ensuciamiento del material de relleno y una distribución del líquido inadecuada.

### 5.4. EFICIENCIA DEL SISTEMA

Los sistemas de torres rellenas son procesos eficientes que permiten remover la mayoría de los compuestos orgánicos que presentan valores elevados de la constante de Henry y que pueden ser aplicados a plantas de tratamiento de agua de diversos tamaños. En la **Tabla 8**, se resumen las eficiencias de remoción de diversos compuestos orgánicos volátiles. Estos valores, que van desde el 11 al 95%, están basados en unidades de aeración difusa que emplean relaciones aire-agua comprendidas entre 5:1 a 15:1 y tiempos de contacto de 10 a 15 minutos.

Compuesto	Remoción [%]
<i>Compuestos Orgánicos Volátiles</i>	
Tricloroetileno	53 – 95
Tetracloroetileno	73 – 95
1,2- Dicloroetano	42 – 77
1,1- Dicloroetileno	97
1,1,1- Tricloroetano	58 – 90
<i>Compuestos Orgánicos Sintéticos (SOC's)</i>	
Carbofurano	11 – 20
1,2-Dicloropropano	12 – 79
cis-1,2- Dicloroetileno	32 – 85
trans-1,2- Dicloroetileno	37 – 96
o- Diclorobenceno	14 – 72
Etilbenceno	24 – 89
Monoclorobenceno	14 – 85
Tolueno	22 – 89
Xilenos	18 - 89

Fuente: EPA 625/4-89/023

**Tabla 8.** Eficiencias de remoción típicas para sistemas de aeración difusa

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Air Stripping and Aeration (Chapter 5) - Cornwell D. - Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies - Awwa, Fourth Edition (1990).
- Aireación (Capítulo 2) - Romero Rojas J. - Acuípurificación. Diseño de sistemas de purificación de aguas. - Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería (1995).
- Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Volume I - WEF (1992).
- Environmental Pollution Control Alternatives: Drinking Water Treatment for Small Communities - USEPA, Technology Transfer. EPA/625/5-90/025 (1990).
- Manual of Small Public Water Supply Systems.-USEPA, Office of Water. EPA/570/9-91/003 (1991).
- Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 3rd Edition - Van Deuren J., Ledbetter J. - USEPA (1997).
- Technologies for Upgrading Existing or Designing New Drinking Water Treatment Facilities - USEPA, Office of Drinking Water. EPA/625/4-89/023 (1990).
- Toxicity Reduction in Industrial Effluents - Lankford P, Eckenfelder JR. W. - (1990).
- Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, and Reuse - Metcalf & Eddy Inc. - Mc Graw-Hill (1991).