

EL TRATAMIENTO DEL AGUA PARA ABASTECIMIENTOS(*)

Por LUIS DE TORRES RIVADEMAR

Dr. Ingeniero Industrial.

Un abastecimiento de agua a un núcleo de población debe resolver tres problemas fundamentales: el primero, conducir a los puntos de utilización el agua precisa para satisfacer la demanda; el segundo, garantizar en el agua distribuida la calidad exigida por las normas sanitarias vigentes; el tercero, obtener los dos objetivos anteriores con un costo razonable, acorde con las posibilidades y hábitos económicos del país.

El objeto de este trabajo es presentar, en forma de síntesis dirigida al técnico no especializado en el tema, los métodos que actualmente se utilizan para obtener la calidad exigida al agua destinada al consumo; naturalmente, los métodos a los que dedicaremos nuestra atención preferente son aquellos que dan un resultado satisfactorio, tanto desde el punto de vista cuantitativo (métodos aptos para tratar caudales congruentes con las necesidades) como desde el punto de vista económico (precio de tratamiento dentro de los límites de las tarifas normales en uso).

Se ha dividido la exposición en las siguientes etapas sucesivas:

- Fuentes de agua para abastecimientos: Sus características generales.
- Impurezas del agua natural: Definición, valores frecuentemente encontrados en el agua bruta o natural, límites admisibles en el agua distribuida.
- Características límites convenientes en el agua bruta para abastecimientos.
- Procesos de tratamiento para corregir las impurezas: Secuencia de los procesos, definición y fundamento de cada proceso, resultados a esperar del mismo, aparatos en que se realiza, idea de las dimensiones fundamentales de los aparatos.
- Posibilidad de reutilización del agua.

1. Consumo de agua.

En un abastecimiento, la cantidad de agua distribuida ha de satisfacer la demanda doméstica (consumo en las viviendas), la demanda comercial e industrial (hostelería, talleres, industrias pequeñas y medianas que se abastecen de la distribución general), consumos públicos (limpieza, riego de calles y jardines, etc.) y, finalmente, otros diversos consumos y pérdidas en la red de distribución.

La suma de estas demandas, dividida por el número de habitantes servidos, da el consumo per cápita, índice universalmente utilizado para evaluar las necesidades de agua de una población.

En España, el consumo per cápita (promedio anual) varía entre unos 100 a 125 litros por día para pequeñas poblaciones rurales, prácticamente sin industria; y unos 500 litros por día en poblaciones muy grandes, de nivel industrial y comercial elevado. El valor más frecuente, en poblaciones de 100.000 a 300.000 habitantes, con un nivel medio de industria y comercio, puede estimarse en unos 250 a 350

litros/habitante/día. Este consumo global se descompone, de forma aproximada, en:

	%
Consumo doméstico	35
Consumo comercial e industrial	30
Consumo público	10
Consumos no registrados	25

Como puede verse, estos porcentajes dan un consumo *doméstico* por habitante del orden de 80 a 120 litros/día, que es fácil comprobar está de acuerdo con los valores reales de distribución a viviendas. Es curioso notar que, de esta cantidad, tan sólo una cuarta o quinta parte corresponde a agua realmente en contacto con alimentos, o directamente consumida por el hombre; por tanto, tan sólo unos 20 litros de agua, de los 250 ó 350 distribuidos, deberían cumplir rigurosamente las normas de potabilidad. El tratar los 230 ó 330 litros restantes con las mismas exigencias que el agua a consumir, constituye, en la actualidad, un lujo, cuyo origen ha sido, paradójicamente, la obtención de una economía en la distribución (cuando el costo de agua potable era despreciable), evitando la doble red, que en algunas poblaciones existió en épocas anteriores.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1972.

2. Fuentes de agua para el consumo.

La captación de agua para el abastecimiento de núcleos urbanos puede hacerse de diversos orígenes, que podemos clasificar en cuatro grupos:

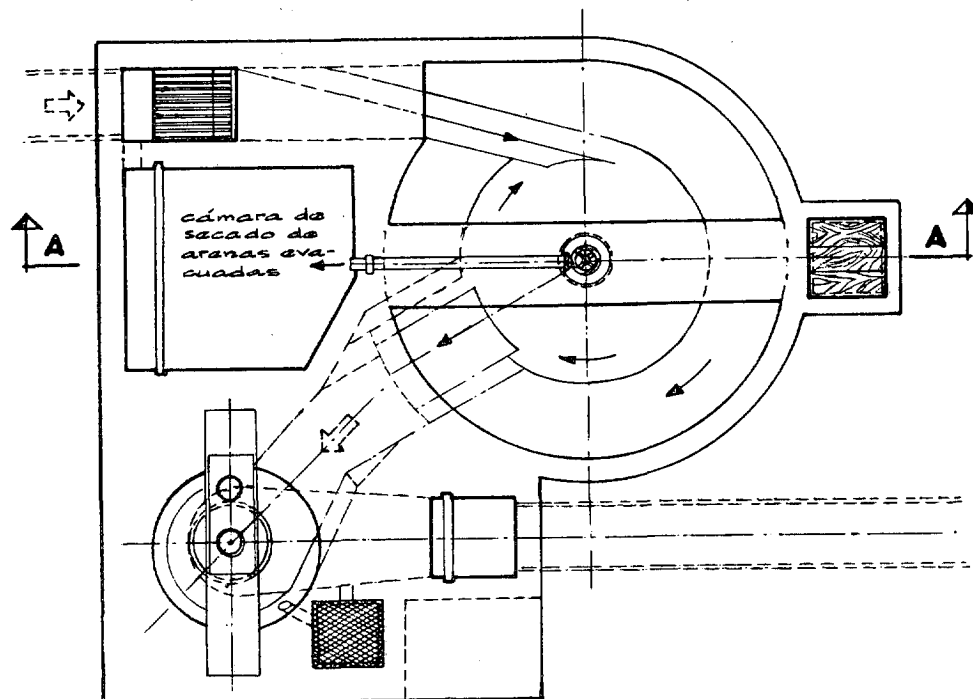
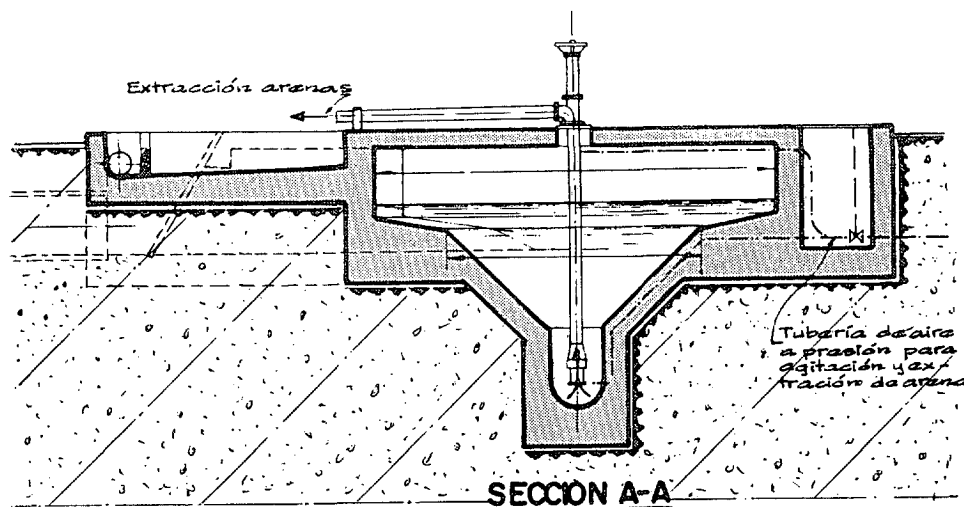
2.1. Aguas subterráneas.

Fuentes o manantiales naturales, pozos ar-

tesianos, pozos, galerías de infiltración natural, o galerías o pozos alimentados por recarga artificial de la capa freática.

Estas aguas son, en general, física y bacteriológicamente puras, sin color, turbiedad ni materia en suspensión; por el contrario, desde el punto de vista químico, presentan frecuentemente concentraciones importantes de sales disueltas, cedidas por los terrenos, a través de los cuales se han filtrado.

Requieren, en estos casos, tratamientos quí-



Desarenador troncocónico.

micos para reducir su salinidad total, su dureza, etc.

2.2. Aguas superficiales.

Canales, lagos naturales, ríos (generalmente con embalses de regulación para el mejor aprovechamiento del caudal anual).

Estas aguas, si proceden de regiones calcáreas, suelen presentar turbiedad elevada por partículas en suspensión; coloración nula o fácilmente eliminable por filtración; pH elevado (7,5 a 8,5); alcalinidad alta (100 o más mg/litro); materia orgánica baja.

Si las aguas superficiales proceden de regiones graníticas o esquistosas, suelen ser claras; con coloración fuerte, no eliminable por filtración; pH bajo (5,5 a 7); alcalinidad baja (2 a 50 mg/litro); materia orgánica elevada.

2.3. Agua de lluvia.

Captada en los techos y recogida en cisternas para pequeños suministros individuales, o recogida en cuencas artificialmente preparadas y almacenada en depósitos de cierta magnitud, para comunidades algo más importantes.

2.4. Agua de mar (o aguas salobres en zonas desérticas).

Las fuentes 2.1 y 2.2 son utilizadas para la inmensa mayoría de los abastecimientos importantes; la captación de agua de lluvia (2.3), de forma directa, es únicamente usada en núcleos familiares aislados en regiones secas; y el agua de mar (o el agua salobre) es todavía poco usada como fuente de suministro importante, aunque últimamente se viene recurriendo a ella para resolver problemas en ciudades costeras de media y aún de gran importancia, para completar otros recursos que, por sí solos, no permitirían el desarrollo de los núcleos de población en cuestión.

3. Impurezas del agua natural: su corrección.

El cuadro 3.1 resume las impurezas más frecuentes en el agua natural, así como los lími-

tes convenientes y tolerables fijados por la legislación española vigente (B.O.E., núm. 253, del 23 de octubre de 1967) y los procesos unitarios para su corrección.

La mayor parte de las impurezas señaladas en el cuadro quedan claramente definidas con su solo enunciado; pero algunas de ellas merecen, a nuestro juicio, que el concepto se defina con más detalle.

3.1. Turbiedad.

La turbiedad se debe entender expresamente como la propiedad óptica de una muestra, que hace que los rayos luminosos se dispersen y absorban, en lugar de transmitirse en línea recta. El cieno procedente de tierra vegetal, materia orgánica finamente dividida, la precipitación de carbonato cálcico en todas las aguas, la precipitación de hidróxido aluminico en aguas tratadas y del hidróxido de hierro en las aguas corrosivas, los microorganismos y otros materiales pueden producir turbiedad. La turbiedad debe medirse en unidades Jackson o internacionales, mejor que en mg/l o p.p.m.; pero aunque se utilice esta unidad (por comparación con soluciones patrón de Kieselguhr), debe entenderse claramente que *no existe relación entre el valor de la turbiedad y la concentración, en peso, de sólidos en suspensión en el agua*, ya que el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas afectan al valor de la turbiedad más que la concentración y peso específico de las mismas.

3.2. Color.

El color es la propiedad que tienen las aguas de presentar una tonalidad variable, debida a los materiales disueltos y a los suspendidos en el agua, y a la absorción de las radiaciones luminosas de mayor longitud de onda. El color aparente es el que presenta el agua bruta, y en su medida, interfiere notablemente la turbiedad, aunque muy ligera, incrementándolo en alta proporción; y el color verdadero se debe a sustancias en solución, y debe medirse en muestras, en las que, por centrifugación, se haya eliminado la turbiedad. Su medida se hace por comparación con una solución patrón de cloroplatinato potásico (K_2PtCl_6) y cloruro cobaltoso

cristalizado ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), considerándose la unidad el color de la solución con 1 mg de platino por litro.

3.3. *Materia viva.*

Aparecen también en el agua organismos vivos, como las bacterias o virus, el fitoplancton y el zooplancton. Los primeros, bacterias o vi-

rus, constituyen un riesgo sanitario grave, y por ello han de eliminarse o inactivarse por la acción de cloro, ozono u otros bactericidas, y por floculación bien ajustada (reduce los virus en 95 a 99 por 100). El control de su eliminación se establece observando otros microorganismos más fáciles de detectar, que son los mencionados en el cuadro 3.1.

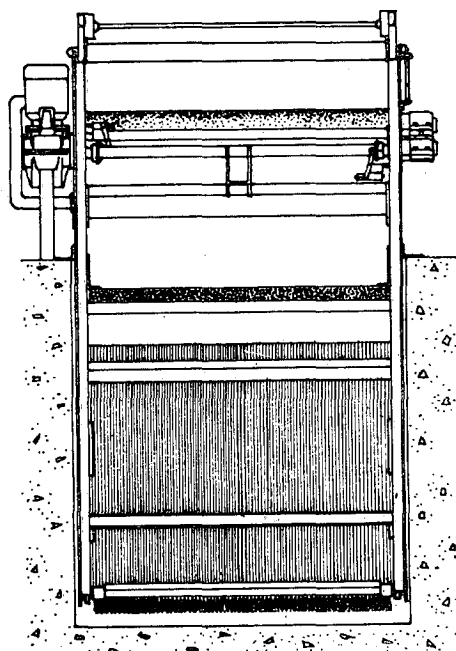
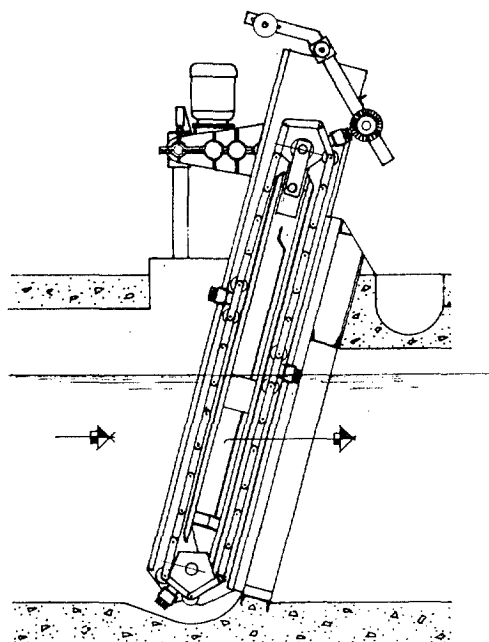
Aunque sanitariamente inocuos, son perjudiciales, tanto para los procesos de tratamiento como para la buena apariencia del agua, el plancton vegetal (algas) o animal (protozoos, rotíferos). Estos organismos, en condiciones adecuadas (presencia de CO_2 , luz, calor, etc.), presentan coeficientes de crecimiento formidables, y pueden dar lugar a serios inconvenientes por alteración del pH del agua, atascamiento de los filtros y secreción de sustancias que dan sabor u olor al agua. Para eliminarlos, es preciso proceder a una supercloración, que los mata o reduce suficientemente su actividad, para que puedan ser retenidos por floculación y filtración.

3.4. *Otras sustancias o componentes extraños.*

Evidentemente, aparte de las sustancias naturales normales, pueden aparecer en el agua toda suerte de otros productos, procedentes de fuentes naturales (sulfhídrico, sulfuroso, etc.), o de vertidos de otros utilizadores (compuestos químicos simples o complejos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, sustancias radiactivas, tóxicos, etc.). La legislación fija límites para las que se indican en el cuadro 3.1. La multiplicidad de las sustancias posibles y su escasa frecuencia hacen impracticable el estudio de todas y cada una de ellas. Su existencia en el agua ha de ser corregida eliminando los vertidos que introducen las sustancias en cuestión, previamente a su captación para el tratamiento.

4. **Calidad precisa del agua bruta en las fuentes de abastecimiento.**

Técnicamente, puede decirse que cualquier agua bruta es susceptible de convertirse en potable aplicando los tratamientos necesarios. Prácticamente, sin embargo, no se considera aceptable un agua bruta si su potabilización exige tratamientos cuya complejidad, inseguridad o costo excedan los niveles tecnológicos actuales de las instalaciones clásicas de tratamiento.



Rejilla filtrante automática, tipo banda sin fin.

CUADRO 3.1. — Tratamiento del agua para abastecimiento. (Impurezas del agua natural. Límites admisibles en agua tratada.)

DESIGNACION	FORMULA	NATURALEZA	UNIDAD DE MEDIDA	INCONVENIENTES QUE PRODUCE EN EL USO	VALORES NORMALES EN AGUA NATURAL
Materias flotantes.	—	Sólidos, densidad ≤ 1 , de origen vegetal generalmente. Dimensiones: Varios milímetros o centímetros (hojas, ramas, tubérculos, etc.).	Litros/m ³ .	Produce obstrucciones en tuberías, bombas, etc.	Variable.
Sólidos en suspensión.	—	Partículas insolubles, de dimensión superior a 0,05 mm.	mg/litro (ppm).	Producen depósitos en puntos de baja velocidad. En el caso de arenas, producen la abrasión de tuberías, bombas, etc., y obstrucciones.	0 ÷ 10.000 ppm. 30.000 ppm (avenidas).
Grasas y aceites.	Múltiples.	Se expresan como materia separable por extracción con cloroformo o éter. Procede de vertidos residuales, no naturales.	mg/litro.	Dan mal aspecto al agua. Se une a los sólidos en suspensión, dando aglomerados que producen obstrucciones.	0 ÷ 10 ppm. Procede de vertidos.
Turbiedad.	—	Interferencia producida por materia muy fina en suspensión, al paso de la luz. Se debe a partículas finamente divididas, como yeso, arcilla, fango o materia orgánica.	Unidades Jackson o mg/l de suspensión Kieselguhr que produce igual interferencia.	Aspecto desagradable al agua. Mancha la ropa. Puede afectar a los alimentos. El agua turbia es sospechosa de contaminación.	0 ÷ 200 uds. normal. Hasta 30.000 en casos especiales.
Color.	—	Aspecto visual producido por materia orgánica coloidal o disuelta, generalmente de origen vegetal. También por hierro coloidal. Se mide por comparación con un patrón de platino-cobalto disuelto.	Unidades de color (corresponden a mg/l de Pt en el patrón).	Aspecto desagradable agua agua. Puede perjudicar en operaciones de limpieza.	0 ÷ 50 uds. Hasta 300 uds. en casos especiales.
Materia orgánica.	—	Materia vegetal o animal oxidable por permanganato o dicromato potásico.	mg/litro de O ₂ tomado al KMnO ₄ o K ₂ Cr ₂ O ₇ .	Es medio propicio para desarrollo de bacterias. Un contenido alto de M.O. es indicio de contaminación.	0 ÷ 10 mg O ₂ /l.
Alcalinidad.	[HCO ₃ ⁻] + [CO ₃ ⁼] + [OH ⁻]	Iones en solución. Mesurable por viraje de anaranjado de metilo.	ppm como CaCO ₃ grados franceses. 1° F 10 ppm CaCO ₃ .	Al añadir álcalis al agua puede producir precipitados.	0 ÷ 50° F.
Dureza cálcica.	[Ca ⁺⁺]	Iones en solución. Mesurable por licor Boutron Boudet (a la vez que Mg), o por el método de las complexonas.	ppm como CaCO ₃ grados franceses.	Consume jabón. Se cuencen mal las legumbres. Produce incrustaciones en utensilios de cocina. Afecta al lavado.	0 ÷ 50° F.
Dureza magnésica.	[Mg ⁺⁺]	Iones en solución.	ppm como CaCO ₃ grados franceses.	Consume jabón. Con SO ₄ ⁼ produce efectos laxantes (sal de Epsom).	0 ÷ 20° F.
Hierro + Manganeseo.	[Fe ⁺⁺] [Fe ⁺⁺⁺] [Mn ⁺⁺]	Iones en solución. Sales orgánicas (humatos). Bicarbonatos o hidróxidos.	mg/litro (ppm).	Da lugar al problema de agua roja o negra, por oxidación en las conducciones. Mancha la ropa. Produce precipitados en las tuberías.	Fe 0 ÷ 3 ppm. Mn 0 ÷ 0,5 ppm.
Cloruros.	[Cl ⁻]	Iones en solución.	mg/litro (ppm) °F.	Da sabor salado al agua. En cantidades altas la hace corrosiva.	0 ÷ 160 ppm.
Sulfatos.	[SO ₄ ⁼]	Iones en solución.	mg/litro (ppm) °F.	Puede dar sabor amargo. Con Mg produce efectos laxantes.	0 ÷ 300 ppm.
Nitratos.	[NO ₃ ⁻]	Iones en solución.	mg/litro (ppm) °F.	En estómago infantil pueden reducirse a nitritos, que empobrecen luego la sangre en oxígeno.	0 ÷ 15 ppm.
Sales disueltas.	—	Iones en solución.	mg/litro (ppm).	Dan sabor al agua, la hacen más corrosiva.	0 ÷ 1.000 ppm.
Acidez pH.	Log pH 1/H ⁺	Iones H ⁺ u OH ⁻ en solución.	Número abstracto.	Mide la acidez. pH < 7 agua ácida; pH > 7 agua básica.	6 ÷ 8.
Bacterias aerobias.	—	Recuento total de bacterias aerobias incubadas en agar durante veinticuatro horas a 37° C.	Número colonias/cm ³ .	Indica contaminación por vertidos.	—
Estreptococos anaerobios coliformes.	—	Coliformes, estreptococos y cloridrios sulfo-reductores en 100 cm ³ de agua. (Indicadores de gérmenes patógenos).	Número individuos/100 cm ³ (M.P.N.).	Estreptococos <i>faecalis</i> indica contaminación fecal en general. <i>Clostridium welchii</i> indica contaminación fecal antigua, si no aparecen <i>E. coli</i> u otros coliformes.	—
<i>Escherichia coli</i> .	—	<i>E. coli</i> o bacteriófagos anti <i>E. coli</i> o anti <i>Shigella</i> . (Indicadores de gérmenes patógenos.)	Número individuos/100 cm ³ (M.P.N.).	<i>Escherichia coli</i> indica contaminación fecal reciente y riesgo inmediato de gérmenes patógenos.	—
Componentes extraños.	—	Iones Al, Cu, Zn, Pb, Se, As, Cr, F, CN; fenóles; radiactividad. Sustancias que proceden de vertidos extraños al agua natural.	—	Nocivos para la salud del hombre.	Nulos.

LÍMITES EN AGUA TRATADA		PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA LA CORRECCION DE LA IMPUREZA
Conveniente	Tolerable	
0	0	1. Filtración mecánica.
—	—	1. Filtración mecánica. 2. Desarenado. 4. Sedimentación simple.
—	—	3. Desengrase. 6-8-9. Coagulación-decantación-filtración. 10. Adsorción por carbón activo. 17. Filtros de celulosa o diátomeas.
≤ 5 uds.	≤ 10 uds.	6-9. Coagulación-filtración sobre arena. 6-8-9. Coagulación-decantación-filtración sobre arena.
≤ 5 uds.	≤ 15 uds.	6-8-9. Coagulación-decantación-filtración sobre arena. 4. Pre-cloración. 10. Adsorción por carbón activo. 16. Ozonización.
≤ 3 mg/l.	≤ 3 mg/l.	6-8-9. Coagulación-decantación-filtración. 5. Pre-cloración. 10. Adsorción por carbón activo.
—	—	No se desea corregirla, puesto que no perjudica. Se reduce a la vez que la dureza.
≤ 25° F.	≤ 50° F.	7-8-9. Precipitación química-decantación-filtración. 13. Intercambio iónico. 14. Destilación. 15. Osmosis inversa.
≤ 20,5° F.	≤ 41° F.	7-8-9. Precipitación química-decantación-filtración. 13. Intercambio iónico. 14. Destilación. 15. Osmosis inversa.
≤ 0,2 ppm.	≤ 0,3 ppm.	12. Oxidación-filtración. 6-8-9. Coagulación-decantación-filtración. 13. Intercambio iónico. 19. Agentes secuestrantes.
≤ 250 ppm.	≤ 350 ppm.	13. Intercambio iónico. 14. Destilación. 15. Osmosis inversa.
≤ 200 ppm.	≤ 400 ppm.	13. Intercambio iónico. 14. Destilación. 15. Osmosis inversa.
≤ 30 ppm.	≤ 30 ppm.	13. Intercambio iónico. 14. Destilación. 15. Osmosis inversa.
≤ 750 ppm.	≤ 1.500 ppm.	13. Intercambio iónico. 14. Destilación. 15. Osmosis inversa.
7 ÷ 8,5	6,5 ÷ 9,2	18. Neutralización con bases o ácidos (según convenga).
≤ 50 ÷ 65 col/cm³	≤ 100 col/cm³	6-8-9. Coagulación-decantación-filtración. 11. Esterilización. 16. Ozonización.
0 $\frac{\text{gér.}}{100 \text{ cm}^3}$	1 ÷ 2 $\frac{\text{gér.}}{100 \text{ cm}^3}$	6-8-9. Coagulación-decantación-filtración. 11. Esterilización. 16. Ozonización.
0	0	6-8-9. Coagulación-decantación-filtración. 11. Esterilización. 16. Ozonización.
Varios.	Varios.	Iones metálicos: 7. Precipitación. 13. Intercambio iónico. CN—: Oxidación con cloro a CNO— y Cl₂ y N₂. Fenoles: 10. Adsorción carbón activo. 16. Ozonización.

CUADRO 5.1. — Tratamiento del agua para abastecimiento.

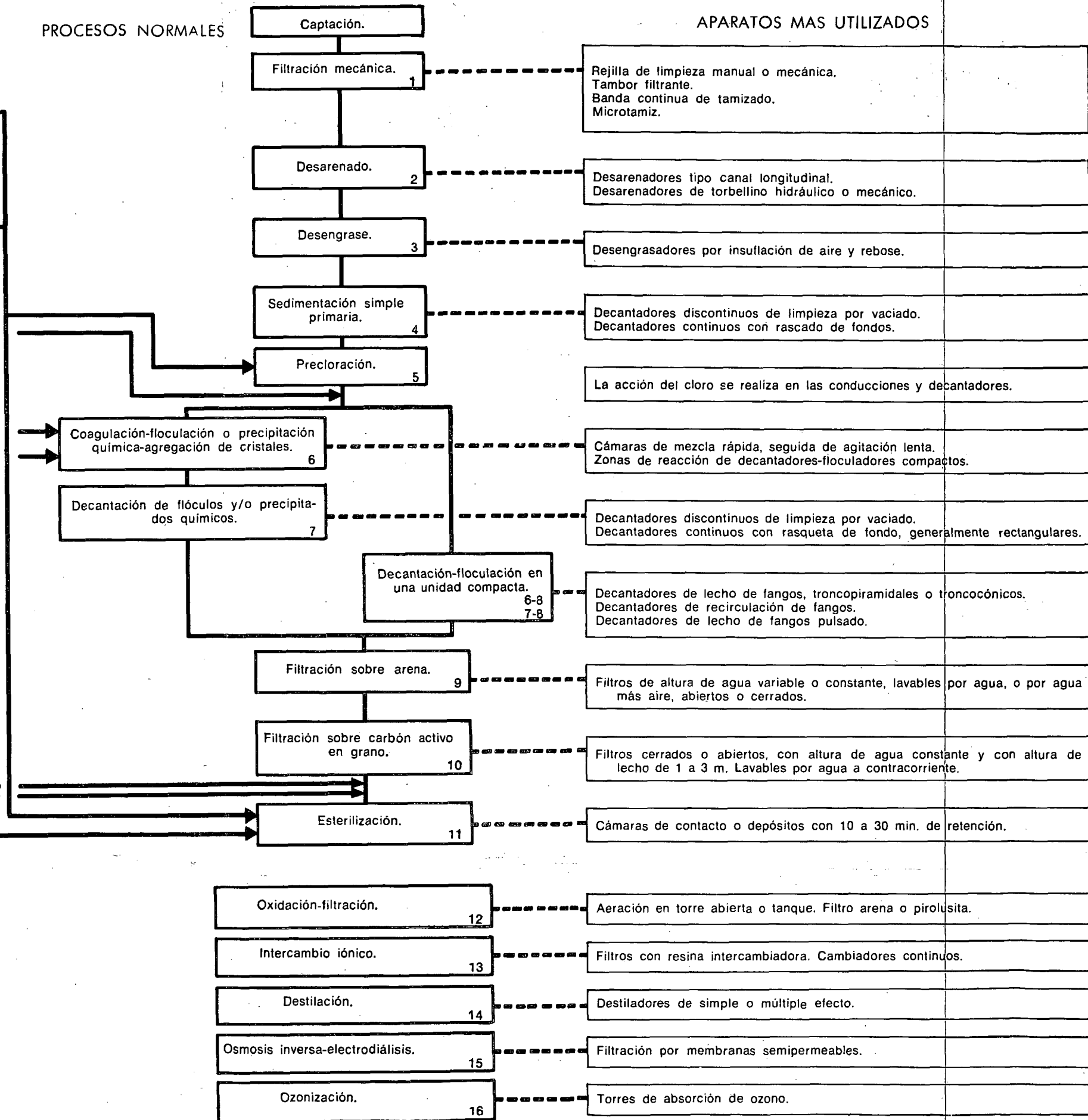
REACTIVOS QUIMICOS PARA EL TRATAMIENTO

1. Cloro gas para inactivar materia viva, oxidar materia orgánica, o esterilizar el agua tratada.
Dosis normales: Precloración, 1 a 5 gr/m³.
Esterilización, 0,3 a 1 gr/m³.
2. Amoniaco para estabilizar el cloro en forma de cloraminas y retardar y prolongar su acción bactericida.
Dosis normales: 1/4 a 1/2 del cloro de esterilización.
3. Carbón activo en polvo para adsorber fenoles, detergentes, materia orgánica, etc.
Dosis normales: 10 a 100 gr/m³.
4. Sal metálica para neutralizar carga de los coloides: Sulfato de alúmina, sulfato férrico o ferroso, cloruro férrico.
Dosis normales: 10 a 60 gr/m³.
5. Ayudantes de coagulación: Sílice activada, polímeros orgánicos (alto peso molecular).
Dosis normales: 0,1 a 1 gr/m³.
6. Alkali para ajuste de pH, o para precipitación de la dureza: Cal, sosa cáustica.
Dosis normales: 5 a 25 gr/m³ en ajuste de pH. Según estequiometría en precipitación.
7. Acido para ajuste de pH: Carbónico, clorhídrico, sulfúrico.
Dosis normales: 2 a 20 gr/m³.
8. Ozono para esterilización: Dosis, 0,5 a 1 gr/m³.

PROCESOS NORMALES

PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO

APARATOS MAS UTILIZADOS



FUNCION QUE REALIZAN

Retención de sólidos de talla superior al paso ($2 \div 10$ mm).
Retención de sólidos de talla superior al paso ($0,25 \div 1,5$ mm).
Retención de sólidos de talla superior al paso ($0,25 \div 1,5$ mm).
Retención de sólidos de talla superior al paso ($30 \div 150$ micras).

Retención de: Arenas de talla $\geq 0,2$ mm o sólidos en general de velocidad de sedimentación equivalente.

Reducción del contenido en grasa emulsionada a unos 10 mg/l.

Retención de: Partículas que obedecen a la ley de Stokes, con velocidad de sedimentación superior a $2 \div 4$ m/h.

Muerte o inactivación de materia viva. Reducción de materia orgánica.

Desestabilización de los coloides por neutralización de cargas. Reacción química de precipitación. Aglomeración de coloides neutralizados en flóculos voluminosos o de precipitados en cristales mayores.

Retención de:

Flóculos formados por coagulación con dimensión 0,5 a 1 mm y mayores; reducción de la alcalinidad del agua hasta valores del orden de 3 a 4° F.

Microorganismos muertos o inactivados.

Reducción de materia orgánica.

Retención de: Todas las partículas sólidas, flóculos o precipitados, con talla del orden de micras.

Retención de: Fenoles, grasas y aceites (en pequeños contenidos, detergentes y materia orgánica). Reducción de color residual.

Muerte o inactivación de gérmenes patógenos y de sus indicadores.

Reducción de hierro y manganeso.

Intercambio de Ca^{++} y Mg^{++} (dureza) por Na^{+} . Reducción de salinidad $\text{Cat}^{+} - \text{An}^{+}$ por $\text{H}^{+} \text{OH}^{-}$.

Separación del agua (en forma de vapor a condensar) de los sólidos disueltos.

Las membranas permiten paso del agua y detienen las sales disueltas.

Oxidación intensa. Reduce color, fenoles, gérmenes patógenos, virus, pesticidas, etc.

Quizá el criterio más concreto que puede elegirse como base de esta calificación de aptitud sea el costo de tratamiento. Considerando como tal la suma del precio de reactivos químicos, energía eléctrica consumida en el tratamiento, personal para atenderlo, repuestos y otros pequeños gastos de explotación (y excluyendo amortizaciones de instalaciones, conducciones o distribuciones, energía de bombeo si se precisa en la conducción o distribución, mantenimiento de la red y administración), podrían considerarse normales, en nuestra Patria, costos de tratamiento de 0,15 a 1,00 ó 1,50 ptas./m³ (sobre la base de precios actuales de productos químicos, mano de obra y energía eléctrica).

Con el criterio anterior, pueden adoptarse los valores que a continuación vamos a dar, tomados de la Organización Mundial de la Salud, como límites máximos tolerables de calidad del agua en una fuente normal de suministro para abastecimiento:

Caracteres físicos:

Color	≤ 300 Uds
Turbiedad	Sin límite

Componentes que afectan la potabilidad:

Total de sólidos disueltos	1.500 mg/l
Hierro Fe	50 mg/l
Manganeso (suponiendo NH ₃ ≤ 0,5 mg/l) Mn.	5 mg/l
Cobre Cu	1,5 mg/l
Cinc Zn	1,5 mg/l
Magnesio + sulfato sódico (Mg + Na ₂ SO ₄) ..	1.000 mg/l
Alkilbenceno sulfonatos ABS (detergentes) ..	0,5 mg/l

Componentes peligrosos para la salud:

Nitratos NO ₃	45 mg/l
Fluoruros F	1,5 mg/l

Indicadores químicos de contaminación:

Demanda química de oxígeno	10 mg/l
Demanda bioquímica de O ₂	6 mg/l
Nitrógeno (aparte NO ₃)	1 mg/l
Amoníaco NH ₃	0,5 mg/l
Extraíbles al cloroformo	0,5 mg/l
Grasa	1 mg/l

Tóxicos:

Fenoles	0,002 mg/l
Arsénico As	0,05 mg/l
Cadmio Cd	0,01 mg/l
Cromo Cr ⁺⁶	0,05 mg/l
Plomo Pb	0,05 mg/l
Cianuro CN	0,2 mg/l
Selenio Se	0,01 mg/l
Radiactividad β	10 ⁻³ Mc/l (*)

(*) Mc = microcuries (1 curie = 3,7 × 10¹⁰ desintegraciones/segundo = radiación producida por 1 gramo de rádium).

MPN de
bacterias coliformes
en 100 cm³
de agua

Exigencias bacteriológicas:

Calidad para la que basta una esterilización	0 a 50
Calidad que requiere tratamiento completo convencional (coagulación, filtración, esterilización)	50 a 5.000
Calidad que requiere tratamientos intensos y control especial del resultado	5.000 a 50.000
Fuente a no utilizar (salvo absoluta necesidad)	> 50.000

Es evidente, de los datos anteriores, que el agua salobre o el agua de mar son aún consideradas fuentes *anormales* de abastecimiento. La definición que hemos adoptado, de costo normal de tratamiento, es también válida en estos casos, puesto que el costo del tratamiento (destilación o electrodiálisis) varía de unas 10 a 25 ptas./m³ para las instalaciones en uso actualmente (en Kuwait, donde existen instalaciones para más de 100.000 m³/día de producción, el coste es de 6 u 8 ptas./m³, a pesar de tener como energía el gas natural a un precio del orden de 0,01 ptas./Kcal).

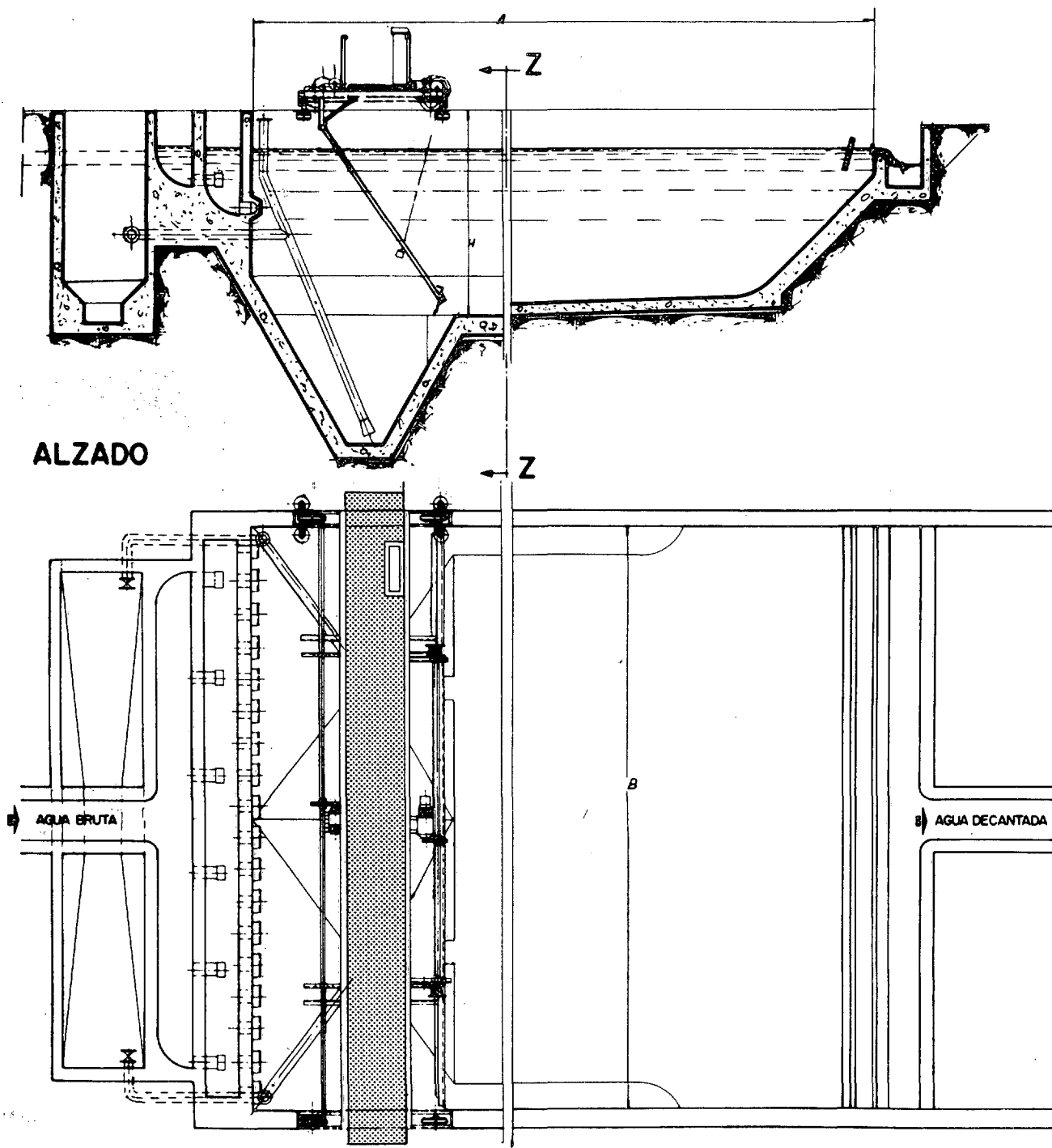
5. Procesos de tratamiento. Aparatos en que se realizan.

En el cuadro 5.1 adjunto hemos intentado sintetizar los procesos de tratamiento usados para corregir las impurezas existentes en el agua, así como los reactivos químicos utilizados. Evidentemente, en cada caso, en función de la calidad del agua bruta disponible, se elegirán los procesos y reactivos precisos. El tratamiento más simple es la esterilización (por cloro en general); y a partir de este proceso, que puede considerarse indispensable para todo tratamiento, la adición de pasos sucesivos lleva hasta la instalación más compleja.

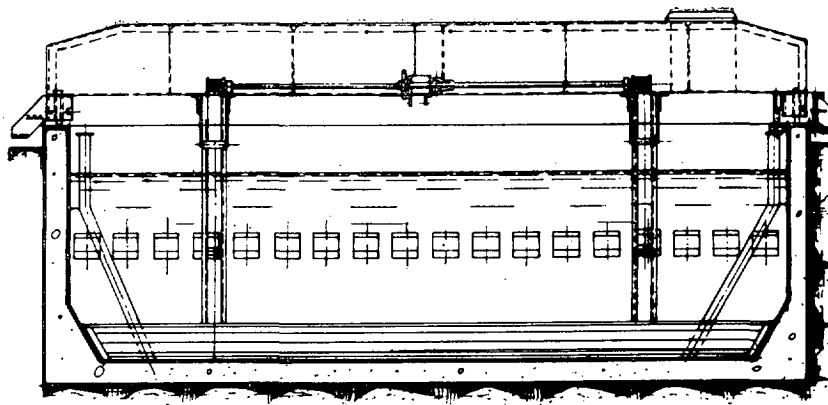
En los párrafos que siguen daremos algunas aclaraciones sobre cada uno de los procesos.

5.1. Filtración mecánica.

Se usa para retener partículas flotantes o semiflotantes, de talla superior al paso libre del aparato.

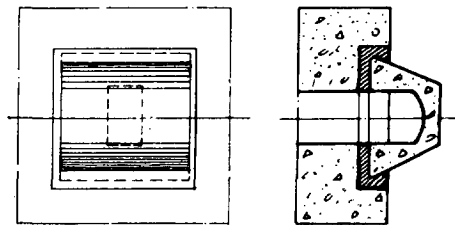


DECANTADOR RECTANGULAR DE RASQUETAS

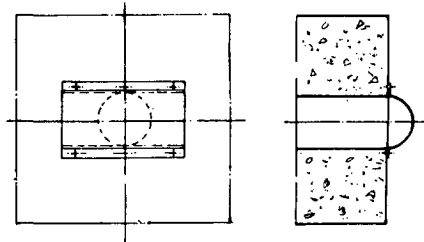


SECCION-Z Z

Difusor en hormigón



Difusor en chapa



ANCHURA SUPERIOR A 10 M (GUIADO POR RUEDAS DE CAUCHO)

En este proceso, se utilizan diversos aparatos, según el tipo de impureza a retener.

5.1.1. *Rejas y rejillas para cuerpos de 1,5 mm y mayores.*

Se llaman rejas gruesas las de 20 a 30 o más milímetros de paso, y rejas finas las de 1,5 a 12 mm. Es conveniente, para evitar depósitos, que la velocidad de llegada del agua a la reja no esté por debajo de 0,4 a 0,6 m/seg. En las rejas finas conviene que la velocidad no exceda de 1 ó 1,2 m/seg, para evitar que las partículas se incrusten fuertemente entre los barrotes, haciendo difícil la limpieza. En las rejas gruesas, la velocidad puede llegar a 2 ó 2,5 metros por segundo. La pérdida de carga de la reja se limita a $5 \div 15$ cm C.A.

5.1.2. *Mallas filtrantes para retener partículas menores de 1,5 mm.*

Las mallas filtrantes tienen, generalmente, luz libre de paso de 0,25 a 1,5 mm. Las velocidades de filtración son del orden de 0,05 a 0,3 metros/seg, crecientes a medida que crece la luz libre de la malla.

Las mallas se montan en filtros estáticos de desbaste (en impulsiones de bombas), en tambores giratorios que tienen sumergido un 60 a 70 por 100 de su superficie (en conducciones rodadas de agua con nivel sensiblemente constante), o en bandas continuas (en conducciones rodadas con nivel de agua muy variable).

Se usan tambores con mallas muy finas (paso, 20 a 150 micras), llamados microtamices, para retener plancton vegetal o animal cuando hay grandes cargas de estas sustancias a eliminar. La velocidad de llegada a la malla es pequeña (del orden de 50 m/h para 35 micras de paso libre de malla).

En todos los casos el lavado se hace por chorro fuerte de agua, que incide sobre la malla en sentido contrario al de la filtración.

5.2. *Desarenado y sedimentación simple.*

Por la identidad de su fundamento, que es la sedimentación según la ley de Stokes, estudiamos conjuntamente estos dos procesos.

Son separables del agua por desarenado o sedimentación simple las partículas de densidad alta, que son arrastradas por el agua y se depositan cuando la velocidad de ésta decrece suficientemente. Se presentan en el agua bruta en forma de partículas discretas, neutras, que sedimentan según la ley de Stokes:

$$V_s = \frac{1}{\psi} \frac{g}{18} \times (S - 1) \times \frac{d^2}{\nu} \quad (1)$$

V_s = Velocidad de sedimentación.

ψ = Coeficiente de forma de las partículas ($\psi = 1$ para esferas, 2 para arena de grano anguloso, 2,25 para carbón).

g = Aceleración de la gravedad.

S = Densidad relativa con respecto al agua.

d = Diámetro de la esfera equivalente a la partícula.

ν = Viscosidad cinemática.

TABLA 6.2.1.B. — Viscosidad cinemática del agua

Temperatura, °C	en Stokes $\left(\frac{\text{cm}^2}{\text{seg}} \right)$						
	0	5	10	15	20	25	30
— Viscosidad = $10^{-2} \times$	1,792	1,519	1,310	1,146	1,011	0,897	0,804

Las partículas comprendidas en este grupo se separan en dos subgrupos:

5.2.A. Subgrupo de las partículas abrasivas, generalmente arenas, con velocidades de sedimentación del orden de decenas de metro por hora, y que son arrastradas en corrientes horizontales de agua de velocidad superior a unos 0,3 a 0,4 m/seg. (Corresponde para sólidos de densidad 2,65, a la talla aproximada de 0,15 a 0,20 mm.)

5.2.B. Subgrupo de partículas, abrasivas o no, con velocidades de sedimentación de unos pocos (2 a 4) m/h. (Para sólidos de densidad 2,65 correspondería a la talla de 0,04 mm, en agua a 10° C.)

La separación de las partículas del subgrupo 5.2.A se hace en los desarenadores; las del subgrupo 5.2.B se separan del agua en sedimentadores simples, o en los decantadores de partículas floculadas, si el agua no está muy cargada en dichas partículas 5.2.B.

5.2.2. *Desarenadores.*

Son canales longitudinales, de sección tal, que la velocidad horizontal del agua sea infe-

rior a 0,25 m/seg; o cámaras circulares en las que se induce un movimiento de torbellino, sea por entrada tangencial del agua a velocidad importante, sea por un agitador de palas verticales que provoca la formación del torbellino. En los primeros, la arena se deposita en todo el fondo del canal; en los segundos, la arena se deposita en el vértice del torbellino donde la velocidad es nula o muy baja.

Para retener arena de 0,15 a 0,5 mm de talla ha de ser:

$$\frac{\text{Caudal de agua}}{\text{Superficie libre}} = 40 \text{ a } 70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$$

para desarenadores longitudinales, y 70 a 100 metros cúbicos/m² · h para los de torbellino. El tiempo de retención $\frac{\text{Volumen agua}}{\text{Caudal agua}}$ ha de ser de veinte a noventa segundos.

5.2.3. Decantadores simples primarios o pre-decantadores.

Se usan en el caso de aguas con fuertes cargas de materia sólida en suspensión, que sedimenta naturalmente, según la ley de Stokes. Los aparatos son de planta rectangular o circular; los primeros son, algunas veces, de funcionamiento discontinuo (se vacían para la limpieza). Los predecantadores modernos van provistos de rascadores de fondo, que arrastran los sedimentos a fosas provistas de válvulas de extracción.

La superficie de estos decantadores es normalmente del orden de 0,5 a 1,2 m²/m³/h de caudal a tratar (2 a 0,8 m³/m² · h). El tiempo de retención del aparato será normalmente de hora y media a tres horas.

5.3. Desengrase.

Es el proceso de eliminación de partículas de grasas o aceites, en suspensión más o menos fina en el agua. El agua natural carece de esta impureza, que raramente aparece en fuentes de suministro en cantidad suficiente para justificar la instalación de un desengrasador.

5.4. Coagulación-floculación y precipitación química.

Aunque se trata de dos procesos netamente distintos desde el punto de vista físico-químico,

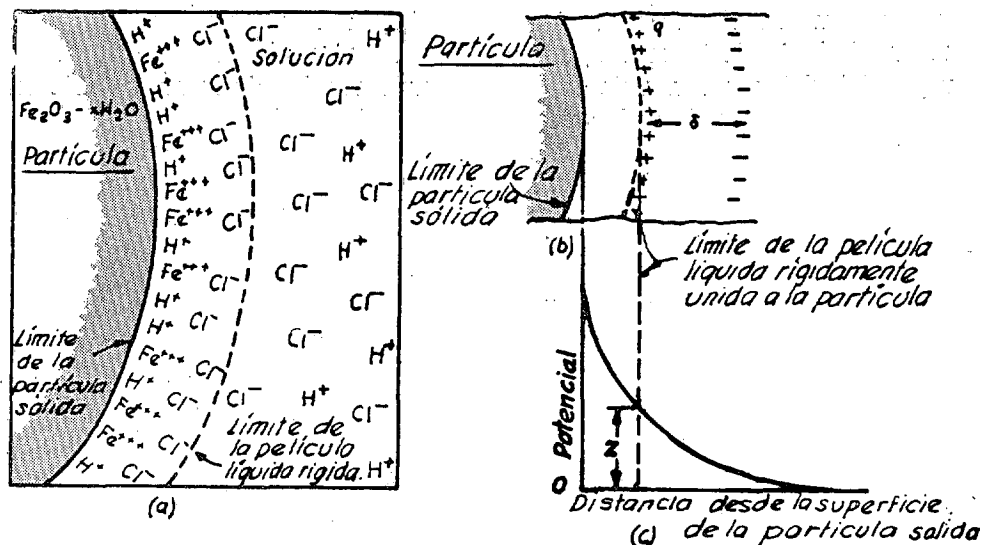
en la práctica del tratamiento de aguas ambos procesos consisten en convertir sustancias, que permanecerían de forma estable en el agua, por tiempo indefinido, en partículas susceptibles de separación por sedimentación. Por ello, vamos a tratar a la vez ambos procesos.

5.4.1. Coagulación-floculación.

Se aplica este proceso a partículas de muy pequeña dimensión (del orden de milimicras a la decena de micras), que aparecen en el agua en suspensión estable. Experimentalmente se ha observado que esta estabilidad se debe a que estas partículas soportan cargas eléctricas del mismo signo, que, por repulsión eléctrica, dan lugar a su movimiento en el seno del líquido, e impiden su agregación en partículas mayores decantables. Las impurezas del agua causantes de la turbiedad y color (sílice coloidal, arcillas, cienos, partículas orgánicas, etc.) presentan carga negativa en aguas de pH próximo a 7; por el contrario, los hidróxidos de hierro y aluminio aparecen normalmente con carga positiva.

Tanto en un caso como en otro, la carga puede considerarse como el resultado de una acción en tres fases: En primer lugar, el coloide adsorbe iones (OH⁻, Cl⁻, etc., para el caso de partículas negativas); a continuación, algunos iones de signo contrario (H⁺, iones metálicos, etc., para las partículas negativas), en número limitado, son retenidos en la proximidad del coloide cargado, atraídos intensamente por su carga central, formando una especie de película líquida, rígida, con límite bien definido; y, finalmente, el resto de iones de signo contrario al del núcleo, totalmente móviles, se dispersan en la solución, con una concentración mayor en la proximidad de la partícula. Esta concentración va decreciendo hasta la distancia en que la acción eléctrica del núcleo central deja de ser perceptible (ver figura). El conjunto partícula sólida-capas rígida tiene una carga eléctrica resultante, que es la carga del coloide, y la causa de su estabilidad, por repulsión eléctrica con los coloides del mismo signo.

A partir de esta frontera líquida, rígida, existe una cierta capa de líquido, en la que se manifiesta la acción eléctrica del coloide central. El conjunto de solución rígida y capa de líquido



REPRESENTACION DE LA DISTRIBUCION DE CARGAS Y POTENCIALES ASOCIADOS CON LAS PARTICULAS COLOIDALES

- Diagrama de la distribución de cargas en la proximidad de la superficie de una partícula de hidróxido férrico en solución, obtenida por dispersión de FeCl_3 en agua.
- Representación de Helmholtz de la superficie de la partícula, indicando la carga resultante q y la distancia a que alcanza la acción eléctrica δ (espesor de la llamada doble capa).
- Valores del potencial eléctrico inducido por la carga resultante de la partícula, a distancia variable de su superficie. El potencial zeta es la diferencia de potencial entre el límite de la película líquida de solución rigidamente asociada a la partícula coloidal y la masa de la solución.

do en que se manifiesta la acción eléctrica se llama la doble capa (rígida una y móvil la otra).

Evidentemente, la partícula coloidal cargada tiene un cierto potencial eléctrico con respecto a la solución neutra en que se halla, potencial que decrece desde el centro eléctrico de la partícula, hasta una distancia suficiente para que los efectos de la carga sean inapreciables (masa del líquido); el valor de la diferencia de potencial entre el "límite de solución rigidamente unida a la partícula", y la masa del líquido se denomina potencial Z . Su valor, para la mayor parte de los coloides naturales que se encuentran en el agua dulce, está entre -15 y -30 mV. El potencial Z se mide por electroforesis, deduciendo su valor de la velocidad de desplazamiento de los coloides sometidos a un campo eléctrico.

Se denomina coagulación de una dispersión coloidal la operación consistente en neutralizar sus cargas eléctricas, con lo que dejan de actuar las fuerzas de repulsión, su potencial Z se anula y los coloides tienden a agregarse por

acción de masas. Las masas de dimensión del orden de decenas a centenares de micras, formadas por agregación de las partículas coloidales, se denominan "flóculos", y "floculación" el proceso de su formación. Estos flóculos tienen ya una velocidad de sedimentación apreciable (algunos metros por hora), y pueden separarse por decantación. En los párrafos siguientes describiremos los decantadores en que se realiza esta operación.

La coagulación se obtiene añadiendo a la dispersión iones de signo contrario al del coloide. Se ha observado que la actividad coaguladora crece mucho con la valencia del ión coagulante; un ión trivalente es de 600 a 1.000 veces más efectivo que un ión monovalente. Para que se manifieste la acción, es preciso que el ión coagulante sea adsorbido por el coloide, hasta anular su potencial Z (en la práctica, a partir de valores de Z entre ± 8 milivoltios, las fuerzas de atracción de masas vencen ya la repulsión eléctrica restante).

(Continuará.)