

ubicadas las industrias, con lo que los contaminantes vertidos por éstas son arrastrados nuevamente hacia el centro de la ciudad.

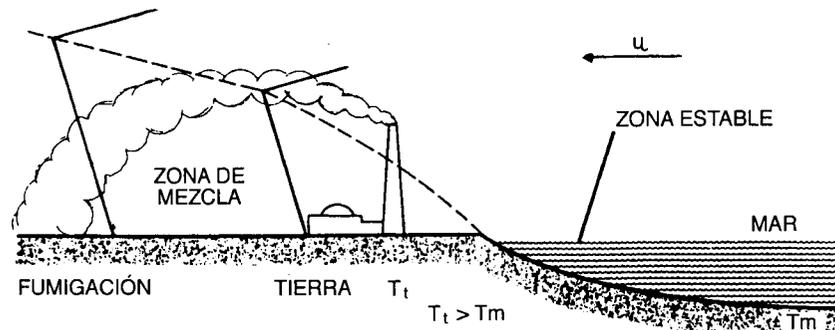
Brisas marinas

Se originan por las diferencias de calentamiento y enfriamiento entre las superficies del agua y la tierra. Esta circulación modifica las características de dispersión y de difusión de las capas bajas de la atmósfera.

Cuando durante el día el sol calienta la superficie de la tierra cercana a la costa, se inicia una corriente de aire ascendente sobre ella, compensada por otra descendente sobre el mar, lo que origina circulaciones de aire hacia éste en las capas altas de la atmósfera, y hacia la tierra en las bajas.

Así, el aire que desciende sobre el mar se calienta adiabáticamente, lo que provoca una inversión fuerte por hundimiento, que se sumará a la posible inversión débil que exista en esa zona. Si el agua del mar se encuentra a baja temperatura y el recorrido es lo suficientemente largo, puede enfriarse el aire por radiación, creándose en el límite de la costa una inversión de temperatura.

Una vez que el aire circula sobre la superficie caliente de la tierra, vuelve a calentarse desde abajo, dando lugar a una capa límite con un tipo de condiciones que se han denominado superadiabáticas (inestable).



Efecto brisa (mar/tierra)
(Sanz Sá, 1991)

Por la noche el enfriamiento por radiación de la tierra es más rápido que sobre el agua, lo que da lugar a una circulación contraria a la anterior, dando origen a las denominadas brisas de tierra.

Vientos de ladera

Las diferencias de calentamiento de laderas y valles en las tierras interiores provocan diferencias locales de densidad y presión en el aire, especialmente cuando existen vientos débiles y cielo despejado, lo que origina las denominadas brisas de valle y de montaña.

Durante el día las laderas de montaña, especialmente las orientadas al sur, se calientan más rápidamente dando lugar a una circulación ascendente hacia lo alto de la ladera, llamada brisa de valle. Si la ladera forma parte de un valle, el aire frío tiende a vaciarse sobre el fondo de éste, originando una capa de aire frío cada vez más profunda, intensificando la inversión que pueda existir.

Durante la noche sucede lo contrario, originándose las denominadas brisas de montaña.

Mezcla y turbulencia en la atmósfera

La concentración de contaminantes en la atmósfera depende de una serie de parámetros físico-químicos de los distintos agentes que toman parte en los procesos de dispersión (viscosidad, difusibilidad molecular, turbulencia de las masas de aire en la que se encuentran los contaminantes), si bien se ha demostrado que esta última es la de mayor importancia, puesto que tiene la propiedad de aumentar las superficies de contacto entre los contaminantes y el aire, aunque, a la postre, el intercambio final se realice siempre a nivel molecular.

La turbulencia depende de factores mecánicos (mezclas de masas de aire debidas a los accidentes orográficos o a objetos sobre el terreno), de fuerzas originadas en la atmósfera debido a las propiedades del aire, y de factores térmicos, cuando masas de aire caliente se desplazan con respecto al aire frío.

Se describen a continuación, brevemente, algunos de los factores citados que intervienen en la turbulencia atmosférica.

Presión atmosférica y fuerzas del gradiente de presión

La presión atmosférica en cualquier punto se debe, en una primera aproximación, al peso del aire que se encuentra por encima del punto considerado, lo que implica que disminuye con la altura.

El valor medio es casi constante para toda la superficie de la tierra (1.013 mb), oscilando aproximadamente un 3 % sobre ese valor medio para distintas latitudes (980-1.040 mb). Sobre un mismo paralelo, las diferencias de presión son aún menores, oscilando un máximo de unos 3 mb.

No obstante, hay algunas variaciones de presión con el tiempo sobre un punto fijo por cambios periódicos o irregulares, y varía con la altura para puntos distintos, de forma que las superficies isobáricas no son paralelas a la superficie de la tierra, sino que presentan una cierta inclinación.

Si se cortan las superficies isobáricas por un plano paralelo a la superficie terrestre, se obtienen las curvas denominadas isóbaras.

La diferencia de presiones entre dos puntos determinados origina un gradiente de presión, que a su vez origina una fuerza que tiende a acelerar el aire en la dirección de dicho gradiente (perpendicular a las isóbaras).

Fuerza de Coriolis

Es una fuerza dirigida perpendicularmente al vector velocidad del viento, originado por la rotación de la Tierra.

Fuerza de fricción

Si el viento sopla sobre la superficie de la tierra, las moléculas de aire chocan contra ésta, perdiendo energía cinética y transformándola en calorífica. Estas moléculas quedan retrasadas y retrasan a su vez a las de las capas contiguas más altas, hasta llegar a una cierta altura en donde no se nota la influencia de la superficie.

La disminución de la influencia hace que la velocidad del viento aumenta normalmente con la altura, que es lo que se denomina cizalladura del viento.

Consideraciones sobre los penachos y su comportamiento con respecto al perfil de temperatura

Principales factores que influyen en la forma y extensión del penacho

La observación, estudio y clasificación de los penachos es de gran importancia para comprender los mecanismos de los procesos de dispersión, sobre todo en su zona visible.

Los factores que influyen en la forma y extensión del penacho son principalmente:

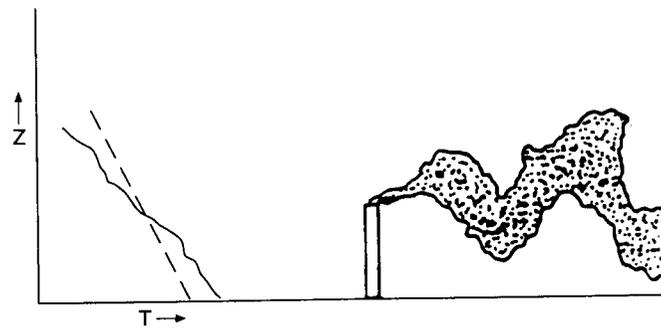
- Relieve y naturaleza del suelo.
- Parámetros de diseño de la chimenea.
- Condiciones meteorológicas que predominen en las capas de aire en donde éste se mueve, principalmente velocidad, dirección del viento dominante y estabilidad térmica.
 - Velocidad y temperatura de los gases y sección de la chimenea.
 - Tipo de contaminantes emitidos.

A continuación, se exponen una serie de ejemplos de los distintos tipos de dispersión de los penachos:

1. Dispersión serpenteante o en lazo (*looping*)

Características:

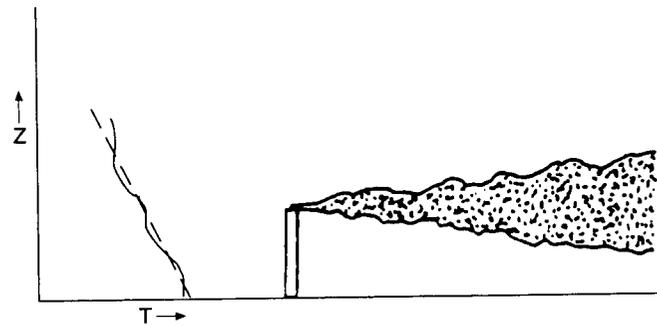
- Perfil de temperatura inestable.
- Difusión muy activa.
- Posibilidad de arrastre del penacho al suelo, provocando altos niveles de inmisión en intervalos cortos de tiempo. Dispersión buena en períodos largos.
- Bordes irregulares y rugosos.



2. Dispersión en forma de cono (*conning*)

Características:

- Perfil de temperaturas entre inestable e isotermo.
- Llega al suelo a mayor distancia.
- Se da en días o noches nublados con velocidades de viento moderadas a intensas.

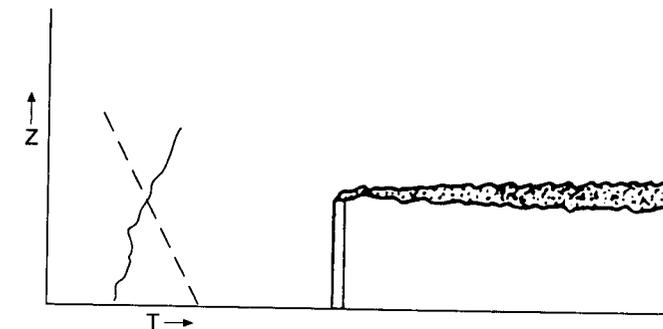


3. Dispersión en abanico (*fanning*)

Características:

- Perfil de temperaturas estable.
- Difusión vertical casi inexistente.
- Los contaminantes pueden ser transportados a largas distancias sin mezclarse.

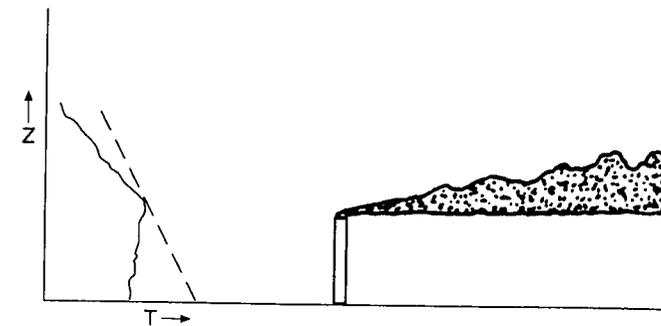
- Bordes bien definidos.
- Forma de abanico, ya que los movimientos horizontales no están limitados.



4. Dispersión ascendente (*lofting*)

Características:

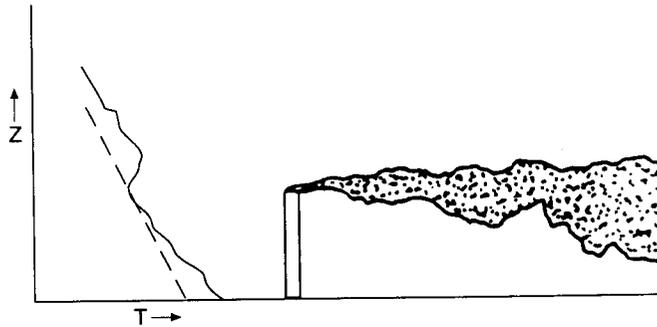
- Se da cuando existe una capa de aire inestable sobre una inversión de superficie.
- Difusión rápida hacia arriba, no hacia abajo.
- Situación transitoria hasta convertirse en dispersión en abanico.
- Penacho de estructura inferior compacta y algo rugosa. Estructura superior ondulante.



5. Dispersión hacia abajo (*trapping*)

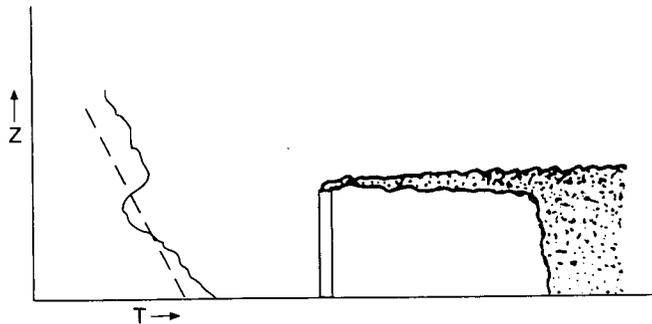
Características:

- Se da cuando existe una inversión alta (ej., inversión frontal o por subsidencia anticiclónica).
- Dispersión lateral y hacia abajo buenas.
- Puede durar bastantes días con situaciones anticiclónicas duraderas.

6. Fumigación (*fumigation*)

Características:

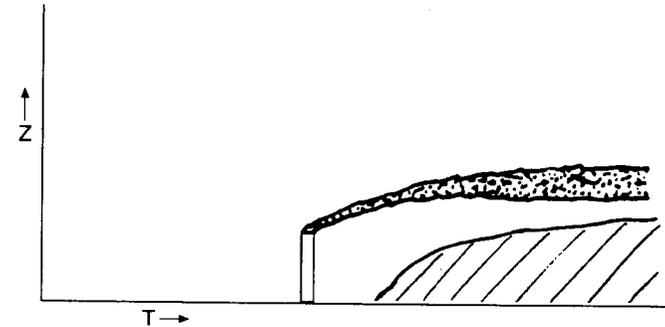
- Se da cuando una capa de aire estable acumula contaminantes y los arrastra sin llegar a difundirlos, hasta un punto donde la turbulencia los arrastra a tierra.
- Todas las emisiones del foco pueden derrumbarse sobre un área pequeña provocando altos niveles de inmisión.



7. En forma de penacho ascendente

Características:

- Aire inestable y viento débil.
- Se origina cuando el penacho tiene un ascenso convectivo en bloque o por efectos topográficos.



El comportamiento en cuanto al transporte y la dispersión de cualquier tipo de penacho se puede estudiar y predecir los efectos que puede provocar en su entorno concreto, por medio de modelos matemáticos en los que se incorporan todas las variantes climáticas que los afectan.

TRANSPORTE Y DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL AGUA

Descripción de los procesos que tienen lugar en el seno del agua

El agua es el disolvente universal, y cualquier sustancia que entra en contacto con ella tiende a diluirse. Sin embargo, el agua en la tierra se encuentra dentro de diferentes ecosistemas, los cuales tienen sus propios mecanismos de transporte, eliminación o incorporación de las sustancias existentes.

La enorme complejidad de los procesos que tienen lugar en el seno del agua hace que sea difícil describir de una forma exhaustiva todos estos fenómenos. Sin embargo, es posible extraer ciertos mecanismos generales que son los causantes de los cambios de concentración de las sustancias.

En primer lugar, habría que considerar que los elementos químicos pueden encontrarse fundamentalmente en tres estados diferentes: materia inorgánica disuelta, materia orgánica disuelta y materia orgánica particulada.

Sobre cada una de las especies actúan cuatro grupos principales de mecanismos:

1. Reacciones químicas y bioquímicas tanto en la masa de agua como en la superficie de la materia en suspensión.
2. Reacciones de intercambio de los compuestos volátiles con la atmósfera.
3. Transporte e incorporación de los compuestos a depósitos por mecanismos de sedimentación.
4. Transformación de los sedimentos, incluyendo la degradación de la materia orgánica.

Además, cada uno de estos mecanismos principales puede subdividirse en otros procesos químicos más específicos, como por ejemplo:

- Reacciones de oxidación-reducción.
- Reacciones ácido-base.
- Reacciones gas-líquido.
- Reacciones de coordinación con iones metálicos.
- Precipitaciones/redisoluciones.
- Procesos de adsorción/desorción en las interfases.

Por su parte, la acción de los microorganismos acuáticos puede alterar la concentración debido a:

- Consumo metabólico.
- Transformación.
- Almacenamiento.
- Excreción.

La materia orgánica disuelta y particulada es utilizable como sustrato por los organismos descomponedores, que generan sustancias inorgánicas como subproducto de su metabolismo.

Las sustancias inorgánicas disueltas (dióxido de carbono, fosfatos, óxido de nitrógeno, etc.) son consumidas, a su vez, en la producción primaria, mientras que los procesos de excreción y mortalidad no depredadora producen sustancias orgánicas disueltas y particuladas.

En general, la materia y la energía son transportadas y almacenadas en la cadena trófica, mientras que los elementos químicos presentan ciclos mencionados en el ecosistema, que hasta un cierto nivel son independientes, siendo, por tanto, posible establecer el estado en que se encuentra la sustancia.

Transporte y dispersión

Aguas superficiales continentales

En las aguas corrientes superficiales el transporte es unidireccional en el eje nacimiento-desembocadura. En ecosistemas no alterados por el hombre, se da una dilución por incremento de caudal de las «sustancias conservativas» (sales inorgánicas, etc.). Sin embargo, las sustancias orgánicas cambian sus concentraciones de un lugar a otro y en parte, con el paso del tiempo, por la acción de los organismos.

Las aguas residuales, tanto de origen industrial como las de origen doméstico, al ser vertidas en el cauce de un río provocan una alteración en los equilibrios físico-químicos y biológicos del agua. Ahora bien, si este agua que se vierte ha sido previamente tratada o depurada, el trauma que producirá será menor que si se vierte cruda, y tanto menor cuanto más complejo haya sido el tratamiento.

El tratamiento ha de estar de acuerdo con las características biológicas del cauce receptor, teniendo en cuenta lo siguiente:

- La relación de caudales entre el cauce receptor y el vertido.
- El estado de las aguas del río antes de recibir el vertido.
- Las características del cauce receptor en los kilómetros posteriores al vertido (pendiente del río, presencia de rápidos y cascadas que facilitarán la aireación natural, etc.).
- La posibilidad de otros vertidos aguas abajo.
- La posibilidad de tomas de agua cerca del punto de vertido, etc.

Para poder saber en todo momento la carga que el río puede admitir sin llegar a sufrir un desequilibrio biológico irreversible, es muy importante el conocimiento de las constantes de desoxigenación y reoxigenación.

Una vez que se ha incorporado un vertido a un cauce, si se tomasen muestras del agua a intervalos dados se observaría cómo algunos parámetros han variado a lo largo del tiempo recorrido, como, por ejemplo,

el contenido de oxígeno disuelto, sulfatos, fosfatos, nitratos, sólidos en suspensión, etc.

Según lo anterior, se puede dividir un río contaminado en cuatro zonas bien definidas y fáciles de determinar, correspondientes a las cuatro fases consecutivas más importantes que se observan en el mismo. Éstas son: zona de degradación, zona de descomposición activa, zona de recuperación y zona de aguas limpias.

En las figuras que se observan a continuación puede comprobarse cómo se modifican las condiciones del cauce fluvial a partir del punto de vertido, observándose una disminución en la saturación de oxígeno y en las poblaciones de determinados seres vivos, desapareciendo las formas superiores de vida.

1.2. Zona de degradación

En esta zona se inicia la descomposición de la materia orgánica bajo la actividad bacteriana, siendo sustituidas las formas superiores de vida por formas inferiores más tolerables. Las aguas en esta zona tienen aspecto sucio, y disminuye rápidamente el contenido de oxígeno, estando cerca del 40 % de saturación.

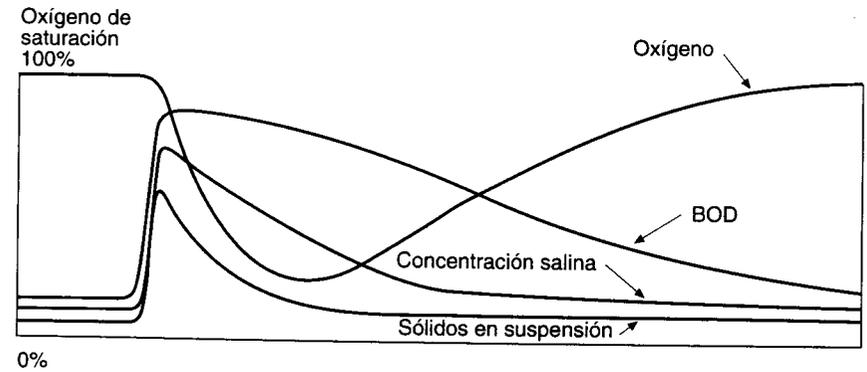
2. Zona de descomposición activa

Se produce desprendimiento de gases, hay ausencia de oxígeno disuelto y condiciones sépticas. Las aguas tienen un aspecto pardusco o negro, apareciendo lodos flotantes, olores desagradables debidos al sulfuro de hidrógeno. La descomposición como consecuencia de la ausencia de oxígeno es anaerobia, con aumento de dióxido de carbono y amoníaco.

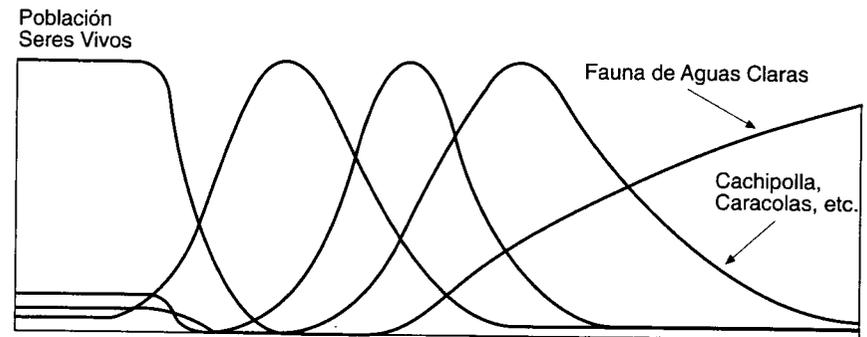
3. Zona de recuperación

El agua va adquiriendo gradualmente sus condiciones normales a consecuencia de la oxidación de los materiales, a costa del oxígeno del aire y del liberado por la acción fotosintética de los vegetales.

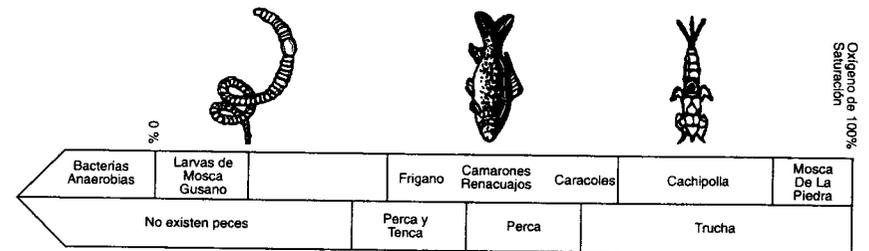
Tiene una actividad inversa a la zona de degradación, alcanzando mayor longitud. Las aguas se van volviendo más claras, reapareciendo los vegetales verdes que desaparecieron en la fase de degradación, elevándose el contenido de oxígeno progresivamente hasta su contenido normal de saturación.



Variación parámetros químicos del cauce por un vertido (Hernández (1), 1990)



Variación en las características biológicas de un cauce por un vertido (Hernández (1), 1990)



Variación de fauna dependiendo del oxígeno de saturación (Hernández (1), 1990)

4. Zona de aguas limpias

Las características de las aguas son similares a las de las aguas limpias naturales, existiendo en su seno la vida animal y vegetal que son normales en las corrientes que padecen solamente contaminación natural o geológica.

En el tramo de río donde se desarrollan estas zonas descritas se ha llevado a cabo el proceso de autodepuración del mismo.

En los lagos y embalses, al ser aguas retenidas, la radiación solar origina, sobre todo, un flujo de calor a través del agua. En la superficie se disipa la energía del viento que remueve las aguas. En primavera, la mezcla de aguas superficiales progresa en profundidad, al mismo tiempo que el agua va haciéndose más densa. Por este motivo, puede decirse que la temperatura y la concentración de oxígeno es uniforme en todo el lago.

En verano, las aguas superficiales están más calientes por acción del sol y son menos densas que las profundas, de forma que a partir de cierta profundidad la mezcla ya no progresa con el aumento de la densidad. Se detecta entonces un gradiente brusco de temperatura y densidad, lo que indica que dejan de mezclarse las aguas superficiales y las profundas. Este cambio brusco se denomina termoclina. Se diferencia una capa superior de aguas menos densas y removidas (*epilimnion*), otra intermedia (*metalimnion*) donde varía bruscamente la concentración de oxígeno y la temperatura, y la última el *hipolimnion*, donde los valores de dichos parámetros se modifican lentamente.

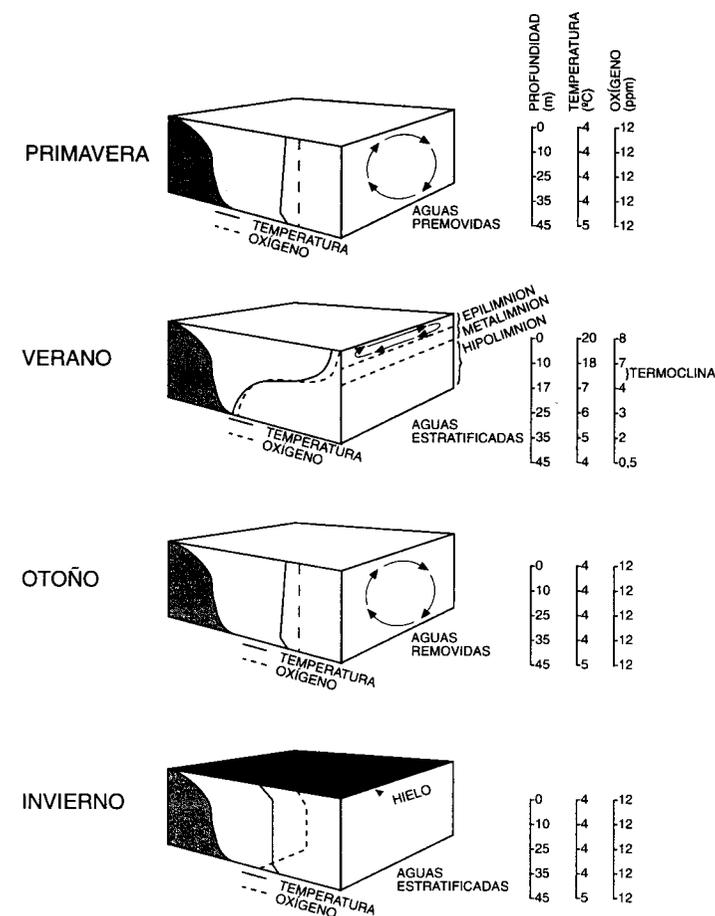
En otoño, al cambiar la temperatura ambiente desaparece la termoclina, y el *epilimnion* ocupa todo el volumen del lago. De esta forma vuelve a producirse un segundo episodio de mezcla de las aguas del lago, denominándose lago dimítico, típicos de las zonas templadas del planeta.

Por el contrario, en invierno el agua de la superficie puede estar más fría que la profunda, o incluso helada. En general, existe una zona de contacto entre aguas de características diferentes, que constituye una superficie de deslizamiento, favoreciéndose el movimiento laminar de las masas de agua, permaneciendo éstas sin mezclarse nunca entre sí.

Las características diferenciadoras son la temperatura, turbidez, salinidad y densidad.

La disminución del contenido de oxígeno debajo del hielo y en el fango del lago se puede deber a la actividad bacteriana, aunque a estas temperaturas no será muy intensa. Se comprueba que en este momento el lago puede tener una concentración superior de oxígeno disuelto que en verano, permaneciendo la temperatura prácticamente constante.

Ciertos compuestos o sustancias que se encuentran en el seno de las aguas, de un embalse o lago pueden precipitar y quedar retenidas en el sedimento hasta la época de mezcla, cuando son resuspendidas y retornan al agua. Dependiendo de las condiciones redox del medio, esto sucede con el manganeso, el hierro, el fósforo, etc.



Variación estacional de la temperatura y la concentración de oxígeno con la profundidad en un embalse (Díaz F., 1989)

Aguas superficiales marinas

Las características intrínsecas del agua del mar (salinidad, densidad, composición) determinan que la mezcla que se produce entre aguas saladas y dulces originen cambios en los componentes de dicha mezcla y la aparición de gradientes importantes en los siguientes parámetros: fuerza iónica, proporción relativa de iones, temperatura, pH, potencial redox, etc.

Los elementos conservativos en las zonas de mezcla, cambian de concentración en función de la clorinidad del agua mezclada. En la concentración de los no conservativos aparecen otros procesos distintos a la mezcla, de tal modo que no siguen una linealidad con la clorinidad, teniendo lugar su eliminación por precipitación o floculación.

El comportamiento y la transformación posterior que sufren los contaminantes al llegar al mar depende de diversos factores físicos, químicos y biológicos, haciendo que el problema resulte bastante complejo. Los contaminantes, al llegar al medio marino, se diseminan en el mismo por medio de las corrientes, las olas y los procesos turbulentos de mezcla.

Muchos contaminantes, en especial los metales, son fácilmente adsorbidos en macropartículas en suspensión. Si las macropartículas se sedimentan en el fondo pueden ser fijadas a los sedimentos. Pero se ha comprobado que muchos metales no permanecen ligados indefinidamente a los sedimentos, ya que las capas superiores de éstos pueden ser liberados hasta el 75 % de ciertos metales.

La materia orgánica que llega al medio marino se dispersa en su seno, y si la cantidad de oxígeno es suficiente, es oxidada a productos inertes tales como agua, anhídrido carbónico, sulfatos y nitratos, principalmente. Este proceso de transformación se conoce como autodepuración.

Uno de los casos más empleados para forzar la autodepuración son los *emisarios submarinos* de agua urbana. Con ellos, se pretenden alcanzar dos objetivos: dilución y autodepuración.

El fin último de los emisarios submarinos es el aspecto sanitario. En consecuencia, la concentración de *Echerichia coli* marca la pauta de la dilución total a alcanzar y es el testigo de la eficacia real del procedimiento.

La luz y de forma más general la radiación solar, intervienen poderosamente y de forma negativa en las probabilidades de supervivencia de la *E. coli*. En consecuencia, cuanto más tiempo se queden expuestos a la radiación solar los microorganismos contenidos en las aguas residuales, más numerosos serán los que morirán bajo los efectos de la misma.

Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas, como ya se ha mencionado con anterioridad, se pueden clasificar en general como de capa libre y confinadas. En las aguas de capa libre el nivel freático puede subir o bajar dependiendo del nivel de las aguas superficiales, ya que actúan de modo similar a vasos comunicantes.

El agua que penetra por infiltración puede llevar diferentes sustancias en disolución dependiendo del origen de la misma. El suelo funciona como filtro de muchas sustancias reteniéndolas, sobre todo materia orgánica. Sin embargo, algunas sustancias llegarán al nivel freático y serán arrastradas por las aguas subterráneas.

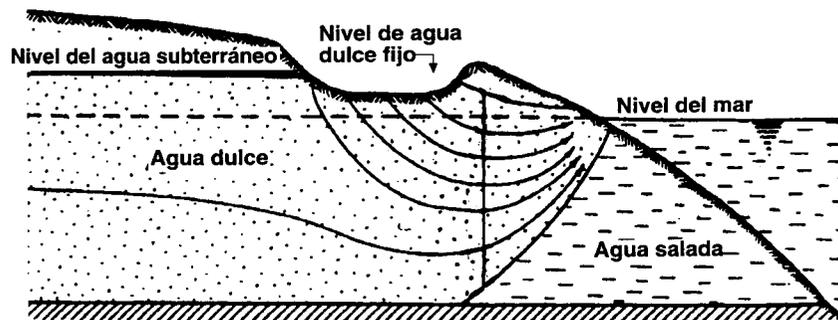
Las aguas subterráneas actúan como diluyente y, al no tener organismos que transformen la materia orgánica, como en las aguas superficiales, ésta se degrada muy lentamente bajo la acción del oxígeno disuelto. Por ello, cualquier tipo de contaminación orgánica que se origine en las aguas subterráneas tarda muchos años en eliminarse y la inorgánica únicamente se diluye y circula dentro de las venas subterráneas.

Actualmente, uno de los mayores problemas de las aguas subterráneas es la contaminación por nitratos de origen agrícola, estando totalmente prohibida la adición de sustancias tóxicas y peligrosas por cualquier procedimiento: infiltración, inyección, etc., ya que éstas no tienen ningún mecanismo de eliminación y sólo pueden diluir dichas sustancias.

Intrusión marina

En un acuífero costero sin explotación, el agua dulce se vierte al mar, ya sea a través de cursos de agua superficiales o bien subterráneas. Esta fuga de agua subterránea mantiene una cierta posición de la interfaz agua dulce-agua salada. Si se ubican bombeos para recuperar esta agua, es en detrimento de este flujo y, por lo tanto, debe establecerse un nuevo equilibrio con el agua del mar.

Si se quiere mantener limitada la intrusión marina debe dejarse un cierto flujo de agua al mar, que es el tributo que hay que pagar para mantener un cierto equilibrio. Si, como consecuencia de una reducción de flujo de agua al mar, existe una recirculación del agua dulce que deje las sales en el terreno, como en los regadíos con agua subterránea, se tiene un cierto incremento de la salinidad del agua dulce de origen diferente a la contaminación por el agua del mar.



Intrusión marina (Custodio, 1993)

Los acuíferos cautivos y los acuíferos libres con un nivel impermeable superior están protegidos naturalmente contra la contaminación, la cual en principio sólo puede producirse donde el acuífero cautivo pasa a ser libre o falta el nivel impermeable superior. En la realidad, un acuífero cautivo puede ser contaminado a través de pozos mal construidos o con corrosiones.

Modelos matemáticos

El modelo matemático es una descripción mediante ecuaciones matemáticas de los fenómenos que tienen lugar en el sistema, representándolos de la forma más simple posible pero lo bastante completa para responder a los objetivos planteados.

La utilización de modelos como método de análisis de los sistemas reales ha experimentado un desarrollo extraordinario, paralelo a los avances en las ciencias de la computación, al aumento de potencia y la rapidez de cálculo de los medios informáticos, así como de su asequibilidad económica.

El primer modelo matemático realizado en 1925 por Streeter y Phelps, describía la variación del oxígeno disuelto y la demanda biológica a lo largo del río Ohio.

El modelo presupone una simplificación importante de los fenómenos que tienen lugar en el río. En aquellos casos en los que existen vertidos

cuya composición es principalmente materia biodegradable, y no existen perturbaciones en el sistema, la experiencia indica que la descripción del modelo puede ser correcta.

Sin embargo, a pesar de estas razones, el modelo presenta importantes limitaciones que han llevado a una progresiva sofisticación del mismo para obtener una cada vez mayor descripción del comportamiento de los elementos.

Esta sofisticación se ha llevado a cabo en tres direcciones:

- La primera se centra en tener en cuenta la dispersión.
- La segunda se refiere a una más compleja descripción de los procesos (sedimentación, fotosíntesis, etc.) que tienen lugar en los balances de oxígeno disuelto (OD) y demanda biológica de oxígeno (DBO).
- La tercera comprende la inclusión de nuevos parámetros (componentes del ciclo del nitrógeno, fósforo, etc.) que proporcionan una visión más compleja de la evolución general de calidad del agua.

La última generación de modelos son los ecológicos, en los cuales se tienen en cuenta los organismos. Se pueden dividir en dos grupos:

- Un primer grupo de modelos se centran en la descripción de las algas y de los nutrientes relacionados.
- Un segundo grupo tiene por objetivo el ciclo del carbono y la consideración de elementos de la cadena trófica.

Etapas de construcción de un modelo

Las etapas que componen la construcción de un modelo son: conceptualización, planteamiento de las ecuaciones, resolución, calibración, discusión de los resultados, validación y aplicación.

En la etapa de conceptualización será necesario estudiar cuáles son los fenómenos que alteran el valor de la variable estudiada. Estos fenómenos vendrán influidos fundamentalmente por las condiciones hidrológicas, térmicas y de concentración de otras especies.

El planteamiento de las ecuaciones actualmente se suele realizar a partir de los balances de masa y energía, de los que se obtienen unas ecuaciones generales de comportamiento, y a partir de experiencias se proponen correlaciones o modelos parciales de interrelaciones entre los componentes.

Una vez obtenidas las ecuaciones que describen el proceso, el siguiente paso será la resolución de las mismas. El método a utilizar vendrá definido por el tipo de ecuaciones propuestas, que, esencialmente, son:

- Ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.
- Ecuaciones diferenciales ordinarias.
- Ecuaciones algebraicas.

El primer tipo de ecuaciones aparece si se quiere obtener la evolución espacio-temporal. El segundo tipo son las que describen el comportamiento de una masa de agua, y el tercero se emplean en estado estacionario. El desarrollo de los ordenadores permite resolver de una manera cada vez más rápida las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales.

La fase de calibración consiste en cotejar los valores calculados por el modelo con valores experimentales.

Se realiza una discusión de los resultados del modelo y los conseguidos experimentalmente, utilizándose algún test estadístico. El fin último es determinar si el modelo describe el comportamiento global de los datos experimentales.

El proceso de comparar los datos obtenidos mediante simulación con nuevos datos experimentales se denomina validación del modelo.

Una vez el modelo ha pasado satisfactoriamente las pruebas de calibración y validación, puede ser utilizado como una herramienta eficaz en la planificación y en la gestión.

Existen diferentes modelos de transporte y dispersión (uni, di y tridimensional) aplicables a ríos, embalses, estuarios y aguas marinas.

La aplicación de modelos matemáticos como herramientas de gestión y planificación, es creciente en España tanto en aguas continentales como marinas.

TRANSPORTE Y DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO

A partir de la presencia de un contaminante en el suelo se pueden desencadenar una serie de procesos de movilización del mismo, cuya acción efectiva dependerá de una parte de la composición y características químico-físicas de la sustancia y por otra de las características geoquímicas de ese suelo.

De forma general, el suelo por sí mismo no es un vector importante de dispersión de contaminantes, pero en combinación con otros factores ambientales se revela como un foco emisor de contaminación de gran importancia en el medio. El agua, y en menor medida el aire, son los agentes dispersantes de la contaminación presente en un suelo.

También hay que tener en cuenta el papel depurador de ciertos componentes del suelo, como son los coloides, dentro del material sólido inorgánico, los materiales húmicos y los microorganismos (bacterias). La retención de los contaminantes se lleva a cabo por medio de fenómenos de absorción física, interacción química o bien los transforman por medio de reacciones bioquímicas.

Transporte y dispersión de los contaminantes desde el suelo al agua y al aire

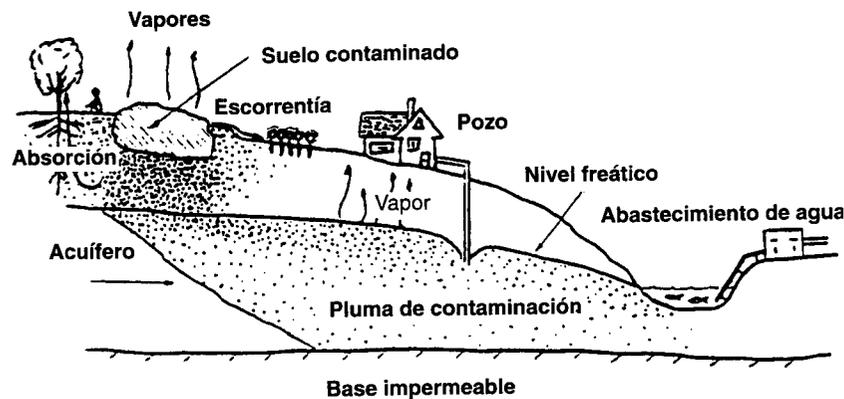
Contaminación de las aguas subterráneas

La contaminación de las aguas subterráneas se origina a través de la lixiviación de los contaminantes desde el foco emisor en el suelo. Tendrá especial incidencia en suelos de alta permeabilidad y ante la presencia, en las capas inferiores, de sistemas acuíferos. Por otro lado, los contaminantes solubles en agua serán arrastrados rápidamente a los estratos inferiores del suelo, quedando en la superficie los insolubles. En los casos de depósitos enterrados se puede producir el contacto directo, estacional o permanente, con la zona saturada de los acuíferos.

En este sentido cabe destacar la función que ejercen los materiales húmicos en el suelo, que son capaces de fijar una gran variedad de sustancias disueltas en el agua edáfica, en particular cationes polivalentes de metales pesados.

Contaminación de aguas superficiales

Dependiendo de la geomorfología, forma de deposición de los contaminantes e intensidad de las precipitaciones, se produce el arrastre de las sustancias a través de la escorrentía superficial. Además, el afloramiento de aguas subterráneas contaminadas es un factor de consideración en la contaminación de aguas superficiales.



Posibles rutas de movilización de un suelo contaminado

Contaminación de la atmósfera

En este caso, el factor desencadenante de la propagación de la contaminación será la volatilidad del compuesto (hidrocarburos, orgánicos aromáticos, etc.), favorecida por condiciones de altas temperaturas. En condiciones de fuertes vientos, los contaminantes presentes en el suelo pueden ser arrastrados y resuspendidos en la atmósfera.

Contaminación del suelo

En cuanto al comportamiento de los principales grupos de contaminantes en relación con el suelo destacan los que a continuación se exponen:

1. Metales pesados

Los suelos que han sufrido un gran incremento en sus contenidos de metales pesados como consecuencia de la actividad humana están sujetos a una redistribución de estos elementos. Su concentración final, la localización en los estratos del suelo y el potencial de toxicidad dependerán de la solubilidad de los compuestos en que se presentan estos metales, su cinética de disolución y los procesos de interacción con los constituyentes del suelo.

La movilidad de los metales pesados está determinada decisivamente por el pH del suelo; a pH ácido aumenta la movilidad del aluminio, zinc, manganeso, cobre, hierro, cobalto y boro, y a pH básico el molibdeno y el selenio.

La forma habitual de presentación de los metales en el suelo es en forma catiónica, tendiendo a hidrolizarse rápidamente en las soluciones del suelo. La acumulación de metales se centra en la interfase entre una fase sólida y una fase acuosa, al adsorberse éstos sobre las superficies sólidas del suelo en forma de complejos neutros, catiónicos y aniónicos. Las arcillas y la materia orgánica, debido a que presentan cargas superficiales negativas, son los componentes del suelo retenedores por excelencia de metales pesados.

2. Compuestos orgánicos

El transporte, las transformaciones y los efectos biológicos de los compuestos químicos orgánicos presentes en los suelos dependen de la retención de éstos por la fase orgánico-mineral. La retención en el suelo, normalmente en la interfase sólido-líquido, se debe a la asociación de los compuestos químicos orgánicos por los constituyentes no solubles del suelo.

Un ejemplo de esto es la retención química de los pesticidas por parte del humus. También influyen procesos como la biodegradación, fotólisis, hidrólisis y biodisponibilidad, las propiedades estructurales y naturaleza heterogénea de los contaminantes y la composición del suelo en sus diferentes estratos.

El contenido en materia orgánica es el factor principal de la retención de compuestos orgánicos no volátiles, con independencia de las propiedades del suelo como tipo y cantidad de arcillas, pH y contenido en óxidos de hierro, ya que tienen poco efecto sobre los procesos de adsorción.

Los microorganismos desarrollan procesos bioquímicos en el medio hídrico edáfico, degradando compuestos orgánicos al oxidarlos y liberándose energía, tanto en terrenos aireados como en condiciones anóxicas. Los factores que determinan básicamente el rendimiento de la biodegradación, son:

- La estructura del compuesto orgánico.
- El tipo y densidad de microorganismos que pueblan el suelo.

- La concentración de contaminantes y de los nutrientes.
- La temperatura, el pH y la humedad.

El suelo como vector de la contaminación sobre el hombre

Considerando al hombre como receptor final de la contaminación, se engloban las rutas de exposición en dos clases, exposición directa e indirecta, según sea el suelo el vector de la contaminación o existan pasos intermedios.

Vías de exposición directa

- Ingestión de suelos.

Determinadas actividades implican un riesgo de ingestión de este suelo o de las partículas del mismo resuspendidas en el aire. Así, jardines, campos de deporte, parques, huertos, etc., sujetos a cualquier actividad contaminante que deposite sus vertidos, escapes o emisiones sobre ellos representan situaciones de riesgo por ingestión, muy especialmente en la población infantil.

- Contacto dérmico.

Originado por causas similares a las expuestas en el apartado anterior, igualmente se centran los riesgos sobre la población infantil.

Vías de exposición indirecta

- Inhalación.

Los suelos contaminados por sustancias químicas volátiles o semivolátiles pueden evaporarlas, fenómeno favorecido por condiciones especiales de alta temperatura y humedad, y concentrarse por condiciones de poca movilidad del aire, llegando a generar concentraciones tóxicas capaces de afectar seriamente a trabajadores y personas expuestas a ellas tanto al aire libre como en el interior de edificaciones situadas sobre suelos contaminados.

- Ingestión de agua.

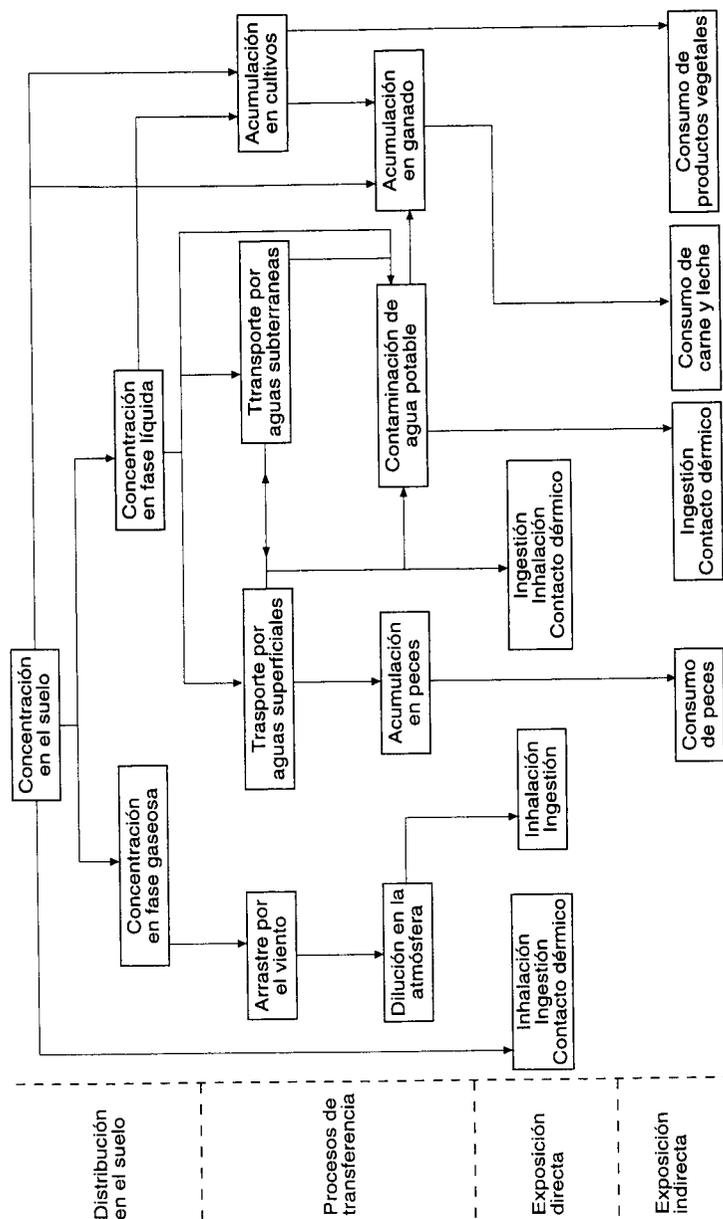
Se inicia con la transferencia de los contaminantes del suelo por lixiviación a través de los estratos del terreno a las aguas subterráneas o por arrastre de la escorrentía superficial. La presencia de sustancias contami-

nantes en acuíferos o en cauces superficiales implica un riesgo para los posibles usuarios de esas aguas (abastecimiento, recreo, industrial, etc.).

- Consumo de alimentos.

La ingestión de contaminantes a través de la comida depende de los alimentos producidos en la zona contaminada, fundamentalmente hortalizas.

En la figura siguiente se presenta un diagrama de flujos en el que se interrelacionan los procesos de transferencia de la contaminación de unos factores a otros, y su posible destino final.



Modelo general de exposición para suelos contaminados

8

Efectos de los contaminantes

EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA

Efectos de los contaminantes físicos

Ruido

Ya se ha comentado que el ruido es una sensación subjetiva. Por tanto, únicamente se va a hacer referencia a los efectos sobre el hombre.

Aun siendo muchos los estudios que se han realizado sobre los efectos perjudiciales que el ruido produce en el hombre y en su comportamiento, la mayoría de ellos hacen referencia a la exposición al ruido durante el trabajo y no a los ruidos que diariamente recibimos. En este último caso los estudios de dosis-respuesta se basan en estimaciones más o menos aproximadas, ya que el nivel de exposición a que puede estar sometida una persona proviene de multitud de fuentes diferentes cuya totalidad es muy difícil abarcar.

Básicamente los efectos del ruido sobre el hombre se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Psicológicos: manifestaciones de sensaciones de molestia (nerviosismo, irritabilidad, cansancio, interferencias con la comunicación hablada, interferencias con el sueño y el descanso, etc.).

- Fisiológicos: alteraciones del estado físico tales como, metabolismo, sistema auditivo, sistema nervioso central, sistema neurovegetativo, sistema circulatorio, etc.

- Actividad: evaluaciones del rendimiento en el cumplimiento de tareas.

De todos los efectos en el hombre que se atribuyen al ruido, el más extendido es la molestia, sensación subjetiva desagradable que varía en función de la actitud mostrada ante un ruido y de la sensibilidad del aparato auditivo de la persona que lo percibe.

La evaluación del rendimiento de tareas es un método de control de molestias que no depende de la subjetividad de la persona, sino que se basa en datos estadísticos de empresas.

Un hombre puede indicar que no le afecta una situación de exposición laboral ruidosa y, sin embargo, mostrar, por el tiempo que emplea en realizar ciertas operaciones, que su rendimiento ha descendido. Al contrario, puede que manifieste violentamente su rechazo de una tarea y, sin embargo, sea capaz de realizarla de un modo satisfactorio. Igualmente, puede mostrar un rendimiento constante mientras se producen cambios fisiológicos en su organismo o un rendimiento alterado sin cambios fisiológicos detectables.

La exposición a niveles elevados de ruido, incluso durante sólo breves períodos, produce una pérdida temporal del oído. Se puede apreciar esto tras una carrera de coches o al salir de una discoteca. En estos casos, por fortuna, se produce una rápida recuperación al volver al medio normal.

Cuando la exposición es de todos los días de trabajo, durante años, la persona termina experimentando una pérdida permanente de oído.

La pérdida de audición debida al ruido se caracteriza por:

- Irreversibilidad.
- No ser progresiva si cesa la exposición que causa el daño.
- Susceptibilidad diferente de cada individuo.
- Pueden presentarse efectos secundarios.
- Posibilidad de prevención.

Se ha comprobado que el ruido afecta tanto a la hora de conciliar el sueño como durante el mismo, pudiendo llegar a despertar a la persona que lo sufre. Este efecto puede generar alteraciones de algunas funciones fisiológicas o incluso un menor rendimiento en el trabajo.

Hay que indicar, asimismo, que no a todas las personas les afecta un ambiente ruidoso de la misma forma, siendo los niños y jóvenes los que lo sufren en menor grado y los ancianos los más propensos.

Radiaciones ionizantes

Los efectos sobre la salud, producidos por la exposición a radiaciones ionizantes, son exactamente iguales, tanto si proceden de fuentes naturales como fuentes artificiales.

No se debe olvidar que el milagro de la vida es posible porque las células que están presentes en la materia viva, son capaces de crecer y reproducirse. La radiación es un condicionante que puede afectar este proceso, debido a que la célula absorbe parte de la energía de radiación, produciéndose un efecto eléctrico llamado ionización, que por efecto sinérgico produce cambios eléctricos en la célula.

Estos cambios se están produciendo continuamente, aunque la estructura anatómica de los seres vivos es capaz de repararlos de una forma efectiva. Cuando el cuerpo no supera estos cambios debido principalmente al exceso de radiación o al tipo de ésta, la célula puede morir o sobrevivir de una forma transformada.

Los efectos producidos sobre el hombre, la flora y la fauna como consecuencia de la exposición a radiaciones ionizantes son directamente proporcionales al tiempo de exposición, tipo de radiación recibida e intensidad de la misma, encontrándose que a niveles altos de exposición los efectos se asemejan a los producidos por la exposición a agentes tóxicos de tipo químico, produciendo efectos agudos y, si la exposición ha sido muy elevada, originando incluso la muerte, como se ha comentado.

En este sentido, se toma como valor de referencia que el 50 % de los individuos irradiados con ondas gamma en todo el organismo es del orden de 5 Sievert (unidad de dosis equivalente en el Sistema Internacional a un J.kg⁻¹). Estos niveles de irradiación están alejados de los valores de la radiación de fondo o de los niveles establecidos como autorizados en los distintos centros de trabajo donde se manipulen fuentes radiactivas.

Los efectos de la muerte celular se ven poco tiempo después de haber estado expuesto a la radiación, efectos inmediatos, mientras que los efectos transformados pueden aparecer mucho tiempo después de haber estado expuesto a la radiación. Hay dos factores a tener en cuenta cuando se ha estado expuesto a la irradiación de rayos ionizantes. Por una parte, si la exposición ha sido sobre todo el cuerpo o en determinados ór-

ganos del mismo, y por otra, si la exposición, ha sido de una sola vez o en períodos discontinuos, ya que el organismo es capaz de regenerarse de alguna manera de los daños causados.

Se puede establecer que un adulto contiene 60×10^{12} células; de éstas, cada día están muriendo varios millones de las mismas, que son reemplazadas por otras nuevas. En este sentido se tiene que la mayor parte de las células muertas por la exposición a una dosis baja o mediana se regeneran al cabo de pocos días o semanas.

Por otra parte, está demostrado que la exposición a una dosis alta de radiación mata tanta cantidad de células que el cuerpo no es capaz de reemplazarlas con suficiente rapidez, provocando por tal motivo serios problemas de quemaduras en la piel o vómitos.

Problemas más graves son los producidos a una dosis de 10^4 unidades, que pueden causar la muerte en días o semanas. Estos efectos se producen cuando la exposición ha sido debido a explosiones de armas nucleares, accidentes en centrales nucleoelectricas o en el campo de la medicina.

En la última década, el accidente más grave ha sido el que se produjo en la central de energía nuclear de Chernobyl, en la cual 300 trabajadores estuvieron expuestos a estos niveles de radiación, de los cuales 29 murieron posteriormente, y situándose la probabilidad de contraer cáncer en torno al 6 por 1.000 en todas aquellas personas que de alguna forma estuvieron expuestas a la radiación.

Todo lo comentado anteriormente nos permite deducir que existe un valor umbral, por debajo del cual no aparecen efectos inmediatos perjudiciales sobre la salud. Este valor umbral está situado alrededor de las 1.000 unidades, lo que supone un valor 500 veces superior a la dosis recibida anualmente por el fondo natural.

Una dosis de radiación que esté por debajo de los valores umbrales puede ocasionar efectos dañinos a largo plazo, entre los que predominan un alto índice de contraer cáncer e incluso defectos teratogénicos.

Efectos producidos por los contaminantes químicos

La elevada concentración de contaminantes químicos en la atmósfera, como consecuencia, fundamentalmente, de la actividad humana, está produciendo efectos que en algunos casos pueden ser importantes sobre la salud humana, animales, plantas e incluso materiales, afectando en algunos lugares al patrimonio histórico-artístico.

La contaminación atmosférica de tipo químico afecta de manera especial a las grandes áreas urbanas e industriales, debido a las altas concentraciones de contaminantes que pueden registrarse. No obstante, además de los importantes efectos puntuales que pueden producirse en estas zonas, la contaminación atmosférica está afectando de forma global a la Tierra, influyendo negativamente sobre la capa de ozono, el clima (efecto invernadero) y los ecosistemas (lluvias ácidas).

A continuación se detallan los efectos de los principales contaminantes químicos estudiados.

Partículas

- Efectos sobre la salud humana.

Los efectos que las partículas pueden causar sobre la salud en el hombre se deben a su penetración en el cuerpo humano a través del tracto respiratorio. Dependiendo del tamaño de las partículas, éstas podrán o no superar las barreras que el organismo humano dispone para su defensa, como los pelos o la mucosa del conducto y cavidad nasal respectivamente. A continuación se muestra el nivel de penetración de las partículas según su tamaño:

Inferior a $0,5 \mu\text{m}$	Alvéolos pulmonares
$0,5$ a $5 \mu\text{m}$	Bronquiolos

Las partículas pueden ser tóxicas por sí mismas o bien transportar moléculas de gases irritantes, permitiendo a éstas alcanzar las áreas sensibles de los pulmones.

- Efectos sobre las plantas.

Las partículas sólidas no tóxicas, presentes en el aire, actúan positivamente sobre algunos tipos de vegetales, siendo ésta la forma de nutrición de la planta al asimilar con ayuda del agua de lluvia los fosfatos y nitratos presentes en las partículas depositadas.

El efecto negativo que la acción de las partículas inertes puede causar en las plantas se debe a la acumulación de éstas sobre las hojas, obstruyendo los estomas y disminuyendo la superficie expuesta al sol, lo que dificulta la función clorofílica.

Las partículas tóxicas depositadas sobre las plantas pueden producir necrosis y caída de las hojas, en las condiciones de humedad adecuadas.

- Efectos sobre los materiales.

La contaminación atmosférica presente en la atmósfera y en particular la materia particulada puede causar problemas estéticos debidos a la deposición de las partículas sobre los materiales, lo cual a su vez implicará la necesidad de realizar limpiezas con mayor frecuencia, suponiendo un importante coste adicional. Además de los efectos económicos y puramente estéticos, las partículas, con ayuda del viento, ejercen sobre los materiales una acción erosiva importante producida por el choque de ésta sobre la superficie de los materiales.

Compuestos de azufre

- Efectos sobre la salud humana.

Los efectos que el SO_2 puede causar sobre la salud humana se centran principalmente, al igual que las partículas, en el sistema respiratorio. Diversos estudios llevados a cabo por la EPA muestran una clara relación entre los niveles de contaminación del SO_2 en la atmósfera y las infecciones respiratorias detectadas en los niños.

La mayor parte de los gases, debido a su solubilidad en agua, quedan retenidos en la mucosa húmeda que tapiza el tracto respiratorio superior, consiguiendo una pequeña cantidad de éstos alcanzar los pulmones. Según la opinión de los expertos, el porcentaje de gas absorbido en la cavidad nasal, dependiendo de la concentración de SO_2 en el gas inhalado, será de:

Concentración	Porcentaje absorbido
Elevada	95 %
Baja	50 %

De acuerdo con los datos que se muestran en la tabla anterior, cuando la concentración de SO_2 en la atmósfera es menor el porcentaje de gas que llega a los pulmones es mayor, aunque la cantidad absoluta, en este caso, es demasiado baja para dañar los pulmones.

Los efectos más importantes del dióxido de azufre se producen cuando éste se introduce en el organismo humano adsorbido sobre la materia particulada o disuelto en las gotas de agua presentes en la atmósfera.

- Efectos sobre las plantas.

Los daños que sobre las plantas puede causar el dióxido de azufre dependerá de la concentración de aire y del tiempo de exposición de la vegetación a la atmósfera contaminante. Así, los efectos sobre las plantas son más importantes en pequeños períodos de exposición a concentraciones elevadas, frente a largos períodos de exposición a más bajas concentraciones. Además, las plantas son más sensibles al dióxido de azufre cuando las condiciones de luz, humedad y temperatura son óptimas para el desarrollo de la actividad fotosintética.

Las alteraciones más frecuentes que se producen en las plantas comienzan con la aparición de manchas lechosas en las hojas, apareciendo posteriormente una pérdida de color de las zonas intervenales. Cuando los síntomas se agudizan, las manchas lechosas se vuelven marrones o rojizas, y en algunas ocasiones los tejidos se mueren.

Cuando la planta se retira de la zona de exposición, pueden aparecer nuevos brotes, los cuales reemplazan las partes necrosas, que terminan cayendo después de un tiempo.

Asimismo, está comprobado que la contaminación de SO_2 procedente de las industrias puede producir alteraciones en la reproducción de las masas forestales, disminuyendo el poder reproductivo de éstas.

- Efectos sobre los materiales.

La reacción de algunos contaminantes con las superficies de los materiales producen deterioros en éstos; tales reacciones se denominan «ataque químico». Por poner algunos ejemplos, las pinturas pueden deteriorarse en presencia de sulfuro de hidrógeno, así como los materiales calizos por el trióxido de azufre o el ácido sulfúrico, al transformarse los carbonatos de estos materiales en sulfuros solubles en agua, lo que produce su debilitamiento con la lluvia.

Óxidos de carbono

- Efectos sobre la salud humana.

La exposición de las personas a concentraciones importantes de monóxido de carbono en el aire puede suponer problemas importantes para la salud. El CO inhalado en combinación con la hemoglobina (Hb) de la sangre produce carboxihemoglobina, la cual reduce la capacidad de la sangre para el transporte de oxígeno a los tejidos, afectando al tiempo de reacción y la sensibilidad visual de las personas. En la tabla siguiente se muestran los efectos producidos por la carboxihemoglobina, según el porcentaje en sangre de ésta.

Nivel de COHb en sangre (%)	Efectos demostrados
Menos de 1,0	Sin efectos aparentes.
De 1,0 a 2,0	Algunas pruebas que muestran efectos sobre el comportamiento.
De 2,0 a 5,0	Efectos sobre el sistema nervioso central. Deterioro de la discriminación de los intervalos de tiempo, agudeza visual, discriminación del brillo y algunas otras funciones psicomotrices.
Más de 5,0	Cambios funcionales cardíacos y pulmonares.
De 10,0 a 80,0	Dolor de cabeza, fatiga, somnolencia, coma, fallos respiratorios, muerte.

Fuente: Stoker, 1981.

El porcentaje en sangre de COHb dependerá de la concentración del CO en el aire, variando dicho porcentaje al variar la concentración de CO. El equilibrio entre ambos se consigue con mayor rapidez cuando se realiza algún esfuerzo físico (véase gráfico página 177).

El dióxido de carbono, a pesar de no producir daños inmediatos sobre las personas, sí afecta de modo indirecto a éstas, debido a los efectos que causa sobre el clima del planeta. Dichos efectos se estudiarán más detenidamente en un apartado posterior, «Efecto invernadero».

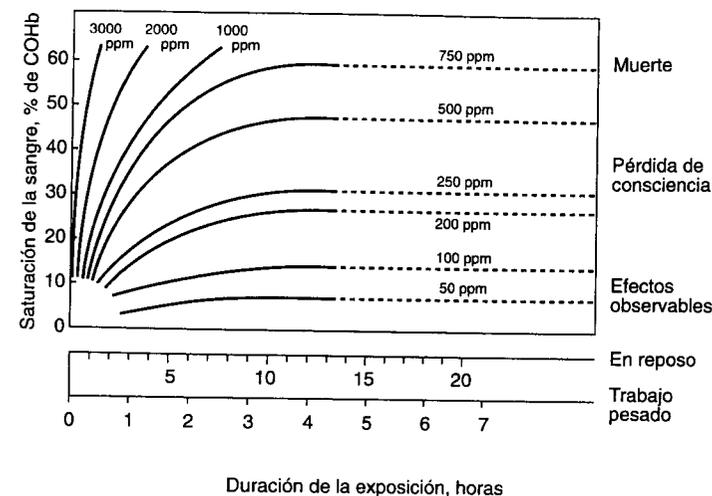
- Efectos sobre las plantas.

Los vegetales son poco sensibles al monóxido de carbono en pequeñas concentraciones; sin embargo, las concentraciones elevadas pueden producir alteraciones en el metabolismo de las plantas.

Compuestos de nitrógeno

- Efectos sobre la salud humana.

Los óxidos de nitrógeno, el NO y el NO₂, al igual que los contaminantes estudiados anteriormente, pueden presentar riesgos para la salud.



Efectos del CO sobre el hombre (Stoker, 1981)

La concentración de NO que se encuentra habitualmente en la atmósfera no se considera un peligro para la salud por sí mismo; sin embargo, éste puede oxidarse en la atmósfera y convertirse en NO₂, que es mucho más nocivo.

Los efectos que el NO₂ puede producir sobre las personas se centran en problemas relacionados con el sistema respiratorio, aunque éstos precisan concentraciones superiores a las que se registran actualmente en la atmósfera. Sin embargo, los estudios de mortalidad animal indican que el NO₂ es unas cuatro veces más tóxico que el NO, siendo mortal para concentraciones superiores a 100 ppm. Las muertes se producen en el 90 % de los casos como consecuencia de la formación de edemas pulmonares.

- Efectos sobre las plantas.

La exposición de las plantas a bajas concentraciones de NO_x durante períodos de tiempo reducidos no suele producir efectos importantes sobre éstas. Cuando el tiempo de exposición aumenta, se pueden presentar diversas alteraciones como defoliaciones y clorosis, y si dura varios días con valores de 2 a 10 ppm, pueden aparecer necrosis de características similares a las indicadas en el caso de SO₂.

- Efectos sobre los materiales.

La exposición de tintes textiles a atmósferas contaminadas con óxidos de nitrógeno puede producir la pérdida de color en las prendas.

Fluoruros

Los efectos nocivos que el flúor puede causar sobre el medio ambiente se centrarán sobre la vegetación próxima a las fábricas de cerámica, aluminio, ladrillos, etc., como principales fuentes de emisión de este contaminante.

- Efectos sobre las plantas.

Los efectos del flúor sobre las plantas son muy variables, dependiendo de la especie, pudiéndose producir efectos visibles en algunas plantas expuestas a bajas concentraciones de fluoruros, sin que se aprecien efectos nocivos en otras que han sido expuestas a concentraciones superiores.

Los principales síntomas que pueden aparecer en las plantas contaminadas se manifiestan en forma de necrosis de color marfil, negras o marrón rojizo. La exposición continuada de la planta al flúor provocará el aumento de la necrosis hasta la muerte de los tejidos.

En las masas forestales los daños ocasionados por la exposición al flúor son claramente visibles, debido a la pérdida de color de las hojas.

Hidrocarburos

- Efectos sobre la salud humana.

El riesgo potencial de los hidrocarburos sobre la salud humana dependerá en gran medida del tipo de compuesto, siendo uno de los factores de riesgo más importantes a tener en cuenta su intervención en la formación de smog fotoquímico. Según experiencias realizadas, los hidrocarburos alifáticos a concentraciones inferiores a 500 ppm no han producido efectos nocivos para la salud. Los hidrocarburos aromáticos, sin embargo, presentan una mayor peligrosidad, pudiendo producir irritaciones en las membranas mucosas y causar lesiones sistemáticas al ser inhalados.

Los hidrocarburos aromáticos polinucleares, además, están considerados como posibles compuestos cancerígenos y mutagénicos. No obstante, no se han detectado efectos nocivos a concentraciones inferiores a 25 ppm para el resto de hidrocarburos aromáticos.

Las concentraciones que actualmente se registran en la atmósfera, a la vista de lo anteriormente expuesto, no parece que puedan producir, al menos de forma directa, efectos nocivos sobre el hombre, salvo en el caso

de los hidrocarburos aromáticos polinucleares, en los que existe la posibilidad de que se produzcan dichos efectos a bajas concentraciones con períodos de exposición elevados.

Ozono y oxidantes fotoquímicos

- Efectos sobre la salud humana.

El ozono tiene una fuerte capacidad oxidante, pudiendo producir efectos nocivos para la salud humana, como irritación de mucosas oculares, respiratorias y de la piel. A partir de concentraciones de 0,3 ppm parecen iniciarse irritaciones en nariz y garganta, pudiendo provocar fuerte fatiga y falta de coordinación en períodos de exposición de dos horas a concentraciones comprendidas entre 1 y 3 ppm. Según las investigaciones realizadas, para períodos de exposición similares y a concentraciones de 9 ppm se pueden presentar edemas pulmonares graves. Aún no se conocen los efectos que puede producir en el hombre la exposición al ozono durante largos períodos de tiempo a los niveles atmosféricos habituales.

- Efectos sobre las plantas.

Los oxidantes, además, pueden producir daños en la vegetación en concentraciones que ya se están alcanzando en algunas ciudades. El ozono y el PAN (nitrato de peroxiácido) son los principales responsables de estos daños, los cuales se manifiestan en forma de manchas blancas o punteados claros sobre el haz de las hojas, tintura plateada o vidriosa en el envés de la hoja o ataque generalizado en las hojas jóvenes.

- Efectos sobre los materiales.

Entre los efectos más destacados de los oxidantes sobre los materiales se encuentran la posibilidad de desintegración del caucho y su influencia en la corrosión de los metales.

Metales

- Efectos sobre la salud humana.

Los metales, una vez en la atmósfera, se depositan sobre el suelo, pasando a la cadena trófica. Entre las características más importantes de gran parte de los metales se encuentra su toxicidad en bajas concentraciones,

siendo, además, bioacumulables tanto por la vegetación como por la fauna, por lo que los efectos serán más notables en los eslabones secundarios, incluida la salud del hombre. Así, por ejemplo, un individuo que se alimente de productos vegetales, carne y leche que tengan una exposición continua al cadmio, alcanzará rápidamente el nivel de cadmio que puede entrañar riesgos para su salud, debido a la acumulación de este contaminante en los riñones y el hígado, principalmente. En el caso del plomo, el 10 % del plomo ingerido se incorpora a la sangre, pudiendo producir efectos nocivos sobre la salud.

Compuestos orgánicos

- Efectos sobre la salud humana.

Entre los diferentes compuestos orgánicos, se pueden distinguir por su problemática contaminante los compuestos orgánicos volátiles (COV) y compuestos derivados del cloro como los policlorobifenilos (PCB's), dioxinas y furanos. Los efectos que sobre la salud humana puede causar este tipo de compuestos se sigue investigando en la actualidad. Como nota destacada, se puede hacer referencia a sus posibles efectos carcinógenos y mutagénicos.

En particular, las dioxinas y furanos son compuestos extremadamente tóxicos y bioacumulables que, una vez lanzados a la atmósfera, se introducen en la cadena trófica por deposición sobre el suelo y los vegetales, afectando en mayor medida a los eslabones superiores de la cadena, como consecuencia de su poder bioacumulativo.

La principal vía de entrada en el hombre se produce por ingestión (90 %) y en menor medida inhalación (10 %). Entre los síntomas más destacados que el hombre puede sufrir se encuentra el cloroacné, pudiéndose presentarse además, trastornos enzimáticos, cardiovasculares, del metabolismo de grasas e hidratos de carbono, lesiones hepáticas y neurológicas, etc.

Problemas regionales de contaminación atmosférica

De un tiempo a esta parte, los científicos de todo el mundo han comenzado a estudiar ciertos contaminantes atmosféricos a escala planetaria, debido a los efectos que pueden llegar a producirse en los ecosistemas. Entre los problemas más característicos detectados están:

- Las lluvias ácidas.
- El efecto invernadero.
- La disminución de la capa de ozono.

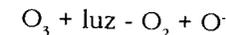
Lluvias ácidas

Gran parte del dióxido de azufre y de los óxidos de nitrógeno que se emiten a la atmósfera retornan de nuevo a la superficie de la tierra bien en estado gaseoso, principalmente sobre las zonas próximas a las fuentes de emisión, o bien en forma de ácidos disueltos en las gotas de lluvia. La formación de ácido sulfúrico y nítrico en la atmósfera se produce como consecuencia de la oxidación del dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, respectivamente.

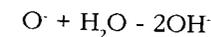
Estas reacciones se producen tanto en fase gaseosa como en fase líquida por acción de un agente oxidante. Este agente oxidante puede ser el ión radical hidroxilo (OH), el ozono u otro compuesto oxidante formado en la atmósfera.

El ozono existe en la troposfera en cantidades bajas, del orden de 0,04 ppm, y en la estratosfera en cantidades mucho más altas.

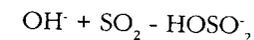
Este ozono se fotodisocia según la reacción:



Este oxígeno atómico es muy reactivo y se combina con el agua para dar radicales hidroxilo:

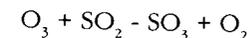


El ácido sulfúrico se forma por oxidación del SO_2 . En fase gaseosa, el agente oxidante, principalmente, es el radical hidroxilo que reacciona con el SO_2 para dar el radical $HOSO_2\cdot$:

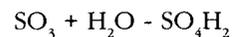


Este radical, mediante una serie de reacciones complejas y poco conocidas, se transforma en ácido sulfúrico SO_4H_2 .

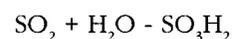
También en fase gaseosa el ozono actúa sobre la molécula de SO_2 según la reacción:



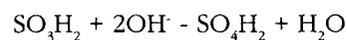
Este anhídrido sulfúrico reacciona con el agua de la atmósfera para formar ácido sulfúrico:



Pero la gran parte del SO_2 que se transforma en ácido sulfúrico en la atmósfera se realiza en fase líquida. El SO_2 es un gas bastante soluble en agua y se disuelve en las gotas y nieblas presentes en la atmósfera, formándose el ácido sulfuroso:



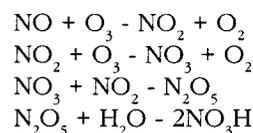
Este ácido se oxida por medio de los radicales hidroxilo o agua oxigenada:



Los óxidos de nitrógeno se oxidan también a ácido nítrico por medio de los agentes oxidantes ya mencionados. En este caso las oxidaciones tienen lugar preferentemente en fase gaseosa:



y por otra parte:



Estas reacciones se pueden producir cerca de los focos de emisión de los contaminantes, formando lo que se llama el smog ácido.

Pero si se producen en las capas altas de la atmósfera, estos ácidos se pueden formar y precipitar en forma de lluvia a grandes distancias de los focos emisores de SO_2 y NO_x .

Estas lluvias van a tener un carácter marcadamente ácido. El pH del agua de lluvia normal suele estar entre 5 y 6 debido a la disolución en el agua del CO_2 atmosférico. Estas lluvias ácidas tienen pH menores de 5 y en algunos lugares se ha detectado un pH menor de 2. Por tanto van a producir unos efectos sobre los ecosistemas.

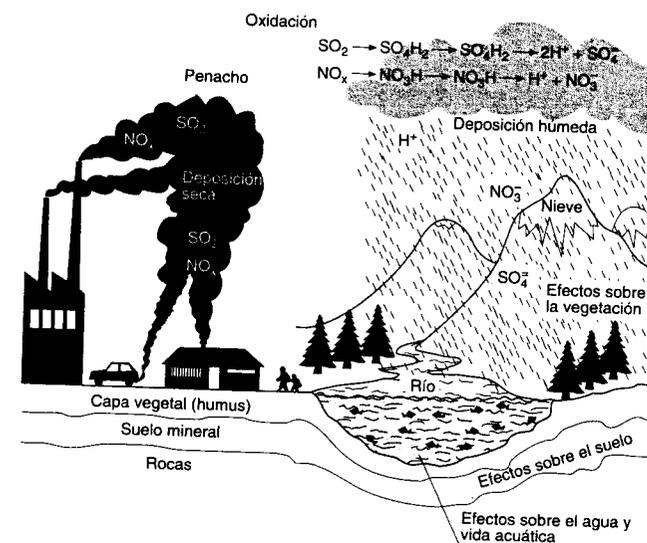
Estos efectos que sobre el medio ambiente provocan las lluvias ácidas se ponen de manifiesto principalmente en el medio acuoso, en los suelos y en la flora.

La acidificación de los medios acuosos, lagos, pantanos, ríos, etc., facilita la disolución en el agua de iones metálicos (aluminio, cadmio, zinc, plomo, etc.), los cuales, debido a su toxicidad pueden causar graves problemas sobre peces y plantas acuáticas. La propiedad bioacumulativa, comentada anteriormente, hará que su integración en la cadena trófica pueda provocar problemas aún más graves en etapas posteriores de la cadena (fauna, seres humanos).

Los efectos sobre el suelo de las lluvias ácidas son, si bien en menor medida, similares a los producidos en el medio acuoso, siendo el efecto más importante de la acidificación de éste la más fácil lixiviación de iones metálicos como el cadmio, el magnesio y el aluminio.

La lluvia ácida afecta de manera muy importante a las plantas. Grandes extensiones de masa arbórea, fundamentalmente coníferas, han desaparecido o se han visto seriamente afectadas en los países nórdicos, Centroeuropa, Canadá y EEUU.

Al producirse los efectos a grandes distancias de las emisiones de los contaminantes, las consecuencias de esta contaminación pueden manifestarse en países distintos a los emisores.



Lluvias ácidas (Sanz Sá, 1991)

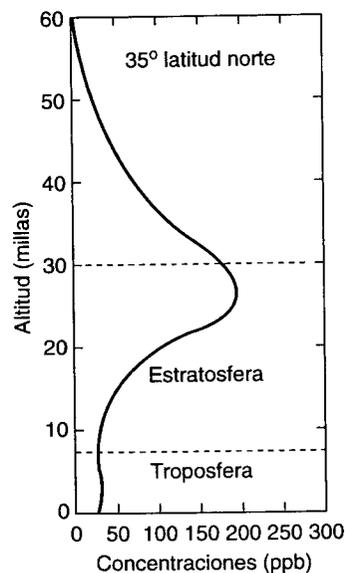
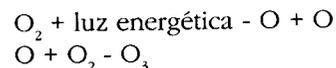
Disminución de la capa de ozono

En los años setenta, los científicos descubren la posibilidad de que el deterioro de la capa de ozono que se venía produciendo fuera debido a la emisión a la atmósfera de determinados compuestos químicos como consecuencia de la actividad humana.

Como ya se ha comentado, la mayor parte del ozono que existe en la atmósfera se encuentra en la estratosfera, el 80 % entre los 20 y los 35 km de altitud, denominándose capa de ozono.

En esta altitud, el ozono se está creando y destruyendo continuamente, manteniendo un equilibrio en su concentración relativamente constante. Varía con las épocas del año debido a las condiciones especiales de luz, oxígeno y de la estratosfera.

Las reacciones de formación son:

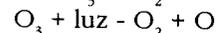
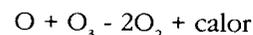


Variación de la concentración atmosférica de ozono con la altitud (Stoker, 1981)

O = oxígeno atómico.

O₃ = ozono.

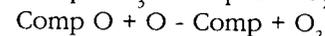
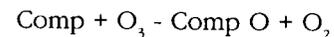
Se descompone según las reacciones:



El ozono se caracteriza por absorber la luz ultravioleta procedente del espacio exterior. Esta radiación ultravioleta es nociva para los seres vivos, produciendo diversos efectos según el tipo de organismo como: enfermedades en la piel, disfunciones en órganos, esterilidad, mutación de células, diversos tipos de cánceres, alteraciones en la fotosíntesis de las plantas, etc. Por tanto, una disminución drástica de la capa de ozono tendría unas consecuencias muy negativas sobre los seres vivos.

La molécula de ozono es muy oxidante, y reaccionará con ciertos compuestos que lleguen a la estratosfera. Estos compuestos serán, en general, gases muy estables cuya permanencia sin alterarse en la atmósfera será muy grande.

Las reacciones que tienen lugar son:



Comp = compuesto que reacciona con el ozono.

Estos compuestos pueden ser átomos de cloro, bromo, etc., moléculas como N₂O, o radicales como hidroxilo o carbonilo.

Una de las familias de compuestos que destruye la capa de ozono es la de los clorofluorocarbonos (CFC's). Estas moléculas, utilizadas como refrigerantes, gases propelentes, en la lucha contra los incendios, etc., se caracterizan por su gran estabilidad.

Los CFC's se descomponen mediante la luz ultravioleta, desprendiendo átomos de cloro que reaccionan con el ozono según la reacción general expuesta arriba.

Además de los CFC's, otros compuestos clorados y bromados gaseosos estables desprenden cloro y bromo en la estratosfera, como son el tetracloruro de carbono, el cloroformo, el bromuro de metilo, etc.

Para frenar este ataque, los países industrializados se han comprometido a disminuir las producciones de CFC's.

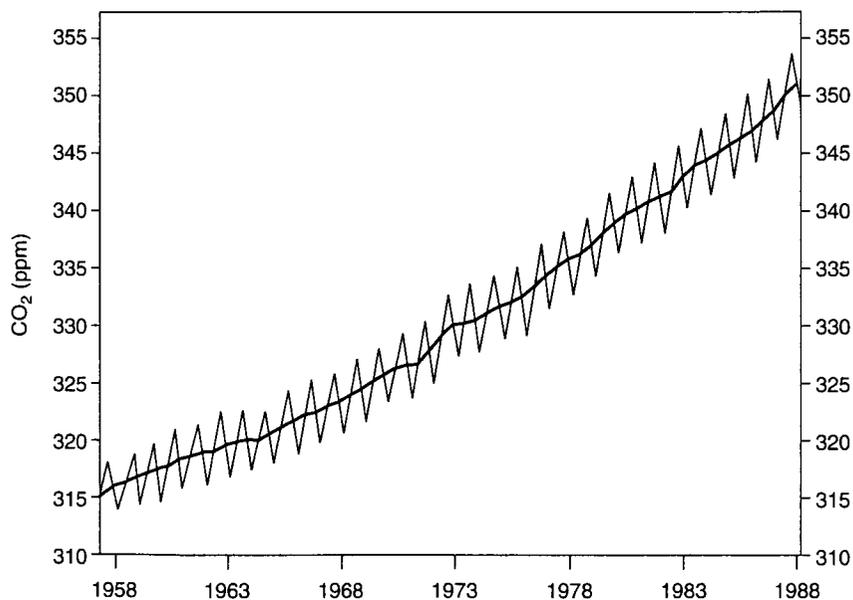
Efecto invernadero

El hombre ha modificado el ciclo del carbono como consecuencia de la quema de carburantes fósiles y de la tala indiscriminada de árboles, lo que por una parte supone el lanzamiento masivo de CO_2 a la atmósfera y por otra la pérdida de absorción total de éste debida a la vegetación.

Se conoce como efecto invernadero a la alteración que puede producirse en la temperatura de la tierra como consecuencia, fundamentalmente, del aumento en la concentración de CO_2 y de otros gases como el metano, los CFC's, el N_2O , etc., en la atmósfera.

Los niveles de emisión del CO_2 en la actualidad son de unos 5 millones de toneladas, que proceden sobre todo de la combustión de carburantes. Esta emisión cada año va en aumento, dando lugar a un crecimiento de la concentración del CO_2 en la atmósfera. En la gráfica siguiente se observa la evolución de la concentración media mensual de CO_2 en la atmósfera medida en el observatorio de Mauna Loa, Hawai (1958-1988).

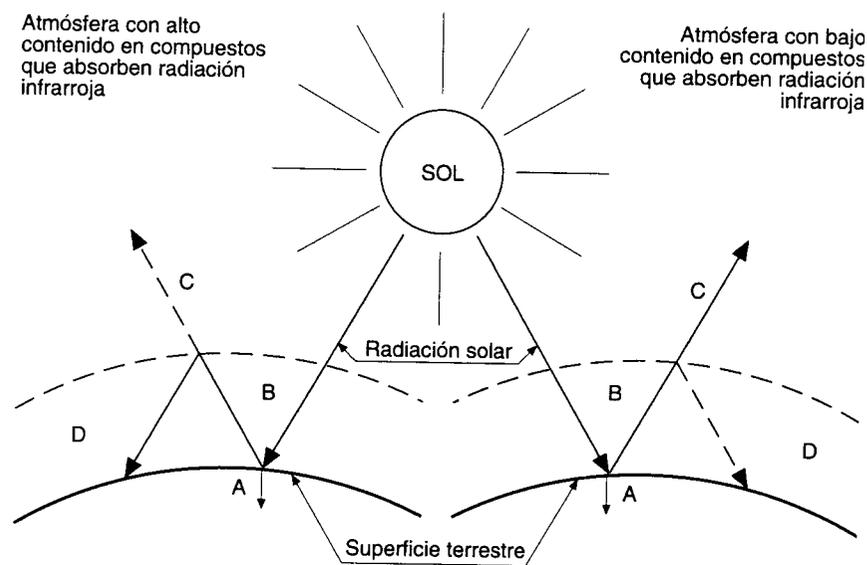
La oscilación anual se debe principalmente a la absorción del dióxido de carbono por la vegetación durante la primavera y el verano del hemisferio norte.



(Botkin, 1993)

Los gases que componen la atmósfera permiten el paso hacia la tierra de la energía luminosa en forma de radiaciones de onda corta. Estas radiaciones luminosas son absorbidas por los materiales terrestres y posteriormente reflejadas en forma de energía calorífica (enfriamiento de la tierra) en radiaciones infrarrojas, las cuales son absorbidas por el dióxido de carbono y otros gases, metano, CFC's, N_2O , etc., produciéndose un desprendimiento de calor y, por tanto, una elevación de la temperatura en la atmósfera. El vapor de agua también absorbe esta radiación infrarroja, pero su concentración es muy variable.

Cuanto mayor sea la concentración de los gases absorbentes de la radiación infrarroja en la atmósfera, mayor será la cantidad de energía absorbida y, por tanto, más se elevará la temperatura del aire. El efecto es similar al que produce la cubierta de vidrio en un invernadero, de ahí su nombre.



- A: Energía absorbida por la tierra.
 B: Energía calorífica reflejada por la tierra.
 C: Fracción de la energía reflejada devuelta al espacio.
 D: Fracción de energía reflejada absorbida por la atmósfera.
 Cuando mayor es la concentración de los compuestos que absorben la radiación infrarroja, más aumenta la temperatura de la tierra.

Efecto invernadero producido por los compuestos que absorben la radiación infrarroja (Sanz Sá, 1991)

En la tabla siguiente se han representado las concentraciones de los principales gases que influyen en el efecto invernadero, así como el porcentaje de aumento anual, la contribución por kilogramo y la contribución total.

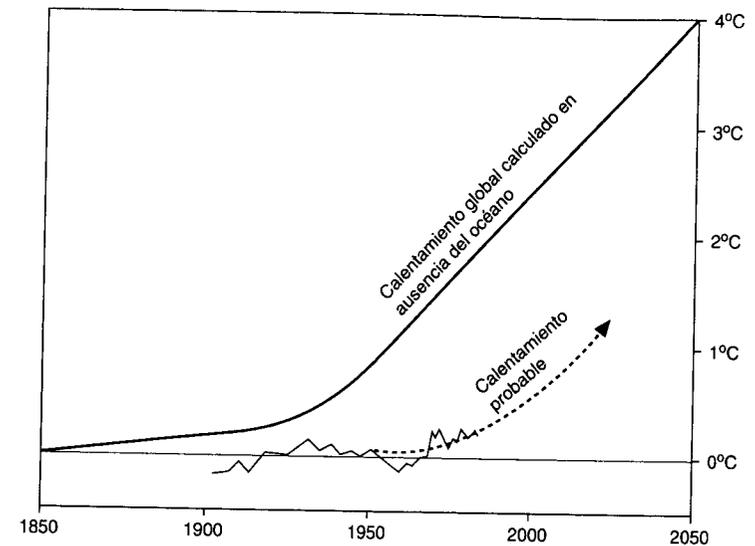
CONTRIBUCIONES AL EFECTO INVERNADERO

Gas	Concentración en ppm	% de aumento anual	Contribución por kg	Contribución ef. invern.
CO ₂	352	0,5	1	60
CH ₄	1,7	1,1	45	15
N ₂ O	0,31	0,3	300	5
O ₃	0,030	0,5	3	8
CFC's	0,00078	6	6.000	22

Si aumentase la temperatura de la Tierra se producirían cambios climáticos drásticos que afectarían a todo el planeta. Una de las consecuencias podría ser la descongelación de los casquetes polares, con el consiguiente aumento del nivel del mar. Esta teoría la anunció la Agencia Norteamericana para la Protección del Medio Ambiente (EPA), prediciendo que el nivel del mar subiría unos dos metros de aquí al año 2100. La mayoría de los científicos no está de acuerdo con dichos datos.

En la actualidad, los científicos no se ponen de acuerdo tanto al hablar del efecto en sí como de las consecuencias. En los cambios meteorológicos intervienen un elevado número de variables, por lo que globalmente no siempre un aumento de la concentración de estos gases en la atmósfera llevará implícito el aumento de la temperatura de la Tierra. Así, por ejemplo, este aumento de temperatura podría verse contrarrestado, por el incremento de la evaporación del agua, lo que provocaría un aumento de la nubosidad y por tanto un descenso de la temperatura. Por otra parte, la molécula de agua también absorbe radiación infrarroja, lo que produciría el efecto contrario.

Otro factor que influye es la absorción de radiación por el agua de los océanos, que mitigaría dicho calentamiento. Según los datos de los que se dispone, la temperatura media del planeta aumentó 0,6° C entre los años 1885 y 1940, disminuyendo posteriormente unos 0,2° C en todo el mundo hasta el año 1960 y aumentando un poco globalmente a partir de dicha fecha. Estos últimos datos estarían en concordancia con el efecto de los mares.



Calentamiento medio de la atmósfera, calculado teniendo en cuenta el efecto invernadero sólo para la atmósfera (trazo grueso) y estimado habida cuenta del lento calentamiento de los océanos (trazo punteado). (Deplessy, 1993)

EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

Los contaminantes del agua, ya sean introducidos por vía doméstica, industrial o agrícola, pueden producir, en general, numerosos tipos de efectos que habrán de estudiarse en función del uso que se quiera dar al agua, o bien, dentro de la perspectiva de tener unas aguas de mejor calidad, con el fin de preservar la vida acuática y poderla dedicar a fines recreativos o puramente estéticos.

En el presente apartado se comentan los principales efectos que producen cada uno de los elementos contaminantes, ya sean sobre el hombre, los ecosistemas o los materiales.

Hay que destacar, además de los efectos que el agua contaminada puede producir por su consumo directo, aquellos que se originan indirectamente, como es el caso de la producción de alimentos con agua contaminada o la transmisión de enfermedades (huéspedes intermedios).

Efectos provocados por los sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión absorben la radiación solar, de modo que disminuyen la actividad fotosintética de la vegetación acuática. Al mismo tiempo obstruyen los cauces, embalses y lagos. También intervienen en los procesos de producción industrial y pueden corroer los materiales y encarecer el costo de depuración del agua.

Efectos provocados por los fenoles

Los peces, especialmente las especies grasas como la trucha, el salmón y las anguilas, los acumulan. Pero el mayor problema reside en que cuando llegan a las plantas de cloración convencionales dan lugar a los clorofenoles, confiriendo al agua un sabor muy desagradable incluso en unidades de ppb.

Efectos provocados por las grasas y aceites

El hecho de que sean menos densos que el agua e inmiscibles con ella, hace que se difundan por la superficie, de modo que pequeñas cantidades de grasas y aceites pueden cubrir grandes superficies de agua. Además de producir un impacto estético, reducen la reoxigenación a través de la interfase aire-agua, disminuyendo el oxígeno disuelto y absorbiendo la radiación solar, afectando a la actividad fotosintética y, en consecuencia, la producción interna de oxígeno disuelto. Encarecen los tratamientos de depuración, y algunos aceites, especialmente los minerales, suelen ser tóxicos.

Efectos provocados por el calor

El principal efecto es la disminución del oxígeno disuelto. Del mismo modo, puede actuar directamente sobre el metabolismo de los animales acuáticos. El aumento de temperatura incrementa las velocidades de reacción biológicas y la solubilidad de algunos compuestos.

Efectos provocados por los detergentes

No es sólo la bioconcentración el problema medioambiental, también lo es el acceso del oxígeno a la masa de agua, a causa de la espuma en

su superficie y el hecho de aumentar la toxicidad del 3,4-benzopireno, otro microcontaminante de enorme acción cancerígena.

El verdadero problema medioambiental causado por los detergentes reside en los polifosfatos, incluidos en su formulación para ablandar el agua.

Efectos provocados por los hidrocarburos

Los más destacables por su peligrosidad son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) (núcleos aromáticos condensados), no sólo presentes en pequenísima cantidad en el petróleo sino también en los bosques de abetos y hayas. Son cancerígenos y, en particular el benzopireno —que es el mejor estudiado—, en el que ha observado un corto período de latencia.

A pesar de su enorme liposolubilidad, apenas se acumulan en el tejido graso ya que se metabolizan pronto, siendo uno de sus metabolitos el agente carcinógeno. Constituyen un gran número, y por ello se suele limitar su análisis a los seis más frecuentes: fluoranteno; 3,4-benzofluoranteno; 11,12-benzofluoranteno; 3,4-benzopireno; 1,12-benzopireno; indeno-1,2,3-pireno. En el proceso de potabilización una parte suele ser eliminada en la floculación-filtración y la otra en la oxidación, quedando muy poca cantidad en el agua tratada.

Parece ser que los detergentes potencian su toxicidad, como antes se ha dicho. A pesar de su inercia química se ha comprobado su biodegradación, aunque lenta.

Los efectos de la contaminación del petróleo pueden considerarse a corto y a largo plazo.

- Los efectos a corto plazo se engloban en dos categorías:

- Los causados por revestimiento y asfixia.

Entre los efectos se encuentran: la reducción de la transmisión de luz, disminución del oxígeno disuelto, daños en las aves acuáticas, ya que las buceadoras y nadadoras sufren la impregnación de las plumas, lo que las incapacita para el vuelo y la flotación.

- Los procedentes de la toxicidad del petróleo.

Entre los efectos debidos al carácter tóxico del petróleo pueden subrayarse los siguientes:

- * Narcosis: los hidrocarburos saturados con bajos puntos de ebullición producen, en baja concentración, narcosis en los invertebrados marinos, y en mayores concentraciones su muerte.

* Letalidad: los hidrocarburos aromáticos de bajo punto de ebullición (xileno, tolueno, benceno) son venenosos para todos los seres vivos, pudiendo provocar la muerte por contacto directo con la mancha de petróleo.

- Entre los efectos a largo plazo podemos destacar:

— Acumulación y amplificación en la cadena trófica: una vez que un hidrocarburo penetra en la cadena trófica permanecerá totalmente inalterable independientemente de su estructura, lo que conduce a su acumulación y ulterior concentración hasta alcanzar cantidades tóxicas.

— Vehiculación de ciertos compuestos: ciertos compuestos, como los plaguicidas, disueltos en la película de petróleo pueden alcanzar concentraciones más elevadas de las que normalmente alcanzarían en agua contaminada, llegando así más fácilmente hasta los organismos susceptibles de contaminarse.

Efectos provocados por las sustancias húmicas

No presentan un problema medioambiental por sí solas, sino porque al ser degradadas lentamente, llegan, entretanto, a las plantas urbanas de cloración, donde producen compuestos halorgánicos (generalmente clorados) de uno o dos átomos de carbono, sustancias, como sabemos, cancerígenas (el más abundante es el cloroformo).

Esto no sería problema si se añadiera mayor cantidad de cloro de forma que se completara su oxidación, pero al no ser posible, sólo se oxidan parcialmente y los restos orgánicos que quedan producen los llamados trihalometanos o compuestos haloformes.

Como en tantos tóxicos cancerígenos, resulta muy difícil establecer la relación causa-efecto entre cloración y carcinogenicidad, debido al largo período de latencia (de 20 a 30 años) entre exposición y supuesta aparición de cáncer.

Efectos provocados por la materia orgánica

Sus efectos son diferentes según se trate de materia orgánica biodegradable o no biodegradable. La primera provoca una disminución del oxígeno disuelto por consumo de éste en los procesos de degradación, reduciendo la capacidad de autodepuración de un río. Cuando se ha con-

sumido todo el oxígeno disuelto, la degradación se torna anaeróbica, desapareciendo la vida animal y apareciendo compuestos típicos de la putrefacción, generalmente mal olor, como el sulfhídrico, la putrescina, etc.

La segunda puede presentar efectos diferentes como son la acumulación en los tejidos animales y la toxicidad.

Efectos provocados por la materia inorgánica

Los efectos debidos a la presencia de materia inorgánica pueden ser de características muy diversas. Pueden ser tóxicos, como los efectos producidos por las sales de los metales pesados, inductivos, como los producidos por la acidez y la alcalinidad, que varían la toxicidad de algunas sustancias, disuelven precipitados, etc.

La salinidad, en general, disminuye la concentración de oxígeno disuelto, favorece la formación de espumas y aumenta la presión osmótica. Por otra parte, la presencia de sales inorgánicas en grandes cantidades puede inutilizar procesos industriales y producir incrustaciones.

Un problema peligroso es el que presentan los nitratos que entran a formar parte del medio hídrico por vía agrícola. Todavía no está totalmente aclarado el efecto que puede tener sobre la salud humana el consumo de agua con alto contenido de nitratos. El principal efecto patógeno que podría atribuirse a los nitratos es la metahemoglobinemia, originada por la reacción de los nitritos con la hemoglobina de la sangre, con formación de hierro ferroso y generación de metahemoglobina.

Esta enfermedad se caracteriza por una dificultad respiratoria que en ocasiones acaba en asfixia. Los más propensos a sufrir esta intoxicación son los niños y los animales de granja. Cuando la concentración normal de metahemoglobina, que está comprendida entre el 1 y 2 %, se eleva al 10 %, se presenta como primera manifestación clínica un proceso de cianosis. Concentraciones entre el 30 y el 40 % producen signos de anoxia, pudiendo presentarse estados de coma con concentraciones superiores.

Por lo que se refiere a una posible relación de los nitratos con el cáncer, debida a la formación de nitrosaminas, no existe hasta el momento evidencia directa.

Los metales pesados son tóxicos por ser biorrefractarios y bioacumulativos. Cuando se arranca desde los niveles tróficos más bajos y alcanza a los superiores o el hombre, el metal ha podido concentrarse incluso varios miles de veces. El ejemplo más espectacular, en relación con la acti-

vidad biológica, es el trágico episodio ocurrido en la ciudad de Minimata (Japón) en 1960.

En efecto, en la bahía del mismo nombre eran vertidas aguas residuales que contenían compuestos orgánicos e inorgánicos de mercurio. Los microorganismos presentes en el agua transformaban estos compuestos de mercurio en metilmercurio, compuesto extraordinariamente tóxico que es fácilmente asimilado y concentrado por la cadena alimentaria hasta llegar a la población humana a través de los peces.

Efectos provocados por los compuestos orgánicos sintéticos

En las últimas décadas se ha producido una intensa proliferación de compuestos orgánicos de síntesis. Entre ellos, los PCB's y los pesticidas son los que mayor preocupación ambiental han suscitado. Esto se debe a que son compuestos relativamente estables, difíciles o lentamente degradables, capaces de bioacumularse y de amplificarse a lo largo de las cadenas tróficas de los ecosistemas, y con efectos tóxicos para distintos niveles de organismos, manifestando su toxicidad de forma aguda y, sobre todo, crónica: alteraciones en la conducta, en el desarrollo embrionario, en la viabilidad de los individuos.

Efectos provocados por los organismos patógenos

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los efectos que los diferentes tipos de organismos pueden producir sobre el hombre son los siguientes:

- Virus: infecciones víricas, inflamaciones cutáneas y oculares.
- Bacterias: infecciones gastrointestinales, endémicas o epidémicas, como cólera, fiebres tifoideas, salmonelosis, etc.
- Protozoos y metazoos: enfermedades parasitarias como la hidatidosis, esquistosomiasis, etc.

EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

Dada la facilidad de transmisión de contaminantes del suelo a otros medios como el agua o la atmósfera, serán estos factores los que generen

efectos nocivos, aun siendo el suelo el responsable indirecto del daño por lo que los efectos han sido tratados en otros puntos.

La presencia de contaminantes en un suelo supone la existencia de potenciales efectos nocivos para el hombre, la fauna en general y la vegetación. Estos efectos tóxicos dependerán de las características toxicológicas de cada contaminante y de la concentración del mismo. La enorme variedad de sustancias contaminantes existentes implica un amplio espectro de afecciones toxicológicas cuya descripción no es objeto de este trabajo.

De forma general, la presencia de contaminantes en el suelo se refleja de forma directa sobre la vegetación, induciendo su degradación, la reducción del número de especies presentes en ese suelo, y más frecuentemente la acumulación de contaminantes en las plantas, sin generar daños notables en éstas. En el hombre, los efectos se restringen a la ingestión y contacto dérmico, que en algunos casos ha desembocado en intoxicaciones por metales pesados y más fácilmente por compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles.

Indirectamente, a través de la cadena trófica, la incidencia de un suelo contaminado puede ser más relevante. Absorbidos y acumulados por la vegetación, los contaminantes del suelo pasan a la fauna en dosis muy superiores a las que podrían hacerlo por ingestión de tierra. Cuando estas sustancias son bioacumulables, como es el caso de varios metales pesados, los pesticidas, los PCB's y un largo etcétera, el riesgo se amplifica al incrementarse las concentraciones de contaminantes a medida que ascendemos en la cadena trófica, en cuya cima se encuentra el hombre. A través de la carne, la leche o el pescado se pueden presentar intoxicaciones de importancia tras una bioacumulación de sustancias tóxicas y persistentes.

A continuación se exponen una serie de ejemplos significativos de los cambios experimentados por las reacciones químicas que tienen lugar en el suelo, al verse afectadas por la presencia en el mismo de diversos tipos de contaminantes, modificándose las fórmulas de aparición de las especies químicas normales constituyentes o incorporándose especies ajenas.

Las precipitaciones ácidas sobre determinados suelos originan, gracias a la capacidad intercambiadora del medio edáfico, la liberación del ión aluminio, desplazándose hasta ser absorbido en exceso por las raíces de las plantas, afectando a su normal desarrollo.

En otros casos, se produce una disminución de la presencia de las sustancias químicas en el estado favorable para la asimilación por las plantas. Así pues, al modificarse el pH del suelo, pasando de básico a ácido, el ión manganeso que está disuelto en el medio acuoso del suelo se oxida, volviéndose insoluble e inmovilizándose.

A este hecho hay que añadir que cuando el pH es bajo las partículas coloidales como los óxidos de hierro, titanio, zinc, etc., que pueden estar presentes también en el medio hídrico, favorecen la oxidación del ión manganeso.

Esta oxidación se favorece aún más en suelos acidificados bajo la incidencia de la luz solar en las capas superficiales de los mismos, produciéndose una activación fotoquímica de las partículas coloidales anteriormente citadas, ya que tienen propiedades semiconductoras.

Otro proceso que se ve afectado, en este caso por los depósitos incontrolados de metales pesados tóxicos, es la biometilación, es decir, el proceso por el cual reaccionan los iones metálicos y determinadas sustancias orgánicas naturales, cambiando radicalmente las propiedades físico-químicas del metal. Es el principal mecanismo de movilización natural de los cationes de metales pesados.

Los metales que ofrecen más afinidad por la biometilación son: mercurio, plomo, arsénico y cromo.

Los compuestos organometálicos así formados suelen ser muy liposolubles y, salvo casos muy puntuales, las consecuencias de la biometilación natural son irrelevantes, convirtiéndose realmente en un problema, cuando los metales son añadidos externamente en forma de vertidos incontrolados.

Aparte de los efectos comentados de forma general, hay otros efectos inducidos por un suelo contaminado:

- Degradación paisajística.

La presencia de vertidos y acumulaciones de residuos en lugares no acondicionados, genera una pérdida de calidad del paisaje, a la que se añadiría en los casos más graves el deterioro de la vegetación, el abandono de la actividad agropecuaria y la desaparición de la fauna.

- Pérdida de valor del suelo.

Económicamente, y sin considerar los costes de la recuperación de un suelo, la presencia de contaminantes en un área supone la desvalorización de la misma, derivada de las restricciones de usos que se impongan a este suelo (restricciones a la producción de artículos de consumo, prohibición de edificar, etc.) y, por lo tanto, una pérdida económica para sus propietarios.

SEGUNDA PARTE

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN: PREVENCIÓN Y CORRECCIÓN

1

Introducción

Los productos residuales o contaminantes generados tanto por la industria como por la sociedad en general, se producen en los tres estados: sólido, líquido y gaseoso, y por tanto, afectan a los tres medios: atmósfera, agua y suelo.

El concepto de residuo ha ido cambiando con el tiempo. Como ya se ha comentado en el apartado de agentes contaminantes, existen bastantes definiciones, pero quizás la más aceptada actualmente sea la que define a los residuos como aquellos productos de desecho generados en las actividades de producción y consumo que no alcanzan, en el contexto en que son producidos, ningún valor económico, lo que puede ser debido tanto a la falta de tecnología adecuada para su aprovechamiento como a la inexistencia de un mercado para los productos recuperados.

Por tanto, un producto considerado como residuo en la actualidad podría no serlo al cabo de unos años.

Los residuos se pueden clasificar según sus características y estado en:

- Aguas residuales urbanas o asimilables.
- Aguas residuales agrícolas y ganaderas.
- Aguas residuales industriales.
- Emisiones gaseosas de fuentes difusas o focos determinados, tanto industriales como de otro tipo.

- Residuos sólidos urbanos o asimilables.
- Residuos sólidos inertes.
- Residuos sólidos, líquidos, pastosos o gaseosos confinados peligrosos para la salud humana o el medio ambiente.

De todos ellos ya se ha hablado suficientemente en los capítulos anteriores.

Uno de los mayores problemas que tiene la sociedad actual es precisamente la gestión de estos residuos.

Hasta hace relativamente poco tiempo, a finales de los años setenta, el destino que se les daba a estos residuos era un tratamiento o simplemente se vertían a los distintos medios sin más, con graves riesgos para la salud humana o el medio ambiente.

El tratamiento de los residuos lo que hace en ocasiones es trasladar la contaminación de un medio a otro. Los siguientes ejemplos son un claro exponente de dicho transporte.

Un tratamiento de aguas trae consigo la producción de lodos que se han de eliminar de alguna forma.

La incineración de residuos sólidos produce gases, partículas y vapores que contaminarán el aire si no se realiza un adecuado tratamiento.

El almacenamiento de residuos sólidos urbanos en un vertedero puede producir diversos efectos sobre el aire y las aguas superficiales y subterráneas si no existe una salida adecuada de los gases que emanan y una buena recogida y tratamiento de los lixiviados líquidos, dando lugar a incendios y explosiones, así como a la contaminación de las aguas.

Desde los años setenta hasta el día de hoy, el enfoque en la gestión de los residuos ha variado radicalmente a nivel mundial.

Al examinar los distintos programas de actuación sobre medio ambiente de la Comunidad Económica Europea se observa el cambio de actitud con respecto a la gestión de los residuos.

En el primer programa (1973-1976), la gestión estaba encaminada fundamentalmente al tratamiento y eliminación de los residuos.

El segundo (1977-1981), tercer (1982-1986) y cuarto programa (1987-1992) entran cada vez más de lleno en lo que se ha llamado la minimización de los residuos, es decir, evitar que éstos lleguen a producirse para no tener que tratarlos o eliminarlos.

Por último, el quinto programa (1993-2000) sigue profundizando en la minimización de residuos, estableciendo una jerarquía de opciones a la hora de gestionarlos:

- 1.º No generación de residuos.
- 2.º Fomento de reutilización y reciclaje.
- 3.º Optimización del tratamiento o eliminación.

En los siguientes apartados de este manual se estudian los diversos procesos de prevención y tratamiento de los distintos contaminantes.

En el capítulo de minimización se tratarán de forma conjunta los distintos métodos para todos los residuos, mientras que en el capítulo de corrección se expondrán las distintas técnicas de tratamiento o eliminación de los mismos, dependiendo del medio en el que se encuentren.

2

Minimización de los productos residuales

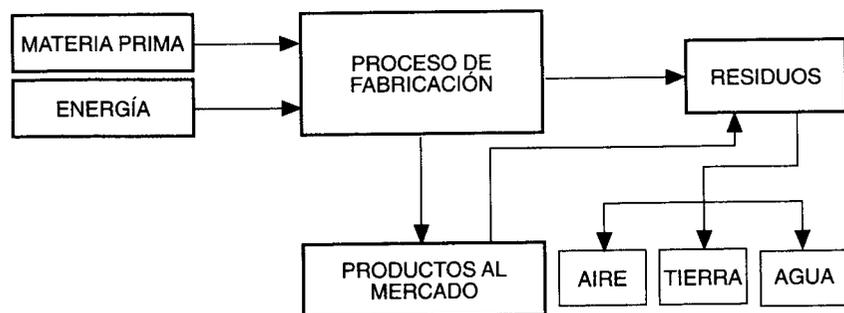
El economista estadounidense Georgescu Roegen definió el proceso productivo como «la transformación de preciosas materias primas en basuras sin valor». Sin llegar a conceptos tan extremistas, sí es cierto que nuestro espacio vital no es ilimitado, y tampoco los recursos que en él se hallan.

Como ya se ha comentado, de la sociedad en general y de los procesos productivos en particular nace uno de los grandes males que afectan a nuestro entorno: los residuos, la basura.

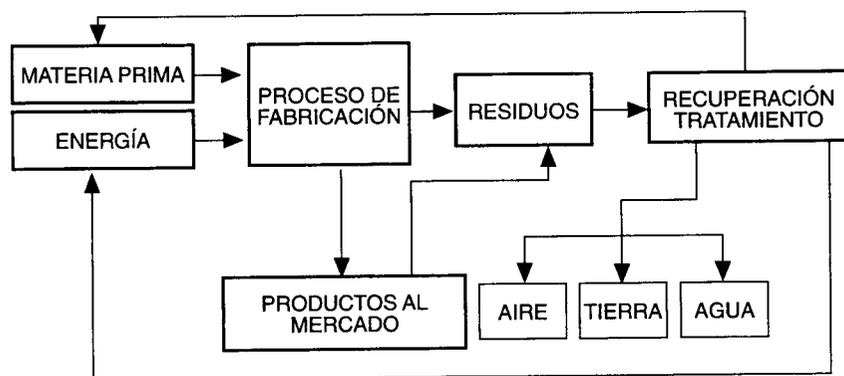
Si analizamos los procesos de fabricación y consumo pueden encontrarse dos posturas: un modelo «tradicional» y otro «limpio».

En el modelo tradicional, la empresa y la sociedad se despreocupan casi totalmente de los residuos generados tanto por el proceso productivo como por sus productos, los cuales van a parar directamente a los tres elementos básicos: tierra, agua y aire. Hasta ahora ha sido la actitud más frecuente.

El modelo de producción «limpio» aparece como consecuencia de la necesidad del respeto de la sociedad por el medio ambiente y los recursos naturales. En Europa se ha comenzado a llamar a esta corriente «ecoeficiencia», basada en el concepto de «producir más limpio es más rentable que limpiar». El objetivo de este principio es asignar el máximo valor a los productos con el mínimo impacto medioambiental.

**Modelo tradicional**

Una forma de conseguir estos objetivos es «minimizar» la producción de residuos, bien disminuyendo su generación o bien procesándolos a través de una fase de recuperación y tratamiento para lograr así una evacuación inocua en el ambiente e incluso ser reutilizados como materias primas.

**Modelo limpio**

Se entiende por minimización de residuos y emisiones todas aquellas operaciones encaminadas a asumir medidas tanto organizativas como operativas que estén encaminadas a disminuir e incluso anular la formación de residuos. Este conjunto de operaciones tiene que ser económica y técnicamente factible en la empresa y no tanto en las administraciones públicas.

A continuación se exponen las distintas técnicas de minimización de residuos, con ejemplos tanto de la empresa como de la sociedad en general, así como los pasos a seguir para la implantación de un plan de minimización en la empresa.

TÉCNICAS DE MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS

Las técnicas de minimización de residuos no siempre están basadas en tecnologías punta o deben requerir grandes inversiones de capital. Muchas técnicas son únicamente simples cambios en el manejo de los materiales de la línea de producción.

A la hora de gestionar los residuos, hay que tener en cuenta que, en primer lugar, se ha de intentar minimizar éstos. En segundo lugar, habría que tratar los residuos generados y, por último, aquellos a los que no se hubiese podido aplicar las técnicas anteriores serían depositados en lugares adecuados y seguros.

Las técnicas de minimización de residuos se pueden dividir en cuatro grandes grupos:

- Reducción en origen.
- Reducción de volumen.
- Reciclaje y recuperación.
- Tecnologías limpias.

Reducción en origen

Consiste en reducir o eliminar la generación de residuos. La reducción en origen puede llevarse a cabo mediante las siguientes técnicas:

- Gestión del inventario.
- Modificación de los procesos de producción.

Gestión del inventario

El desarrollo de procesos de revisión para todas las materias primas adquiridas es el primer paso en el establecimiento de un programa de gestión de inventario. Esto implica que la adquisición de todos los materiales tóxicos sea aprobada, de forma que si existen materias primas alternativas menos peligrosas o contaminantes que puedan emplearse en dicho proceso se utilicen.

Otra vía en la gestión de inventario es la de asegurar que sólo se adquiere la cantidad necesaria de materias primas, lo que requiere el establecimiento de un estricto control en la gestión de *stocks*. En muchas ocasiones, materias primas en exceso o caducadas son eliminadas como residuos peligrosos. Los costes de su eliminación normalmente excederán del coste de adquisición.

El control de inventario a nivel de empresa es una técnica de minimización de residuos que se está desarrollando rápidamente. Se aplica a todo tipo de industrias, no importa su tamaño. La gran ventaja de esta orientación es que no es cara o difícil de aplicar.

Modificación de los procesos de producción

Se pueden realizar modificaciones en los procesos de producción de forma que se reduzca la generación de residuos. Esta reducción puede estar acompañada por el cambio de materias primas utilizadas, de forma que se incremente la eficiencia en la reducción de residuos.

La técnica de modificación de los procesos de producción puede ser dividida en:

- Mejora de los procedimientos de operación y mantenimiento.
- Cambio de materias primas o aditivos.
- Modificaciones en los equipos de proceso.

1. Mejora de los procedimientos de operación y mantenimiento

Mediante la introducción de mejoras y un control más estricto de la explotación y mantenimiento de los procesos industriales de producción puede reducirse notablemente la cantidad de residuos industriales.

Adicionalmente, el funcionamiento operativo del proceso productivo debe ser optimizado de forma que se consiga la máxima eficiencia en la utilización de las materias primas.

Una revisión de estos procedimientos incluiría todas las fases, desde la entrada de materias primas hasta el almacenamiento del producto acabado.

Un área muy importante es, pues, la correspondiente a los procedimientos de manejo de materiales que incluye:

FUENTES DE RESIDUOS	ÁREA	RESIDUOS POSIBLES
Recepción de materiales	Diques de descarga, tuberías de entrada, áreas de recepción, etc.	Materiales fuera de especificación, contenedores estropeados, derrames, goteos, etc.
Almacenamiento materias primas o productos finales.	Tanques, silos, talleres, almacenes, etc.	Materias con exceso o fuera de especificaciones, goteo de bombas, válvula y tuberías, contenedores estropeados y vacíos, etc.
Producción	Mezclado, curado, destilado, lavado, formulado, etc.	Agua de lavado, disolventes, productos fuera de especificación, catalizadores, contenedores vacíos, aditivos, aceites, agua de aclarado, filtrado, goteos, derrames, etc.
Servicio de apoyo	Talleres	Disolventes, agentes de limpieza, lodos de desengrase, aceites, grasas, chatarras, etc.
Servicio de apoyo	Garajes	Aceites, filtros, disolventes, ácidos, baños de limpieza, lodos, baterías
Servicio de apoyo	Centrales de generación de energía y calderas	Cenizas volantes, productos químicos, aceites, etc.
Servicio de apoyo	Torres de refrigeración	Productos químicos, contenedores vacíos, sedimentos de la base de la torre.
Servicio de apoyo	Laboratorios	Reactivos, productos químicos fuera de especificación, muestras, etc.

Realizando un control sobre cada uno de los apartados se puede conseguir fácilmente una reducción en la generación de residuos.

2. Cambio de materias primas o aditivos

Un ejemplo claro es el cambio de combustibles como carbón o gasóleos por gas natural, que es mucho más limpio en cuanto a las emisiones de los productos de combustión a la atmósfera. Este ejemplo también es aplicable en las ciudades que dispongan de redes de distribución.

La reformulación de un producto es una de las técnicas más difíciles de la reducción de residuos, pero una de las más efectivas. Ejemplos clásicos son los siguientes:

- Sustitución de la tinta con base de disolvente por tinta con base de agua.
- Uso de pinturas con base de agua en lugar de pinturas con base de disolvente.
- Eliminación del cadmio de los pigmentos.
- Utilización de ozono en lugar de biocidas orgánicos en las torres de refrigeración.

La reducción o eliminación del uso de materias peligrosas en los procesos de producción disminuirá no sólo la generación de residuos peligrosos, sino también la cantidad de materiales peligrosos emitidos a la atmósfera y de los vertidos de aguas residuales. Esto, por lo tanto, reducirá la inversión en capital fijo de sistemas de tratamiento, necesarios para lograr una adecuada gestión de los residuos.

Otros ejemplos que se dan en la vida cotidiana son:

- Utilización de pilas que no contengan mercurio o cadmio.
- Uso de detergentes sin fosfatos.
- Sustitución de gasolinas con plomo.

3. Modificación de los equipos de proceso

La generación de residuos puede reducirse de forma significativa mediante la instalación de equipos de proceso más eficientes o modificando el equipo existente.

La modificación del equipo de producción para que se mejore la eficacia de la operación requiere una amplia comprensión tanto del proceso productivo como de la generación de residuos. Algunos ejemplos son:

- Fabricación de pasta de papel (Kraft) blanqueada en ciclo cerrado.
- Temple y galvanización con zinc en continuo.
- Fabricación de pasta de papel Kraft blanqueada con oxígeno.
- Instalar sistemas de enjuague por sprays o nieblas.
- Diseño adecuado de todos los tanques de enjuague.
- Fabricación de cartón por medio de circuitos cerrados hidráulicos.
- Sustitución de taladrinas o aceites de corte propios de sistemas convencionales por el rayo láser como herramienta de corte.
- Pelado de legumbres por procedimientos mecánicos.
- Sustitución de células de mercurio por otro tipo de células en electrólisis de ClNa, para producción de cloro.
- Desoxidación de objetos metálicos por vibración.
- Decapado de hilo de cobre al alcohol.

Reducción de volumen

Incluye aquellas técnicas que permiten la separación de unos residuos de otros, y de esta forma disminuir el coste de eliminación de los residuos o bien poder reutilizarlos o reciclarlos. Una vez concentrado el residuo es mucho más fácil recuperar los materiales, que pueden tener un valor económico.

Esta reducción se puede hacer de dos maneras por segregación o por concentración:

— La segregación consiste en separar los distintos flujos de residuos, realizándose generalmente en su origen.

— La concentración reduce el volumen de los residuos mediante un tratamiento físico (filtración por gravedad o vacío, ultrafiltración, ósmosis inversa, etc.).

En las tablas de la página 210 se exponen algunas técnicas de este tipo.

Reciclaje y recuperación

El reciclaje consiste en la reutilización del residuo en el mismo proceso que lo ha producido, bien directamente o bien mediante algún tratamiento previo.

Ejemplos de técnicas de reducción de volumen

PROCESO	TÉCNICA
Reacción química	<ul style="list-style-type: none"> — Optimizar las variables de reacción en el diseño del reactor. — Optimizar el método de adición de reactivos. — Eliminar los catalizadores tóxicos.
Filtración y lavado	<ul style="list-style-type: none"> — Eliminar o reducir el número de filtros auxiliares o filtros recambiables. — Escurrir el filtro antes de abrirlo. — Uso de lavado en contracorriente. — Reciclado de las aguas de lavado. — Mejorar el rendimiento del deshidratado de lodos. — Filtrar sólo cuando sea necesario.
Limpieza de partes	<ul style="list-style-type: none"> — Cubrir todas las unidades de limpieza con disolventes.
Tratamiento de superficies	<ul style="list-style-type: none"> — Prolongar la vida de los baños mediante la eliminación de contaminantes. — Reutilizar el agua de lavado. — Instalar enjuagues por sprays o nieblas.
INDUSTRIA	TÉCNICA
Componentes electrónicos	Utilización de un equipo de compactación para reducir el volumen de los residuos de los tubos de rayos catódicos.
Circuitos impresos	Utilización de un filtro prensa para deshidratar los lodos con 60 % sólidos y venta posterior para la recuperación de metales.
Formulación de pesticidas	Utilización de bolsas de recolección para cada línea de proceso y tratar las partículas captadas.
Laboratorios de investigación	Segregar los disolventes de lavado y reutilizarlos en fórmulas para tinta.
Formulación de pinturas	Segregar los disolventes del tanque de limpieza y reutilizarlos en formulación de pinturas.

La recuperación se basa en la utilización del residuo generado en otro proceso distinto del que lo ha producido. Como en el caso del reciclaje, este residuo se podrá introducir en el nuevo proceso directamente o, si es al contrario, antes deberá sufrir algún tipo de manipulación o tratamiento.

La recuperación tiene su fundamento en los siguientes puntos:

- El poder calorífico de los residuos que puedan utilizarse como fuentes de energía mediante la combustión.
- La recuperación de componentes que pueden ser separados y utilizados por otras industrias, con fines diferentes de los que generaron el residuo.
- El aprovechamiento directo de los residuos por otras industrias.

Estas técnicas pueden eliminar los costes de disposición, reducir los costes de materias primas y proporcionar ingresos por la venta de residuos. La eficacia de estas técnicas dependerá de la capacidad de segregación de los residuos recuperables de otros residuos del proceso, asegurándose una máxima concentración del material recuperable. Los residuos pueden ser recuperados en la planta o fuera de ella.

La selección dependerá del tipo de residuo, de las materias primas del proceso de producción y de los costes.

La recuperación o el reciclado fuera de la planta se aplica cuando la planta no tiene equipo disponible, cuando no se producen suficientes residuos en planta que hagan rentable la instalación de un sistema de tratamiento, o cuando el material recuperado no puede ser reutilizado en el proceso de producción. Aceites, disolventes, lodos de galvanización, baños de proceso, baterías, chatarras metálicas y residuos plásticos son enviados habitualmente fuera de la planta para su recuperación.

Para algunos materiales, como disolventes o ácidos, el recuperador puede proporcionar el servicio de recogida-recuperación-retorno para reutilización.

En ocasiones, el reciclado o la recuperación no es la solución más adecuada, aun siendo técnicamente factible, por diversos problemas que se pueden presentar como son:

- El cambio en la composición del residuo.
- La variación en la cantidad de residuo generado.
- La posibilidad de que se produzcan residuos más peligrosos en el tratamiento del reutilizable.
- La contaminación del producto final debido a la utilización del residuo como materia prima.

• El coste del tratamiento puede que no sea económicamente viable, dependiendo del mercado.

A continuación, se citan varios ejemplos de reciclado o recuperación en industrias.

Reciclaje

- Reciclaje de fluoruros de las fábricas de aluminio por recolección y depuración de gases.
- Pintura por electroforesis, aclarado, ultrafiltración y reciclado de las aguas de aclarado.
- Sistemas de reciclaje de aguas en circuito cerrado en las industrias papeleras.
- Reciclado del amoníaco contenido en el gas procedente de la producción del ácido nítrico.
- Reciclado de disolventes.
- Reutilización del cromo en la industria del cuero.
- Preparación de arenas de moldeados con arenas regeneradoras.
- Regeneración de los baños ácidos de decapado en la industria del acero.
- Reciclado del flúor recuperado en el proceso Montedison de producción de superfosfatos.
- Reciclado de soluciones de cromo y níquel mediante sistemas de evaporación en procesos de electrodeposición.

Recuperación

- Utilización de los aceites de engrase usados como combustible para los hornos de cemento.
- Recuperación de calor en diferentes procesos de producción del mismo.
- Fabricación de combustibles a partir de residuos orgánicos.
- Utilización de electrodos agotados para la fabricación de carburo de calcio.
- Utilización de escorias granuladas de alto horno como material ligante de terraplenes.
- Reutilización de las aguas residuales tratadas para regadío.

- Pirólisis con recuperación de energía en la destrucción de los neumáticos usados.
- Tratamiento de las lejías bisulfíticas procedentes del blanqueo de la pasta de papel para su posterior comercialización como materia prima.
- Fabricación de refractarios electrofundidos a partir de materias primas obtenidas de residuos.

Las técnicas de recuperación y reciclado no sólo son aplicables en las industrias, sino que también se llevan a cabo habitualmente en la vida cotidiana. En muchas ciudades ya se recogen selectivamente el cartón, el vidrio, chatarras, etc., para su posterior reciclaje o recuperación.

Asimismo, ya se realiza una segregación en origen por los propios ciudadanos de los distintos tipos de residuos, vidrio, cartón, plástico, metales, pilas, materia orgánica, etc., de tal manera que los recuperables se envían a los procesos de reciclado y únicamente queda como residuos para eliminar una pequeña parte. Lógicamente, esto todavía no es extrapolable, ya que para que este tipo de gestión se pueda llevar a cabo se necesita primero un gran nivel de compromiso por parte de las instituciones, empresas y ciudadanos en general.

Como ejemplo estimativo, de las más de 12 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos producidos en España durante el año 1991, el porcentaje de los componentes es el siguiente:

COMPONENTE	PORCENTAJE
Materia orgánica	49 %
Papel y cartón	20 %
Plásticos	7 %
Vidrio	8 %
Metales	4 %
Varios	12 %

Teniendo en cuenta esta composición, se puede establecer que anualmente se desperdician en los vertederos aproximadamente las siguientes cifras:

- Metales: 480.000 toneladas.
- Vidrio: 1.000.000 toneladas.

- Papel y cartón: 2.500.000 toneladas.
- Materia orgánica: 6.000.000 toneladas.

Estas cifras representan entre el 40 y el 75 % de la producción de dichos materiales.

La mayoría de estos componentes son reciclables o recuperables de una manera u otra. Por poner un ejemplo, se puede comentar que del papel que actualmente va a la basura se puede recuperar en un 62 % aproximadamente, ya que el resto está compuesto por papel destinado a higiénicos y sanitarios, plastificados, etc. Ante estos guarismos, se observa que para cubrir las necesidades de las fábricas de papel, habría sido necesario conseguir que la mitad del papel que se tira a la basura se hubiera recuperado.

Los métodos tradicionales de tratamiento de residuos —vertido, incineración y compostaje— necesitan ser complementados por razones técnicas, económicas y ambientales, debido principalmente al progresivo encarecimiento de los costes en el tratamiento de los residuos, y a la pérdida de parte o de la totalidad del valor potencial de los componentes contenidos en los residuos. Éstas son algunas de las razones por la que en los últimos tiempos se está tendiendo a buscar otros sistemas de tratamiento complementarios que incorporen en su filosofía la recuperación o reutilización de los recursos contenidos en los residuos.

La vanguardia más avanzada en la gestión de residuos urbanos está enfocándose hacia el tratamiento integral de las basuras con recuperación de subproductos y/o energía. El balance económico de estos procesos da como resultado que existe una partida positiva por la venta de los valores recuperados. Este factor, por sí mismo, puede llegar a ser suficientemente importante, quizá no para hacer económicamente rentable este proceso, pero sí puede indudablemente presentar costes similares o incluso inferiores a los de los sistemas convencionales. Por otra parte, no cabe la menor duda de que a nivel técnico son más complejos que los métodos tradicionales.

Las metas que buscan estos nuevos sistemas de tratamiento se pueden resumir en los siguientes términos:

- Mejora en la eficacia de la conservación del medio ambiente.
- Reintroducir en el ciclo de consumo materiales con destino a desaparecer que tienen un lugar real en el mercado.
- Desarrollo de nuevas tecnologías o mejoras en las ya existentes encaminadas a la recuperación de materias primas o energía contenida en las basuras domésticas.

- Encontrar el aprovechamiento más adecuado para los valores contenidos en los residuos, abriendo nuevas vías de utilización.
- Minimización de los efectos contaminantes en el agua, aire y suelo provocada por una mala gestión en el tratamiento de los residuos.
- Ingresos por venta de productos y energía.
- Reducción del volumen de residuos vertidos, lo que supone menos problemas de contaminación y más ahorro energético.
- Menor necesidad de espacio dedicado al vertido controlado.
- Generar una infraestructura industrial y comercial capaz de crear puestos de trabajo.

Partiendo de la máxima de que *todo aquello que se recupera no contamina*, se han ido buscando y desarrollando nuevas fuentes de aprovechamiento de materias primas y energía contenidas en los residuos.

Como se observa, en esta gestión de los residuos sólidos urbanos no solamente están la recuperación y el reciclaje sino todas las técnicas de minimización de residuos, incluidas las tecnologías limpias que se comentan a continuación.

Tecnologías limpias

Las Naciones Unidas definen las tecnologías limpias, o tecnologías sin residuos, como aquellos procesos de fabricación de productos en los que todas las materias primas y energías son utilizadas de la forma más racional e integrada en el ciclo (recursos naturales o recursos materiales primarios → producción → consumo → recursos materiales secundarios), de manera que el impacto sobre el normal funcionamiento del medio ambiente sea mínimo.

La manera de lograr este objetivo es la implantación de nuevos procesos productivos, aunque esto también se consigue en mayor o menor medida mediante la aplicación de algunas de las distintas técnicas comentadas anteriormente.

La modificación de los procesos existentes, la reducción en origen y el reciclaje constituyen planteamientos estrechamente ligados a los sistemas de producción, por lo que pueden integrarse bajo la común denominación de cambios de proceso en sentido amplio.

La aplicación de nuevas tecnologías suele traer consigo un cambio drástico en los procesos de producción, y viene precedida por una fase

más o menos importante de investigación y desarrollo. Por tanto, esta técnica es más fácilmente aplicable en las plantas nuevas.

DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE UN PLAN DE MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA EMPRESA

El desarrollo y la implantación de un programa de minimización de residuos es un punto fundamental en cualquier programa de gestión ambiental. Un programa eficaz de minimización se debe basar en un conocimiento exacto y profundo de los residuos generados y en la aplicación adecuada de los métodos de reducción de residuos en cada caso. Estos métodos serán técnica y económicamente factibles en cada proceso que se vayan a implantar.

Para que un plan de estas características se pueda llevar a efecto, es necesario que estén involucrados todos los departamentos de la empresa.

Las fases del desarrollo del plan son:

- Primera Fase: organización y planificación del plan.
- Segunda Fase: estudio e implantación de medidas de minimización.
- Tercera Fase: seguimiento, control y revisión de las medidas adoptadas.

Primera fase: organización y planificación del programa

El plan en general y esta fase en particular se apoyan en dos pilares fundamentales sin los cuales es muy difícil que un proyecto de estas características se pueda llevar a cabo: el compromiso a nivel de dirección de ejecutar dicho plan y la participación de todos los departamentos de la planta.

Sin el apoyo de la dirección, muchas de las soluciones que se podrían llevar a la práctica nunca se ejecutarían, mientras que si no participan parte de los departamentos en la elaboración del plan, seguramente se producirían lagunas en la elaboración y/o implantación del mismo.

La Primera Fase consta de:

- Organización del equipo de trabajo de minimización.
- Realización de una auditoría ambiental enfocada a los residuos.

Organización del equipo de trabajo de minimización

En este apartado se contemplan los siguientes aspectos:

- El nombramiento de un responsable del plan que sea el encargado de dirigir y coordinar todos los trabajos del mismo. Esta persona deberá ser técnicamente competente y con suficiente autoridad para realizar el trabajo.
 - La formación de un equipo de trabajo constituido por personal de administración y de planta. La composición del mismo dependerá del tipo de factoría, pero, en líneas generales, deberán estar representados aquellos departamentos implicados en la ejecución del plan (departamento de ingeniería, finanzas, investigación más desarrollo, ambiental, compras, etc.).
 - La implicación de todo el personal de planta dentro del plan de minimización.
 - La definición de los objetivos del plan.

Realización de una auditoría/evaluación ambiental enfocada a los residuos

Es la base de partida para la elaboración del plan. Con ella se obtienen los datos necesarios tanto de producción de residuos como de identificación de los procesos que los generan.

Se basa en:

- Recopilación y medida de los residuos (sólidos, líquidos y gaseosos) generados.
- Identificación de las fuentes que los generan.
- Realización de un balance de masas de generación de residuos de cada proceso y de la planta, así como su coste económico.

Segunda fase: estudio e implantación de medidas de minimización

En esta segunda fase se identificarán, evaluarán y seleccionarán las distintas tecnologías o procedimientos de minimización de residuos para cada proceso. La magnitud de este estudio dependerá de la complejidad de los procesos de fabricación y de la cantidad y variedad de los residuos generados, pero básicamente los pasos a seguir son:

- Listado y clasificación de los distintos flujos de residuos.
- Esto lleva consigo un estudio en profundidad de los procesos, analizando cada parte minuciosamente.
- Identificación de las técnicas potenciales de minimización de residuos para cada flujo.

En este apartado se identificarán todas las tecnologías de posible aplicación, sin tener en cuenta consideraciones económicas o técnicas. Una tecnología que hoy no es aplicable puede serlo dentro de unos meses o años debido tanto a los avances en investigación y desarrollo (I + D) como a la coyuntura del mercado en cuanto a precios de materias primas, productos, etc.

- Evaluación de los aspectos técnicos y económicos.

Se estudiarán los costes económicos de la implantación de cada tecnología, así como la viabilidad técnica.

- Selección de la tecnología de minimización idónea desde el punto de vista técnico administrativo, legal, económico y social.

A la hora de seleccionar la tecnología adecuada primarán una serie de factores sobre otros, dependiendo de la coyuntura de la empresa. Las tecnologías ambientalmente más correctas, como ya se ha comentado, son las que reducen la generación de residuos en origen; a continuación estaría el reciclaje; después la recuperación y, como último recurso el tratamiento o eliminación. Además de esto, se tendrán en cuenta otros factores como son la aplicabilidad, facilidad de implantación, necesidades de operación y mantenimiento, seguridad y condiciones especiales de diseño, urgencia, importe de inversión, amortización de la inversión, posible mercado si se trata de un nuevo producto, tiempo de implantación, etc.

Por tanto, la selección conlleva unas prioridades que dependen de muchos factores.

- Implantación de las opciones seleccionadas.

La implantación del programa se deberá establecer de forma escalonada. Los flujos de residuos que presentan problemas de gestión y aquellos que requieren inversiones con un período de retorno de capital corto, deberán ser los primeros en implantarse. Las técnicas simples y de bajo costo pueden ser implantadas rápidamente. En muchas ocasiones esto significa únicamente mejoras en el control de inventario, la operación y el mantenimiento. Sin embargo, otras técnicas serán más difíciles de implantar.

En primer lugar, se implantarán las técnicas más sencillas que no impliquen cambios en los procesos productivos:

- Control del inventario.
- Mejora en los procedimientos de operación y mantenimiento.
- Cambio sencillo de materias primas o aditivos.
- Procesos sencillos de segregación o concentración.

Posteriormente se actuará sobre operaciones de minimización algo más complejas, como son:

- Pequeñas modificaciones en los procesos de producción.
- Cambio de materias primas o aditivos que conlleven el punto anterior.
- Procesos de segregación o concentración algo más complejos.
- Operaciones de reciclaje o reutilización internas.

Por último, se implantarán aquellas tecnologías que impliquen mayores cambios y/o inversiones:

- Modificaciones profundas en los procesos.
- Introducción de tecnologías limpias.
- Operaciones complejas de reciclaje, recuperación, segregación o concentración.

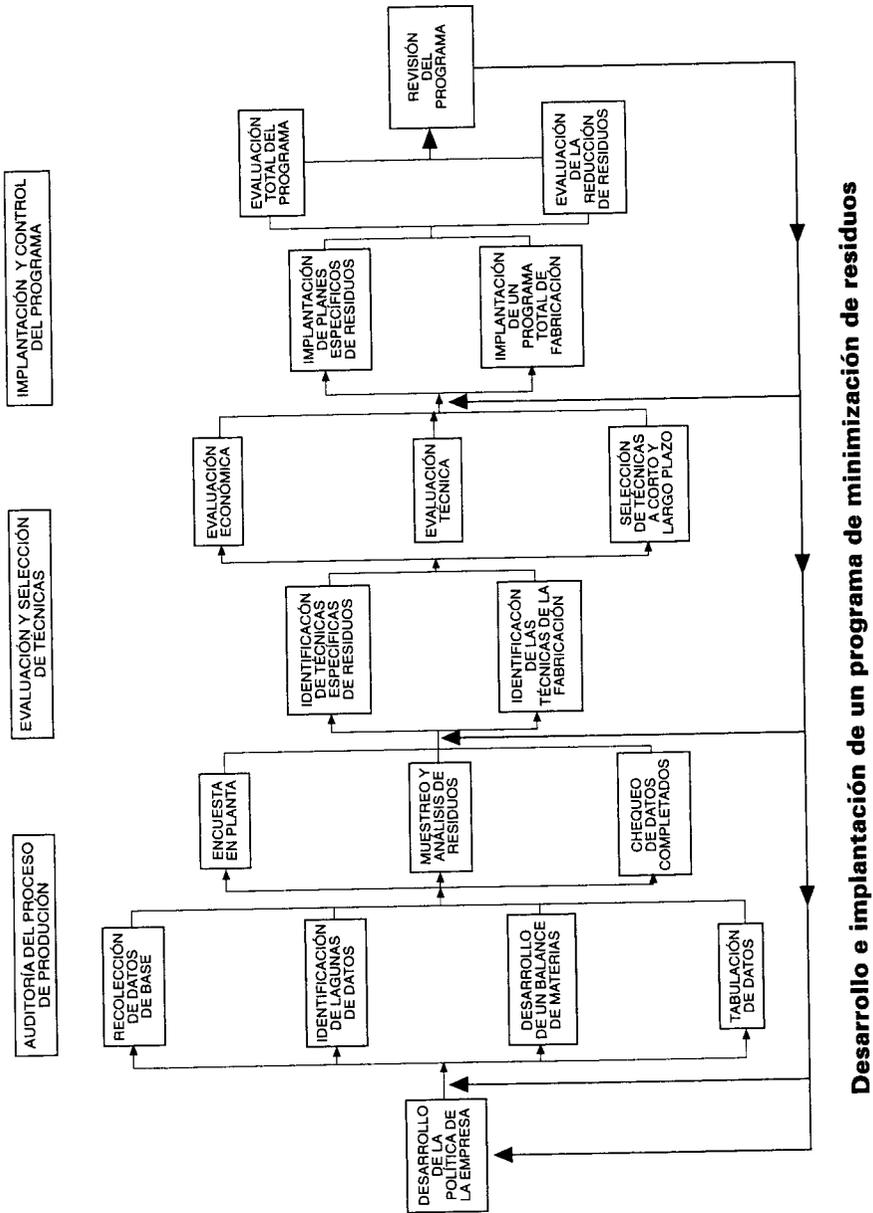
La implantación de estas técnicas puede suponer un estudio muy profundo, incluyendo en algunos casos investigación y desarrollo, estudios de mercado, etc.

Tercera fase: seguimiento, control y revisión de las medidas adoptadas

Una vez implantadas medidas de minimización de residuos, se efectuará un seguimiento de cada una de las actuaciones, así como de la totalidad del plan. En este apartado se evaluarán las desviaciones, tanto positivas como negativas, de la reducción de residuos, inversiones realizadas, costes de operación y mantenimiento, etc.

Una vez conocidos los resultados obtenidos, se compararán con los objetivos marcados inicialmente y se corregirán los fallos detectados y, por último, se actualizará el plan.

En el cuadro siguiente se muestra un resumen del desarrollo e implantación de un plan de minimización de residuos.



Desarrollo e implantación de un programa de minimización de residuos

3

Tratamiento y corrección de la contaminación

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA

Las técnicas para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera son muy variadas, ya que dependen de los diferentes tipos de agentes y de múltiples factores, como pueden ser los efectos a escala local o planetaria, la influencia del clima, etc.

A continuación se exponen las principales clases de tratamientos, con arreglo al tipo de agente contaminante.

Contaminantes físicos

Ruido

Es evidente que el método de control de ruido exterior más efectivo es el que se aplica sobre las fuentes sonoras que lo generan. Tanto más efectiva será la reducción del ruido cuanto más limitemos el número de fuentes o reduzcamos el nivel sonoro de éstas. En el caso de fuentes fijas, el control es relativamente fácil de aplicar, siendo mucho más complejo aplicarlo a las fuentes sonoras móviles, como es el ruido de los medios de transporte.

El ruido es un elemento de presencia indiscutible en las ciudades, que inevitablemente se incrementa con el tamaño de la ciudad, su actividad y desarrollo económico.

Como se ha comentado anteriormente, la fuente de ruido más importante en las ciudades es el transporte, por lo que las medidas que incidan directamente sobre el mismo serán las de mayor efectividad.

De forma general, la solución pasaría por llevar a cabo programas adecuados de ordenación territorial y de planificación urbana, siendo la base de éstos el desarrollo paralelo de estudios técnico-sociológicos encaminados a establecer los efectos del ruido en las distintas actividades de la comunidad, permitiendo identificar aquellas situaciones conflictivas en las que sean incompatibles los niveles sonoros detectados con la actividad desarrollada.

De forma particular cabe destacar:

- Inspecciones del cumplimiento de los límites de emisión (control de los niveles de emisión de los vehículos).
- Planificación del transporte, favoreciendo el transporte colectivo y restringiendo el individual.
- Medidas que favorezcan la renovación del parque de vehículos.
- Estudio de firmas menos ruidosas.
- Limitación de la velocidad.
- Limitación de la intensidad y uso de sirenas de ambulancias, bomberos, etc.
- Utilización de camiones de basura insonorizados.
- Pantallas acústicas.
- Ordenación del tráfico, etc.

Al igual que el tráfico, la industria es una de las principales fuentes generadoras de ruido ambiental, aunque debido a la localización en polígonos industriales de las mismas, las protestas son más aisladas. En mayor medida, este contaminante incide principalmente en el interior de las propias instalaciones industriales, generando un problema de higiene industrial, ya que las personas más directamente expuestas son los trabajadores de las mismas.

Debido a la expansión de las ciudades, cada día más frecuentemente las zonas industriales terminan incorporándose a los núcleos urbanos, agudizando los problemas por ruidos:

También las pequeñas industrias y comercios, integrados en el casco urbano, pueden ser origen de molestias por ruido; entre ellas cabe citar:

- Actividades de pequeños comercios.
- Talleres de reparación de automóviles, artesanales, etc.
- Maquinaria de ventilación, extractores, bombas de calor, etc.

El control del ruido en el interior de las instalaciones industriales no es objeto de estudio en este manual, por lo que únicamente se van a enumerar una serie de medidas generales sobre la disminución del ruido en las fábricas:

- Reducción del ruido por:
 - Sustitución de piezas desgastadas.
 - Alineamiento de cojinetes y engranajes.
 - Instalación de elementos antivibratorios.
 - Interposición de materiales amortiguadores entre superficies que chocan.
 - Colocación de silenciadores en salidas de aire comprimido, etc.
 - Aislamiento de máquinas.
 - Aislamiento de locales, superficies, etc.

En el campo de la insonorización en general, los problemas de ruido se presentan extremadamente complejos. Así, entre los productos para la insonorización podemos encontrar:

- Materiales absorbentes.
- Materiales aislantes.
- Materiales amortiguantes.
- Cabinas insonorizantes y por encapsulamiento.
- Cortinas acústicas.
- Puertas acústicas.
- Silenciadores para el amortiguamiento del ruido del aire.
- Soportes elásticos.
- Techos y baffles absorbentes para reducción del ruido reverberante, etc.

Además de las fuentes comentadas, existe un conjunto de fuentes urbanas que provocan molestias en su entorno, en ocasiones intensas. De éstas, las actividades de ocio, discotecas y bares musicales, junto con la construcción y obras públicas, son las más importantes.

El control de las actividades de ocio pasaría por la instalación de dispositivos de limitación acústica, puertas dobles de acceso, aumen-

to del aislamiento interior y exterior, etc., sin olvidar la creación de zonas especiales, alejadas de los núcleos habitados, donde se puedan instalar éste y otros tipos de actividades de ocio especialmente ruidosas.

Radiaciones ionizantes

El control de este tipo de energías está tipificado por normativas muy específicas y estrictas, tanto en la fase de diseño y utilización como en la fase de gestión de los residuos generados.

Para evitar la contaminación tanto del medio como de las personas por este tipo de contaminantes, la legislación impone una serie de medidas administrativas de seguridad y de materiales que van a depender del grado de peligrosidad de los compuestos o radiaciones que se estén utilizando.

La reglamentación española divide a las instalaciones radiactivas en dos clases:

- Instalaciones en las que se producen, manipulan o almacenan sustancias radiactivas para fines diversos.
- Instalaciones o equipos productos de rayos X.

Dependiendo del grado de peligrosidad, tipo de radiación, la actividad, clase de instalación, etc., las medidas de seguridad y los controles serán diferentes.

Todas las instalaciones radiactivas están aprobadas, controladas y supervisadas por un organismo oficial: el Consejo de Seguridad Nuclear.

Asimismo, este organismo es el encargado de expedir las licencias correspondientes para todas las personas que trabajen en este tipo de instalaciones.

El medio fundamental para evitar la peligrosidad de estas energías es el *confinamiento*, es decir, la interposición de barreras absorbentes de estas radiaciones entre el hombre o los seres vivos y la fuente de la radiación.

Todos sabemos que las paredes de las salas de radiografías en un centro médico están forradas de plomo, material muy absorbente de los rayos X.

Estas barreras dependerán del tipo de instalación y radiación. Los materiales de construcción de las centrales nucleares, ejemplo de instalación

potencialmente muy peligrosa, deben cumplir una serie de normas muy estrictas.

En este caso, el origen del riesgo se encuentra en la presencia y posible escape de las radiaciones y de los productos radiactivos producidos en la central. Las barreras físicas de protección de una central nuclear son cuatro:

- Combustible nuclear (tipo cerámico —óxido de uranio—).
- Vaina donde se encuentra el combustible.
- Circuito primario, o circuito de presión formada por vasija del reactor, bombas de refrigeración, presionador e intercambiadores de calor.
- Edificio de contención.

Existen una serie de aparatos radiactivos que por su baja peligrosidad no están encuadrados dentro de la normativa aplicable a las instalaciones radiactivas. Para considerarse como tales, estos aparatos deben estar homologados.

Por último, podemos señalar que el control de los residuos radiactivos se trata en el apartado correspondiente a suelos.

Contaminantes químicos

El aumento de los productos emitidos a la atmósfera como consecuencia del desarrollo industrial en todo el planeta ha generado problemas que afectan al medio ambiente tanto a nivel local como de forma global.

La primera solución que se debe buscar a la hora de resolver estos problemas es evitar o minimizar la generación de estos contaminantes, soluciones ya comentadas en el capítulo anterior.

Cuando esto no es posible, hay que buscar algún medio para evitar los efectos de los agentes contaminantes.

Cronológicamente, el primer medio empleado fue aprovechar la dilución de los contaminantes en el aire para evitar la acumulación de estos compuestos en una zona determinada.

Esta técnica comprende el aprovechamiento de las condiciones meteorológicas (parámetros de difusión), de la topografía, la altura, la temperatura y la velocidad de los gases. Es de gran importancia en la aplicación de este sistema la ubicación de las plantas generadoras de contaminantes y la altura de las chimeneas.

Sin embargo, se debe tener presente que es un control a corto plazo y local, teniendo el inconveniente de estar el origen de la contaminación en lugares alejados de las fuentes de emisión.

Cuando las técnicas minimización o dispersión de los contaminantes no son aplicables o no permiten la consecución del objetivo deseado en lo que al control de la contaminación del aire se refiere, se hace necesaria la aplicación de sistemas de separación de los contaminantes químicos de la corriente gaseosa.

Esta separación puede realizarse con diferentes mecanismos que pueden emplearse bien de forma separada o conjuntamente.

Estos mecanismos se clasifican en dos grupos según se apliquen a contaminantes sólidos y líquidos (partículas) o gaseosos:

- Sistemas de captación de partículas.
- Sistemas de eliminación de contaminantes gaseosos.

Sistemas de captación de partículas

Los sistemas y equipos disponibles para la limpieza de los gases, por eliminación de la materia particulada se pueden clasificar de una manera sencilla en:

- Colectores de inercia y fuerza centrífuga o gravedad.
- Filtros de tejido.
- Precipitadores electrostáticos.
- Lavadores y absorbedores húmedos (*scrubbers*).

1. Colectores de inercia, fuerza centrífuga o gravedad

Es el tipo más sencillo de separadores de partículas. Su funcionamiento se basa en principios físicos simples como la inercia o la gravedad de las partículas.

Su principal inconveniente es su baja eficacia de retención para partículas de pequeño tamaño, resultando en la práctica ineficaces para la retención de partículas por debajo de 5-10 μm ; además, su implantación requiere grandes espacios.

Sin embargo, por su bajo coste y sencillo funcionamiento pueden utilizarse en algunos casos como equipos de limpieza previa, montados en serie con equipos de mayor rendimiento.

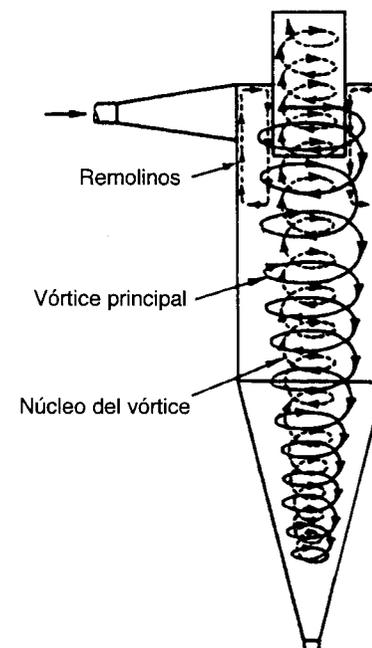
Tipos de colectores:

- Cámaras de sedimentación.
- Cámaras de gravedad e inercia.
- Ciclones.

De estos tres tipos de colectores, los ciclones son los más ampliamente utilizados y por ello son los que se detallan seguidamente.

• Ciclones

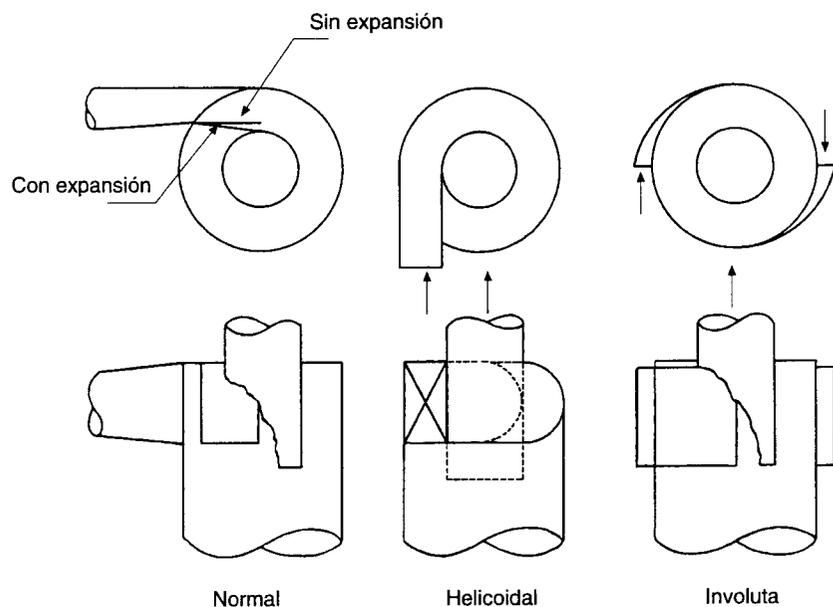
Los ciclones son separadores inerciales formados en su cuerpo principal por un tubo cilíndrico-cónico, en el cual entran los gases a depurar de forma tangencial por un conducto en forma de voluta. Debido a la trayectoria que se ve obligado a seguir el gas, las partículas se ven sometidas, a una fuerza centrífuga que, al cabo de un cierto número de vueltas, las hacen chocar contra las paredes y depositarse en la parte inferior del cono.



Funcionamiento de un ciclón (De Lora, 1978)

— Tipos de ciclones:

Atendiendo al modo en que se efectúa la entrada de gases y a la forma en que se lleva a cabo la descarga de polvo, pueden encontrarse diferentes tipos de ciclones, algunos de los más usuales se muestran en la figura adjunta.

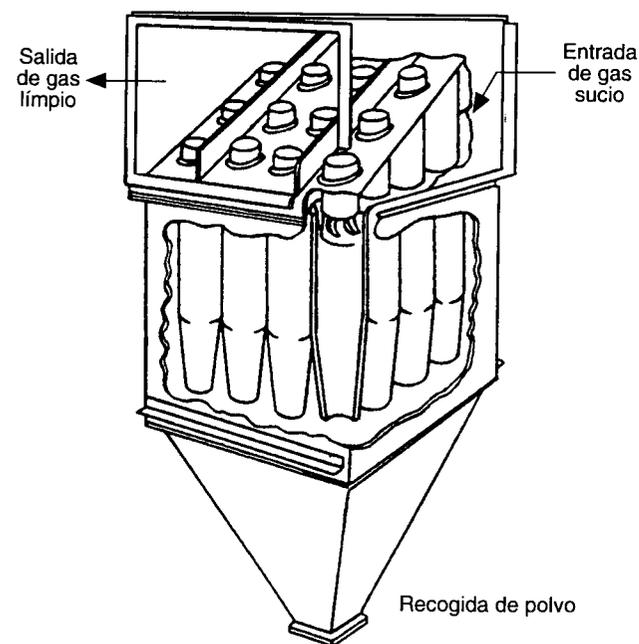


Tipos de ciclones
(De Lora, 1978)

Por otra parte, y atendiendo a su rendimiento, los ciclones suelen clasificarse en convencionales y de alta eficacia. Estos últimos tienen un diámetro pequeño para conseguir una mayor aceleración centrífuga. Generalmente se consideran como ciclones de alta eficacia aquellos que tienen un diámetro inferior a 25 cms. En la tabla siguiente se muestra comparativamente el rendimiento de estos dos tipos de ciclones para diferentes tamaños de partículas.

dA' μm	n (% en peso)	
	Convencional	Alta eficacia
<5	< 5	50-80
5-20	50-80	80-95
15-40	80-95	95-99
>40	95-99	95-99

Con el fin de aumentar la eficacia en este tipo de depuración, suelen utilizarse agrupaciones en paralelo de ciclones que reciben el nombre de multiciclones. Este tipo de depuradores utilizan ciclones individuales con entrada axial de gas con diámetros comprendidos entre 10 y 25 cms. Alcanzan una eficacia del 95 % para tamaños de partícula de hasta 3 μm .



Multiciclón
(De Lora, 1978)

— Características generales de los ciclones:

Las principales ventajas e inconvenientes en la utilización de ciclones puede resumirse de la forma siguiente.

• Ventajas:

- * Gran sencillez de construcción, lo cual implica una gran economía.
- * Pueden soportar condiciones de temperatura y físico-químicas muy duras.
- * Su mantenimiento es prácticamente nulo.
- * Nulo consumo de servicios auxiliares (aire o agua).
- * No produce efluentes líquidos.
- * Producto recuperado seco.

• Inconvenientes:

- * Eficacia baja para pequeñas granulometrías.
- * Consumo elevado para obtener una eficacia apreciable en un determinado margen de granulometría.
- * Con algunos productos, debido a la alta velocidad de circulación, sufren abrasión.

2. Filtros de tejido

El fundamento de los filtros de tejido consiste en hacer pasar la corriente de aire cargada de polvo a través del tejido que constituye la unidad filtrante, quedando retenidas, por simple tamizado, aquellas partículas cuyo tamaño es mayor que el de dichos intersticios. La película de polvo así formada hace a su vez de filtro de gran eficacia capaz de retener partículas de tamaño muy inferior al de dichos intersticios, de modo que el tejido filtrante actúa fundamentalmente como soporte de esta película.

Esto conduce al hecho de que la eficacia de un filtro de tejido aumenta con el grado de colmatación.

La pérdida de carga de un filtro de tejido colmatado puede llegar a ser diez veces superior a la del tejido limpio.

Los materiales que pueden utilizarse en los filtros de tejido son muy variados debido a la profusión de fibras artificiales disponibles en el mercado. En la siguiente tabla se muestran algunas características de los tejidos más comunes.

Tipos de tejidos filtrantes de uso comercial

Material filtrante	Fibras naturales		Fibras sintéticas						Fibra de vidrio	
	Lana	Algodón	PVC	Poliamida	Poliacrilitrilo		Poliéster	Polipropileno		Poliamida aromática
					POLIACRILITRILLO PURO	MIXTO				
Nombre industrial			ROVYL VINION	PERLON NYLON	REDON DOLAN	DRALON T ORLON	DIOLEN TERYLENE DACRON	MERAKLON	NOMEX	
Peso específico (g/cc)	1,32	1,47-1,50	1,39-1,44	1,13-1,15	1,17	1,14-1,16	1,14	0,91	1,38	2,54
Resistencia al desgarramiento (g/den)	1,0-1,7	2,5-4,0	2,7-3,9	4,5-6,1	2,9-3,4	3,0-3,5	2,5-3,2	4,5-5,5	5,5	6,3-0,9
Resistencia en húmedo relación con resistencia en seco	85	110	100	90	90-95	90-95	90	100	75	85-95
Alargamiento de rotura en %	25-35	7-10	12-25	25-40	30-40	30-35	24-30	40-55	17	3-4
Absorción de humedad en % a 20°C y 65% de humedad relativa del aire	10-15	8-9	0	4,5-5,5	1		1	0,4	4,5	Hasta 0,3 (superficie)
Resistencia contra ácidos	Buena para ácidos débiles a baja temperatura	Mala	Casi totalmente resistente a cualquier concentración	Con ácidos diluidos en frío buena. Caliente, poca	Buena	Muy buena	Buena frente a casi todos los ácidos minerales	Resistencia total	Buena frente a ácidos débiles a baja temperatura	Ataque por ácidos: - Fluorhídrico - Clorhídrico - Sulfúrico y fosfórico
Contra álcalis	Mala	Buena	Casi totalmente resistente	Prácticamente resistente	Suficientemente resistente contra álcalis débiles	Buena a temperatura ambiente contra álcalis débiles	Resistente	Resistente	Resistente frente a álcalis débiles	Ataque de álcalis débiles: caliente, fuertes y frío
Contra insectos y bacterias	Pequeña si no está tratado	Buena			No es atacado					
Resistencia a la temperatura servicio continuo °C	80-90	75-95	40-50	75-95	125-135	125-135	110-130	140	200-220	250 (SECO)
Máxima (°C)	100	95	65	95	150	150	—	160 (SECO)	250-270	300

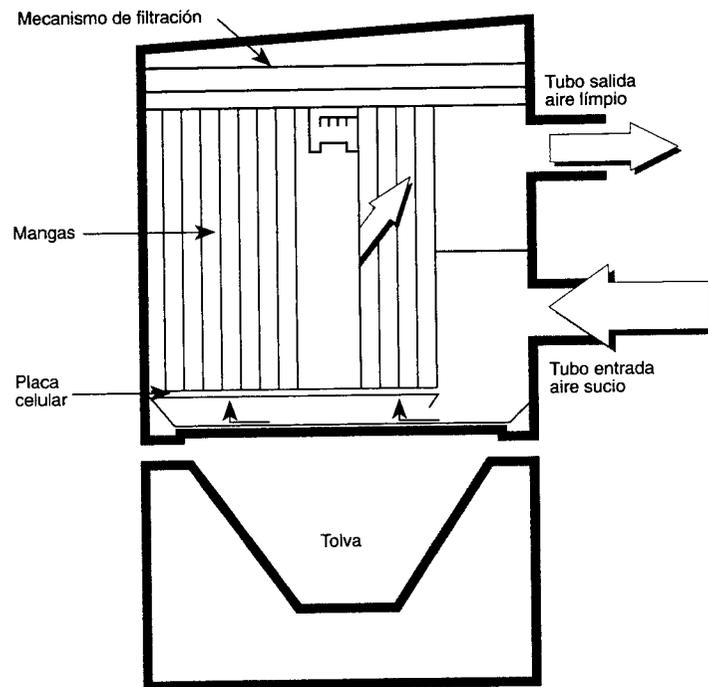
2.1. Tipos

Atendiendo al sistema de limpieza de las mangas, existen los siguientes tipos de filtros:

- De limpieza mecánica: sacudida y vibración.
- De aire a contracorriente.
- De impulsos de aire comprimido.

a) De limpieza mecánica

Son las más antiguas, y su utilización es cada vez menor, ya que la limpieza no es muy efectiva. El filtro se compone de varios cuerpos. Periódicamente se aísla uno de ellos procediendo a la limpieza de sus mangas mediante sacudida. Una vez que se han depositado las partículas desprendidas, se vuelve a poner el módulo en servicio.



**Filtro de mangas con limpieza por vibración
(Falcón, 1975)**

b) De aire a contracorriente

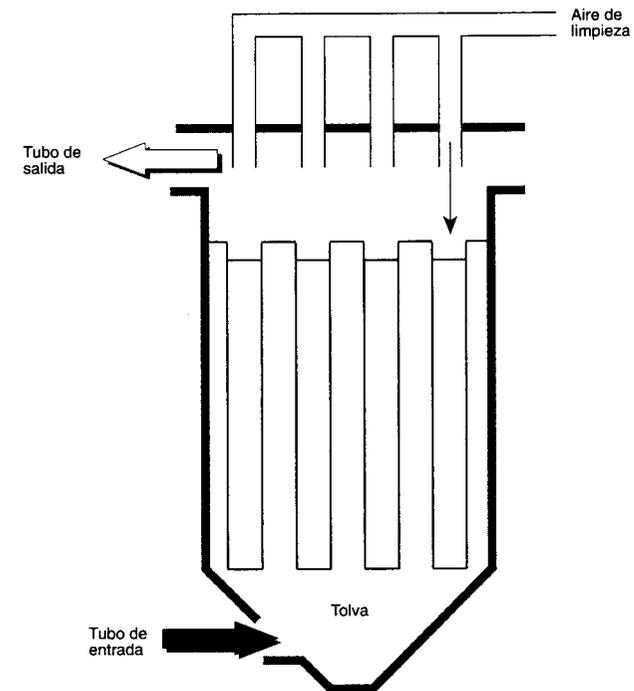
La limpieza se efectúa haciendo pasar aire limpio a contracorriente, con lo cual se desprende la capa más externa.

El ciclo de funcionamiento es igual al de limpieza mecánica, necesitando también varios módulos.

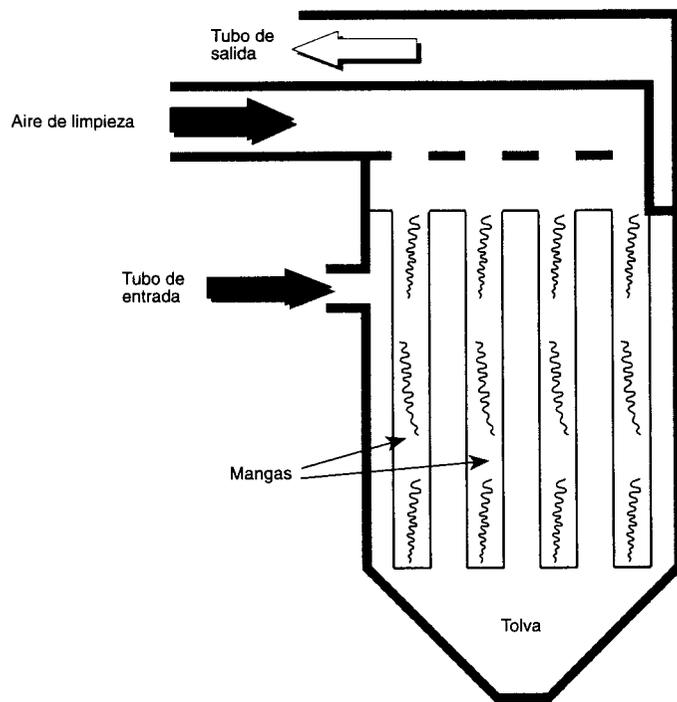
c) De impulsos de aire comprimido

Las mangas se limpian por hileras mediante inyección de aire comprimido durante un corto período de tiempo (30 a 60 ms).

Este sistema de limpieza es muy efectivo, utilizándose mucho actualmente.



**Filtro de mangas con limpieza por contracorriente
(Falcón, 1975)**



Filtro de mangas con limpieza por aire comprimido. (Falcón, 1975)

2.2. Características generales de los filtros de mangas

Las principales ventajas e inconvenientes en la utilización de los filtros de mangas pueden resumirse en:

- Ventajas:

- Eficacia muy alta, siendo ésta independiente del tamaño de las partículas hasta cierto orden y variando muy poco con las condiciones de operación.
- Pérdida de carga y consumo de energía moderado.
- No produce efluentes líquidos.
- Costo inicial medio.
- Producto recuperado seco.

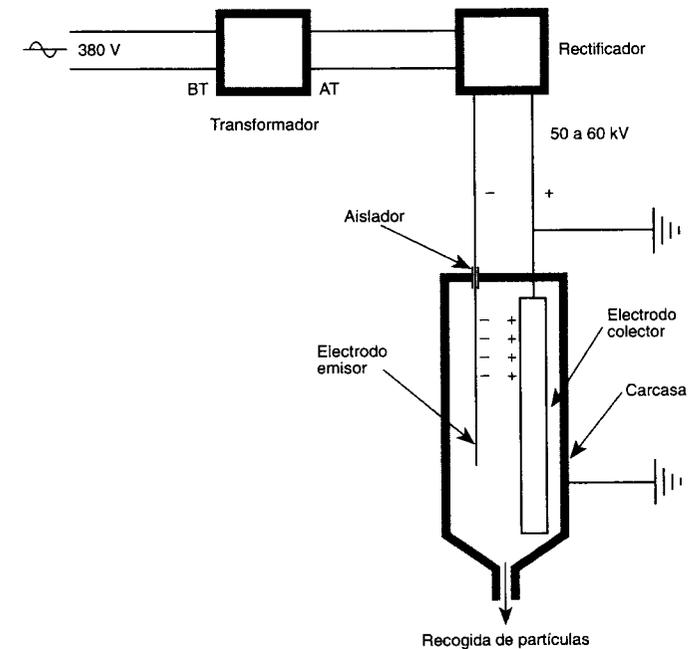
- Inconvenientes:

- Su uso está limitado por las altas temperaturas (aprox. 250° C con fibra de vidrio y teflón).
- Peligro de explosiones e incendios.
- Costes de mantenimiento elevados debido a la sustitución de las mangas.

3. Precipitadores electrostáticos

El principio de funcionamiento de los precipitadores electrostáticos o electrofiltros se basa en el hecho de que las partículas cargadas eléctricamente sometidas a la acción de un campo eléctrico son atraídas hacia electrodos colectores, depositándose sobre ellos.

Los precipitadores electrostáticos están constituidos por una carcasa metálica cerrada por la que circulan los gases. En el interior de la carcasa se alojan dos tipos de electrodos: los emisores, constituidos por hilos ver-



Esquema de un precipitador electrostático (De Lora, 1978)

ticales, y los receptores, que pueden tener forma de placa o de tubo y están dispuestos paralelamente al flujo del gas que se quiere limpiar. Entre estos dos tipos de electrodos se establecen diferencias de potencial que pueden superar los 60 Kv.

Los electrodos de emisión, por efecto corona, cargan las partículas de aerosol situadas entre las dos placas, siendo posteriormente atraídas por el electrodo colector, donde se depositan y descargan.

3.1. Tipos de electrofiltros

a) Atendiendo al sistema de limpieza de los electrodos colectores los precipitadores electrostáticos se dividen en:

- Precipitadores secos. El sistema seco de limpieza, por vibración, es el más utilizado en las aplicaciones industriales.
- Precipitadores húmedos.

b) Por otra parte los precipitadores según el número de etapas, se clasifican en:

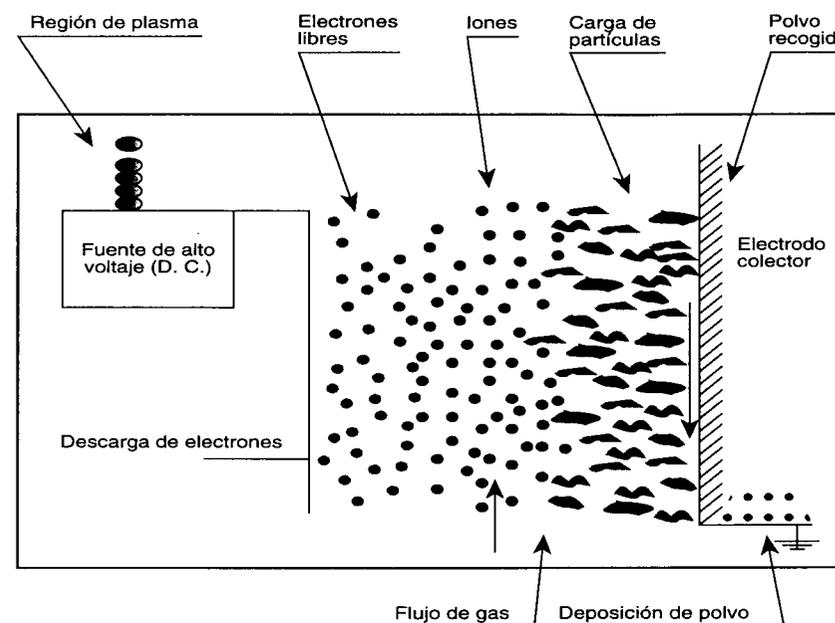
- Precipitadores de una etapa.
- Precipitadores de dos etapas.

En los primeros las partículas se cargan eléctricamente y se retienen en el mismo campo eléctrico, mientras que en los precipitadores de dos etapas las partículas se cargan en una etapa de ionización y se retienen en una segunda cámara, denominada de precipitación.

3.2. Características generales de los electrofiltros

Las principales ventajas e inconvenientes de los precipitadores electrostáticos pueden resumirse de la forma siguiente:

- Ventajas:
 - Altas eficacias, que pueden alcanzarse incluso con muy pequeñas partículas.



Funcionamiento de un precipitador electrostático.
(Joasund, 1987)

- Producto recuperado seco.
- Pérdida de carga muy baja. Gastos de operación muy bajos.
- Bajo mantenimiento, ya que las partes móviles son mínimas.
- Pueden operar a temperaturas muy altas (hasta 400° C son normales, pudiendo llegarse a 650° C con diseños especiales).

• Inconvenientes:

- No se adaptan bien a condiciones variables.
- Algunos materiales son prácticamente imposibles de captar debido a resistividad muy alta o muy baja.
 - Generalmente, necesitan un ciclón previo para reducir la carga de polvo a la entrada del electrofiltro.
- No pueden manejar gases o polvo explosivos.
- Costo inicial muy alto (normalmente son los equipos más caros).

4. Lavadores y absorbedores húmedos (*scrubbers*)

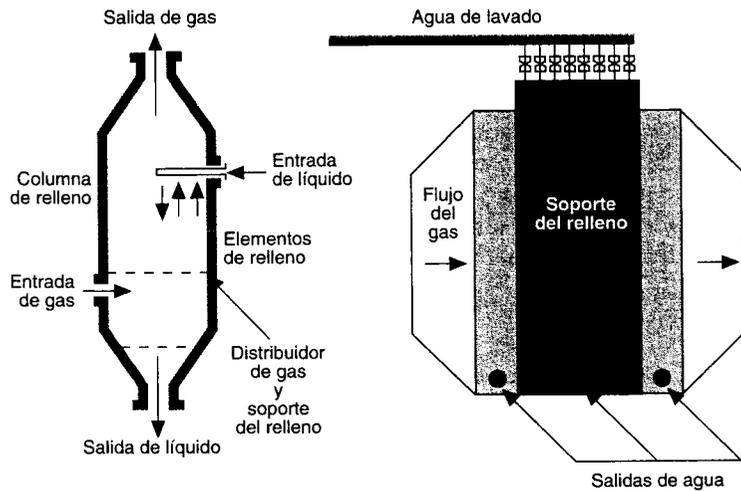
Con la denominación de lavadores húmedos se conocen una serie de depuradores basados todos ellos en el mismo principio de funcionamiento: transferir la materia suspendida en el gas a un líquido absorbedor en la fase mezcla gas-líquido, por medio de la colisión entre las partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas.

4.1. Tipos de lavadores

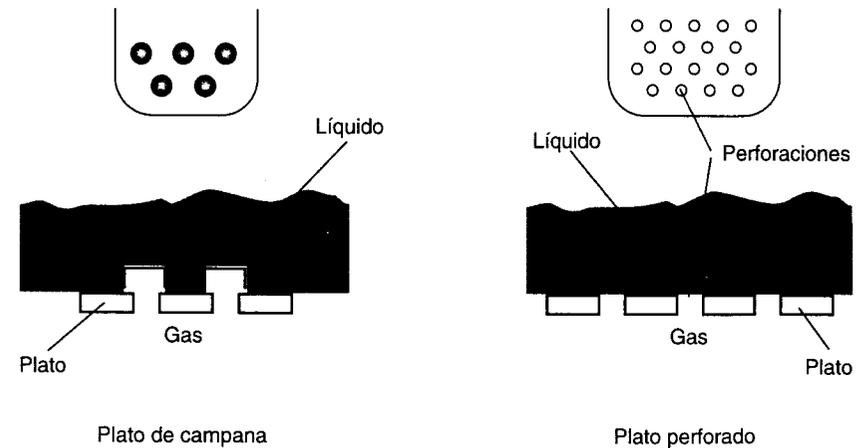
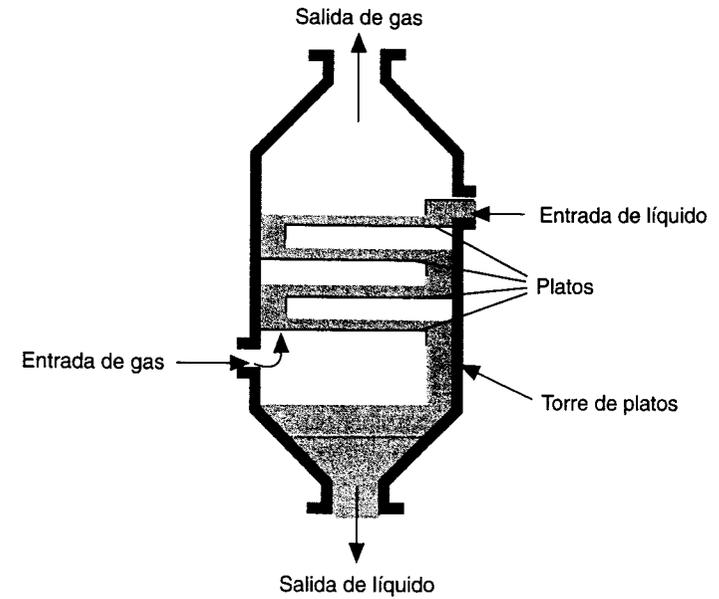
Existen muy diversos tipos de lavadores, entre los que pueden destacarse los siguientes:

- Lavadores de torre o cámara.
- Lavadores ciclónicos.
- Lavadores con rellenos.
- Lavadores mecánicos.
- Lavadores de inercia.

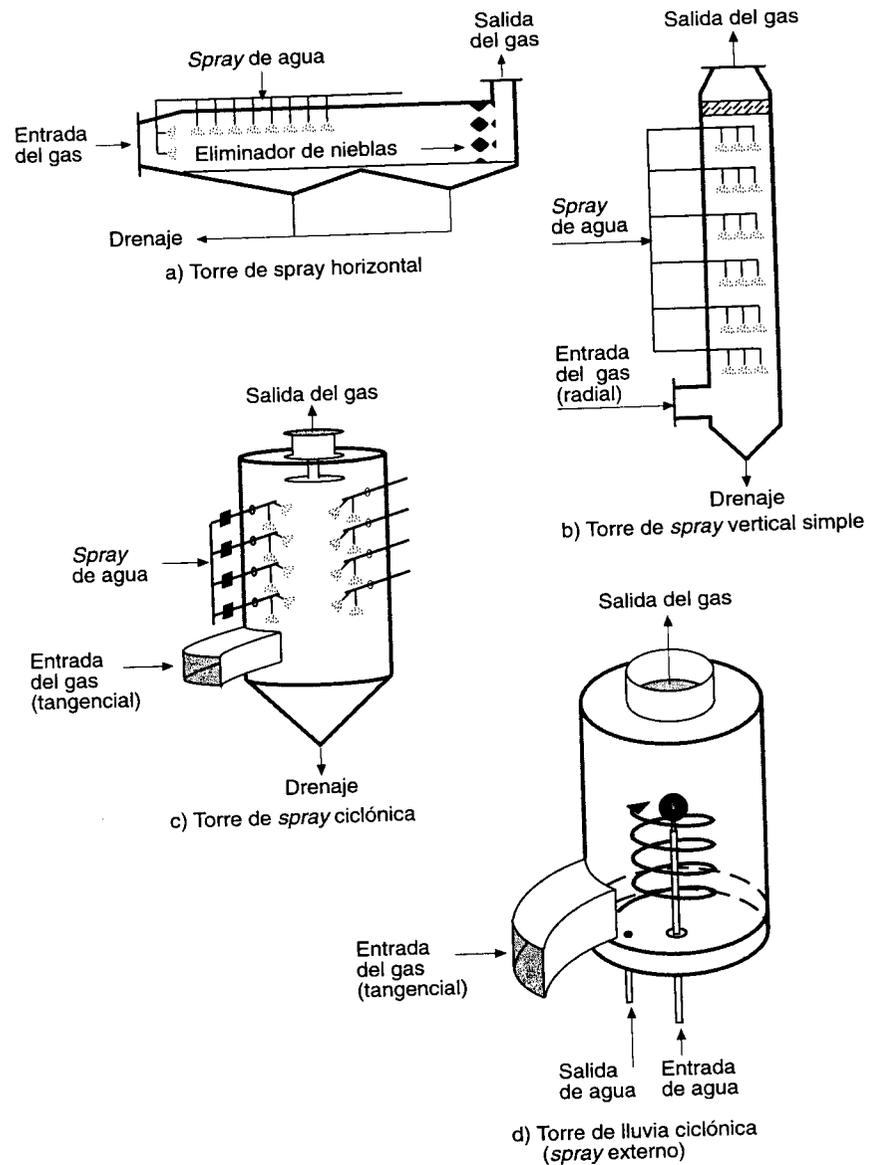
Las siguientes figuras representan los esquemas de varios lavadores húmedos.



Fluidos en contracorriente
Esquema de torres de relleno (Calvert, 1984)



Esquemas de torres de platos. (Calvert, 1984)



Tipos de torres spray o de lluvia.
(Calvert, 1984)

Por su elevado rendimiento, los lavadores inerciales venturi son los que presentan un mayor interés.

Básicamente, su principio de operación se fundamenta en producir un gran aumento de la velocidad del gas portador mediante un estrechamiento. En el punto en que el gas adquiere su máxima velocidad se inyecta el líquido lavador, que se dispersa en infinidad de gotitas y genera una elevada superficie de agua.

Los lavadores venturi presentan una eficacia de depuración superior al 99 % para tamaños de partícula superiores a $1 \mu\text{m}$, disminuyendo al 90-95 % para partículas submicrónicas. Un factor crítico para el mantenimiento de una alta eficacia es la constancia de la pérdida de carga, que depende de la velocidad de los gases en el estrechamiento; con tal fin, este tipo de lavadores suele disponer de un estrechamiento móvil, de modo que pueda variarse su sección según lo imponga el caudal de gases a tratar.

4.2. Características generales de los lavadores

Las principales ventajas e inconvenientes que presenta la utilización de este tipo de sistemas se pueden resumir de la forma siguiente:

- **Ventajas:**
 - Captan a la vez gases y partículas.
 - Sencillez de construcción. Costo de instalación medio para eficacias medias (sin depuración de líquido).
 - Mantenimiento limitado (pulverizadores, corrosión).
 - Pueden soportar duras condiciones de temperatura y fisico-químicas.
 - Pueden manejar productos muy difíciles de tratar por otros medios (pastosos, explosivos).
- **Inconvenientes:**
 - Transfieren la polución al líquido.
 - Para una alta eficacia, el costo global es alto.
 - Corrosión y abrasión en algunos casos.

Sistemas de eliminación de contaminantes gaseosos

Los equipos de depuración de una corriente de gases contaminados en la que los contaminantes están presentes en forma gaseosa, se pueden clasificar en función del proceso físico-químico utilizado en la extracción de los mismos. Así, tenemos los cuatro tipos siguientes:

- Procesos de absorción.
- Procesos de adsorción.
- Procesos de combustión.
- Procesos de reducción.

1. Procesos de absorción

En los sistemas basados en la absorción se hace circular, en contracorriente con el gas, un líquido capaz de disolver el agente que se desea separar, o de reaccionar con él.

La transferencia de materia entre el gas y el líquido absorbente suele realizarse en una columna rellena de diferentes materiales cuyo fin es aumentar la superficie de contacto y facilitar así la absorción. La inclusión de estos materiales de relleno lleva consigo un aumento de la pérdida de carga del sistema, que puede alterar las condiciones de funcionamiento de la planta donde se ha instalado.

Una vez realizada la absorción, se plantea el problema de la desorción de los compuestos nocivos, pues si no se realiza ésta el proceso consiste en un cambio de lugar de los contaminantes, que pasan del medio gaseoso al líquido.

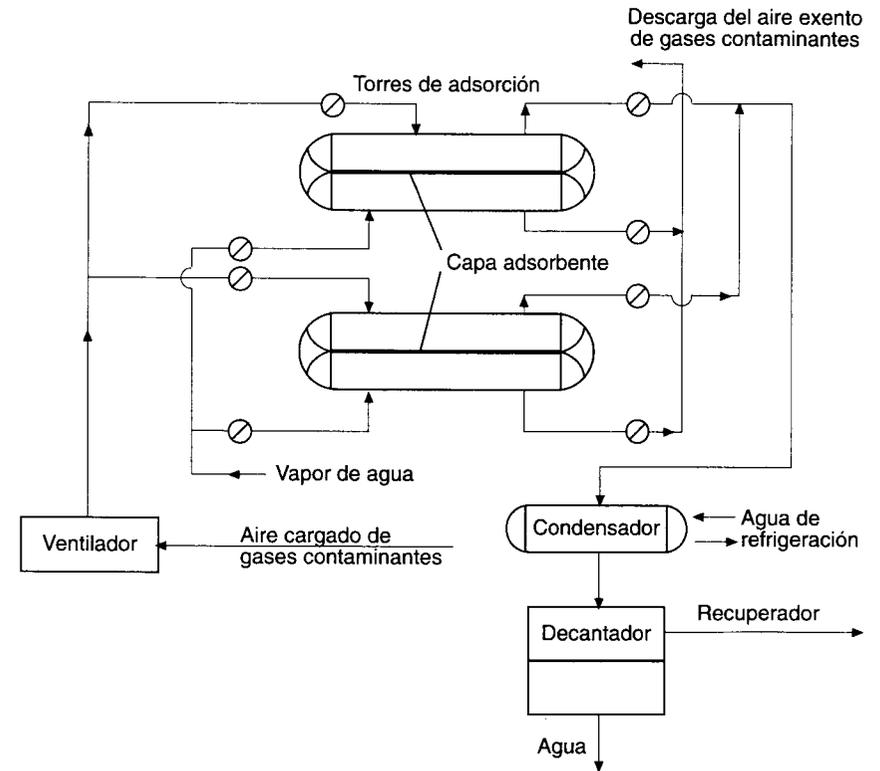
Estas operaciones adicionales complican el sistema aumentando el número de unidades necesarias, pero también permiten aprovechar los productos secundarios obtenidos para su utilización posterior.

La naturaleza del líquido absorbente varía según el tipo de compuesto que se desea retener. En gran parte de los casos, el agua es el medio depurador más adecuado, debido, entre otras cosas, a que se dispone de ella en abundancia, su bajo coste y su fácil eliminación. También pueden utilizarse como absorbentes disoluciones acuosas de amoníaco, de NaOH, etc.

2. Procesos de adsorción

Los sistemas basados en este tipo de procesos emplean un sólido con elevada capacidad de adsorción para retener selectivamente los compuestos que se desean eliminar.

Los sólidos utilizados como adsorbentes suelen ser sustancias que poseen una superficie específica grande, como por ejemplo carbón activo ($\approx 1.000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), alúmina ($\approx 200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), etc., o bien pueden basar su capacidad de retener sustancias en la forma y tamaño de sus poros, como es el caso de las zeolitas.



Esquema de un sistema de eliminación de contaminantes por adsorción

Los principales sistemas son:

- Adsorbedor a contracorriente.
- Reactor de transporte.
- Lecho fluido circulante.

2.1. Adsorbedor a contracorriente

El gas reacciona con el carbón activo en un lecho fijo, realizándose el contacto a contracorriente entre el carbón activo y el flujo de gas. Cuando el sólido adsorbente se satura del gas adsorbido y su efectividad no alcanza los niveles requeridos, se debe proceder a su sustitución o a su regeneración. Para efectuar esta operación, sin tener que parar el sistema, se emplean varias torres paralelas de adsorción de funcionamiento alternativo.

Según referencias sobre mediciones llevadas a cabo en un incinerador de residuos municipales, con un volumen de 2.000 m³/h el rendimiento de eliminación de dioxinas en este tipo de sistemas puede ser superior al 98 %.

2.2. Reactor de transporte

Este tipo de adsorbedor utiliza una mezcla de carbón activo y caliza, que se inyecta al gas, siendo transportada por éste a una temperatura de 100-120° C. Las dioxinas quedan adsorbidas sobre el carbón activo en su camino hasta el filtro de mangas, donde éstas se retienen junto con el carbón.

2.3. Lecho fluido circulante

Este tipo de sistema se puede considerar como uno intermedio entre el lecho fijo y el reactor de transporte. En este sistema el gas se introduce en un hogar y se mezcla con carbón activo y material inerte (tierra, caliza, etc.) similar al del reactor de transporte, pero con una mayor concentración de carbón activo. Al igual que en el adsorbedor de reactor de transporte, la separación de los contaminantes del flujo gaseoso se realiza junto con el carbón activo mediante un filtro de mangas.

3. Procesos de combustión

La combustión es un proceso de eliminación de compuestos orgánicos muy apropiado por la transformación de éstos en dióxido de carbono y vapor de agua.

3.1. Tipos de sistemas de combustión

Los sistemas para llevar a cabo la eliminación de contaminantes por combustión pueden clasificarse en 3 grupos:

- Antorchas.
- Quemadores de postcombustión.
- Sistemas de combustión catalítica.

a) Antorchas

Los sistemas de combustión por antorchas pueden emplearse cuando la concentración de contaminantes está dentro de los límites de inflamabilidad. Es frecuente su utilización en refinerías y plantas petro-químicas, siendo especialmente útiles en la puesta en marcha o parada de las plantas, cuando el caudal de gases a quemar está sometido a grandes fluctuaciones.

Para disminuir en lo posible la formación de humos, así como la longitud y resplandor de llama, se mezcla previamente el gas a tratar con aire o bien se inyecta vapor de agua a baja temperatura. De esta forma, se reduce la polimerización de hidrocarburos y se facilita la formación de compuestos oxigenados cuya combustión se realiza a temperaturas inferiores a las requeridas por las reacciones de craqueo.

b) Quemadores de postcombustión

Los quemadores o incineradores de postcombustión consisten en hornos que se encuentran a temperaturas elevadas (generalmente calentados por fuego directo), por los que pasan los gases a tratar para que tenga lugar la combustión de los compuestos orgánicos que se desean eliminar. Este tipo de quemadores exige el consumo de combustible adicional con objeto de que el

fenómeno de la combustión pueda realizarse y, evidentemente, si se trata de depurar grandes cantidades de gases efluentes, pueden ser económicamente prohibitivos por las cantidades de combustible adicional que es necesario emplear. En estos casos, los quemadores catalíticos pueden ser la solución ideal para la eliminación de compuestos contaminantes orgánicos.

c) Sistemas de combustión catalítica

Este tipo de sistemas consiste en un horno o reactor, generalmente de forma tubular, en el que se coloca el sólido que actúa como catalizador, de forma que los compuestos contaminantes se adsorben en la superficie del catalizador, produciéndose la combustión a una temperatura mucho menor que la necesaria para que se produzca la combustión térmica convencional. Esto se debe a que el catalizador provoca una disminución de la energía de activación del proceso de combustión, por lo que estos sistemas precisan un aporte energético mucho menor que los incineradores de postcombustión y los hace ideales para la eliminación de compuestos orgánicos contaminantes cuando se encuentran en pequeñas proporciones, como, por ejemplo, para la depuración de ambientes enrarecidos y olores en fábricas de barnices, pinturas, etc.

4. Procesos de reducción

Los sistemas basados en la reducción se emplean cuando el compuesto que se desea eliminar puede transformarse en compuestos no tóxicos por reacción con un agente reductor. Tal es el caso de los óxidos de nitrógeno, que pueden ser transformados con relativa facilidad en nitrógeno elemental por reacción con agentes como H_2 , CO , hidrocarburos y NH_3 , principalmente.

4.1. Tipos de sistemas de reducción

El proceso de reducción puede realizarse en presencia de catalizadores o en ausencia de éstos, distinguiéndose dos tipos de sistemas de reducción:

- Reducción no catalítica.
- Reducción catalítica.

a) Reducción no catalítica

Consiste en inyectar en la corriente gaseosa un gas reductor, provocando su reacción con los agentes contaminantes. Para llevar a cabo esta reacción de los gases deben encontrarse a temperaturas relativamente altas, siendo necesario el aporte energético correspondiente. Por ejemplo, en la eliminación de los NO_x se puede emplear NH_3 para su reducción, siendo la temperatura necesaria para que reaccionen superior a $800-900^\circ C$. Este tipo de procesos suelen requerir reactores construidos con materiales especiales que resisten ambientes muy corrosivos a altas temperaturas.

b) Reducción catalítica

Este tipo de sistemas son semejantes en su constitución a los de combustión catalítica, siendo las diferencias fundamentales el tipo de catalizador a emplear y la necesidad de inyectar previamente el gas reductor para que reaccione con el compuesto contaminante.

Ejemplo de combinación de sistemas. Elección del más idóneo

En la mayoría de los casos, será necesaria la combinación de sistemas de tratamiento de distintos tipos, con el fin de adecuar los límites de emisión a la normativa. En el diseño de un moderno sistema de tratamiento siempre se deberán tener en cuenta, además de las restricciones a la emisión ya existentes en el momento de la elección de los sistemas, las de futura implantación legal. De no ser así, se corre el riesgo de que la planta esté al margen de la legalidad en pocos años, ya que las normativas en esta materia son cada vez más estrictas.

A continuación, y como ejemplo, se analizan las combinaciones que han demostrado ser más eficientes para la depuración de los gases procedentes de la combustión de los residuos.

1. Método seco

El método seco se basa en la adición de absorbentes a la corriente gaseosa en estado seco. El producto resultante de las reacciones se separa

en un filtro, bien de mangas o bien electrostático. En la figura de la página siguiente se muestra un diagrama típico de este método.

En la primera etapa del proceso, los gases se acondicionan mediante un intercambiador de calor, hasta alcanzar la temperatura y humedad más favorables para que se produzcan las reacciones de absorción. Una vez enfriados los gases, se les añaden a éstos los absorbentes.

La eliminación de los gases ácidos (ClH, FH, SO) se realiza habitualmente con hidróxido cálcico. La cal reacciona con los agentes contaminantes formando sales en estado sólido, que se eliminan posteriormente mediante un filtro de mangas.

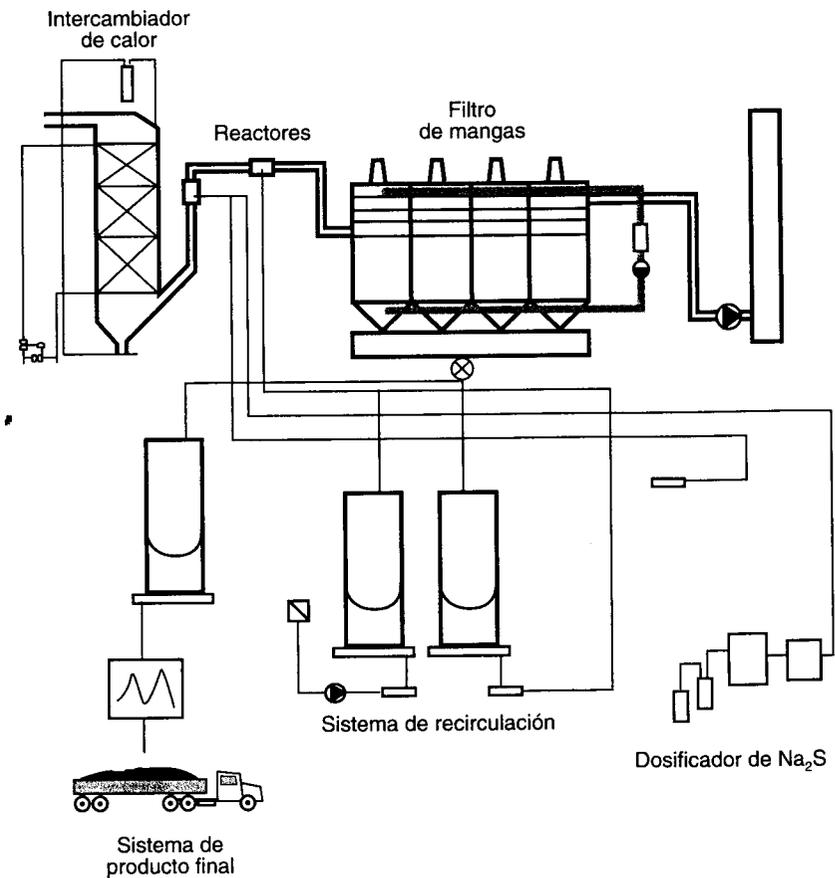
Los metales pesados presentes en la corriente gaseosa se encuentran en forma de partículas, por lo que su eliminación se realizará durante el proceso de filtrado, posterior a la absorción. Sin embargo, el mercurio, al ser un metal volátil, se presenta en forma gaseosa en una proporción de más de un 50 %, por lo que para su eliminación será necesario aplicar, adicionalmente, bien un proceso de adsorción mediante carbón activo o bien de adsorción con sulfuro de sodio.

El mercurio gaseoso se puede presentar en dos formas: cloruro de mercurio (80 %) y mercurio elemental. Cuando se realiza la absorción de los gases mediante sulfuro de sodio (Na_2S), éste reacciona con el mercurio formando sulfuro de mercurio, el cual en estado sólido se elimina en la etapa de filtración. En caso de utilizarse el carbón activo, éste se añade a la corriente gaseosa, adsorbiéndose el mercurio sobre el carbón activo. En la etapa de filtración se retiene el carbón activo junto con el mercurio absorbido.

En dicha etapa de filtración es preferible la utilización de filtros de mangas, en lugar de filtros electrostáticos, ya que poseen la ventaja de proporcionar una adsorción final de los gases en las películas de partículas formadas sobre la superficie filtrante. El filtro de mangas debe estar equipado con un circuito de precalentamiento que mantenga una temperatura adecuada cuando no se encuentre en operación, antes de que empiece el funcionamiento y durante el apagado, ya que el polvo de las mangas tendrá una alta concentración de cloruro de calcio, que es higroscópico y absorbería humedad en las mangas de los filtros.

2. Método semiseco

En el método semiseco, el reactivo utilizado se presenta diluido en agua. En caso de utilizarse cal como reactivo, ésta se añade a la corrien-

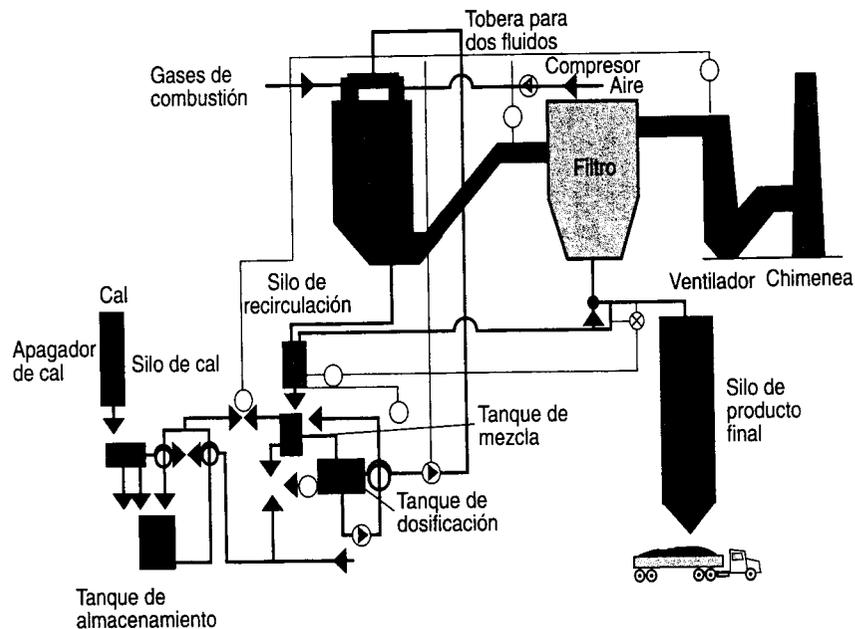


Método seco

te gaseosa en forma de lechada de cal. El reactor en este caso es sustituido por una torre donde, mediante pulverizadores, se inyecta la lechada en forma de una nube de gotas muy finas. El contacto entre los gases de combustión procedentes del horno de incineración y la lechada de cal produce el enfriamiento de la corriente gaseosa hasta la temperatura adecuada para la eliminación de contaminantes y el secado de la lechada por evaporación del agua contenida en la misma, por lo que el residuo final

será un residuo seco que se retirará del flujo de gas mediante un proceso de filtración.

Utilizando el reactivo indicado anteriormente (lechada de cal), se consigue la eliminación de los gases ácidos mediante la neutralización de éstos. Una vez neutralizados los gases ácidos, se puede realizar la adición de sulfuro de sodio o carbón activo, con el fin de producir la eliminación del mercurio gaseoso y los compuestos orgánicos presentes en los gases. Como etapa final, al igual que en el método seco, se debe realizar la separación de partículas mediante un proceso de filtración, utilizándose preferentemente para dicho proceso un filtro de mangas, debido a la ventaja ya apuntada en el desarrollo del proceso seco. Los gases depurados se expulsan al exterior mediante una chimenea.



Método semiseco

3. Método húmedo

El sistema húmedo se caracteriza por la utilización de agua como líquido absorbente en la limpieza de los gases, conteniendo ésta en algunos casos agentes neutralizantes.

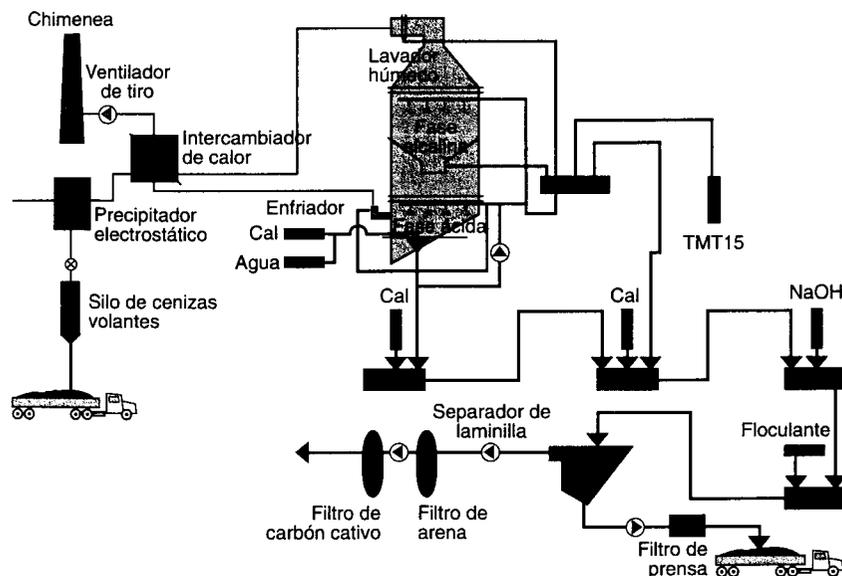
Los distintos tipos de torres de lavado existentes no se caracterizan por tener una elevada eficacia en la captación de partículas, por lo que antes de la torre será necesario disponer de un sistema de captación de partículas, bien mediante un proceso de filtración con filtro de mangas o precipitador electrostático, bien utilizando para la captación un lavador de tipo venturi, siendo este tipo de lavador el único con el que es posible conseguir una alta eficacia de eliminación de partículas. En la figura de la página siguiente se muestra un diagrama de flujo típico de este método.

La temperatura de los gases será uno de los factores más importantes a tener en cuenta durante el proceso de absorción, por lo que antes de la entrada de los gases en la torre de lavado se deberá disponer de un sistema de enfriamiento de los mismos mediante un intercambiador de calor o un sistema similar (caldera de recuperación, etc.), reduciendo así la temperatura de saturación adiabática.

El líquido de lavado se inyecta en la corriente gaseosa mediante pulverizadores, formando una película de gotas de agua en toda la sección transversal de la torre. La eliminación de los gases ácidos (ClH , FH , etc.) se realiza mediante la adición de agua pura o hidróxido cálcico como líquido de lavado. En esta fase, con pH bajo, se produce, además, la eliminación del mercurio en forma de cloruro mercuríco HgCl_2 . Para poder conseguir un buen rendimiento en la eliminación se debe mantener el PH por debajo de 2, evitando así la disolución de SO_2 en el agua y por tanto la reducción del HgCl_2 a mercurio elemental, ya que este último se elimina en menor medida, por lo que se debe evitar su formación. La eliminación de SO_2 se puede realizar añadiendo hidróxido de sodio.

En lo que se refiere a emisiones, los métodos seco y semiseco alcanzarán generalmente mayor eficacia que el método húmedo en la eliminación de partículas y compuestos orgánicos, entre los que se encuentran las dioxinas; sin embargo, la eficacia depuradora de los gases ácidos será menor.

La comparación de costes entre los diferentes métodos es muy difícil, debido a la gran cantidad de parámetros que influyen en su estimación: precio de los reactivos utilizados, tamaño de la planta, tiempo de funcionamiento anual, requisitos de emisión, cantidad de calor recuperado, etc. De forma general, se puede apuntar el método seco como el método de



Método húmedo

más bajos costes de inversión, siendo el método húmedo el que los tiene normalmente más elevados. En cuanto a los costes de funcionamiento, el método húmedo es el que los presenta más reducidos.

La utilización de las mejores tecnologías disponibles con costes razonables (BATNEEC), a las que se hace referencia en la Directiva del Consejo (84/360/CEE) «Relativa a la lucha contra la Contaminación Atmosférica procedente de las Instalaciones Industriales», supondría, en el caso concreto de la aplicación de tecnologías de depuración de efluentes atmosféricos en las plantas de incineración de los residuos, la no superación de los valores límite establecidos en la «Propuesta de Directiva Relativa a la incineración de residuos peligrosos». En la tabla de la página siguiente se muestran los niveles de emisión que sería posible alcanzar mediante la aplicación de la «mejor tecnología disponible», referente a los años 1990 y 1992. En dicha tabla puede apreciarse el importante desarrollo tecnológico que se ha experimentado en pocos años, lo que ha propiciado que sea factible el endurecimiento de los límites legales de emisión.

EMISIONES DE UN INCINERADOR DE RESIDUOS

CONTAMINANTE	TECNOLOGÍA BAT 1990	TECNOLOGÍA BAT 1992
Polvo	5	< 1
VOC	10	< 2
HCL	10	< 2
SO	20	< 5
NO ^x	< 100	< 100
Hg ^x	0,05	0,002
Cd/Te	0,5	0,007
Metales Pesados	1	0,02
Dioxina ngTE/m ³	2	0,004-0,04

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

Tratamiento de las aguas de proceso

El abastecimiento de agua a la industria puede realizarse bien por el suministro público o bien por captaciones independientes en pozos o aguas superficiales continentales, utilizándose las aguas marinas únicamente en casos de extrema necesidad. La industria debe tender a emplear preferentemente aguas superficiales, es decir, de ríos, lagos, embalses, etc. Tales aguas presentan características variables:

- De temperatura, según las estaciones climáticas.
- De salinidad, según la naturaleza de los suelos (síliceos o calcáreos), o también según la importancia de los vertidos aguas arriba.
- De contaminación orgánica, según la naturaleza del suelo y de los vertidos.
- De contaminación física, por materias en suspensión.

Para poder determinar las condiciones de tratamiento, es necesario un conocimiento profundo de tales variaciones.

Las aguas de pozo, por el contrario, presentan la ventaja de una cierta constancia de temperatura y de salinidad.

Cualquiera que sea el uso del agua y los tratamientos posteriores a los que deberá someterse, en algunos casos es aconsejable efectuar un tratamiento general de desbaste o de filtración en las proximidades de la toma de agua.

Los usos principales del agua en la industria son:

- Sanitario: empleo en inodoros, duchas e instalaciones que garanticen la higiene personal.
- Transmisión de calor o refrigeración: es, como mucho, el uso industrial que más cantidad de agua emplea. Aproximadamente el 80 % del agua industrial corresponde a esta aplicación, siendo las centrales térmicas y nucleares las instalaciones que más agua necesitan.
- Producción de vapor: suele estar dirigida a la obtención de un medio de calentamiento del producto que se desea elaborar.
- Materia prima: el agua puede ser incorporada al producto final, como en el caso de la producción de bebidas, o puede suministrar un medio adecuado a determinadas reacciones químicas.
- Utilización como disolvente en los diferentes procesos productivos.
- Labores de limpieza de las instalaciones.
- Obtención de energía: referido a las centrales hidroeléctricas y a las actividades que usan vapor de agua para el movimiento de turbinas.

Como ya se ha indicado, la transmisión de calor o refrigeración es el uso más importante de los expuestos en cuanto a cantidad de agua utilizada, por lo que a continuación se realiza un estudio más detallado de esta aplicación.

Agua para generadores de vapor

La caldera es un recipiente en el cual tiene lugar una vaporización del agua mediante aporte de energía calorífica obtenida de un combustible fósil o nuclear.

El vapor es un medio de transporte de energía relativamente fácil para distancias cortas, razón por la cual encuentra numerosas aplicaciones industriales como medio de calefacción y también como fuerza motriz.

El objetivo de los tratamientos de aguas para caldera es reducir y evitar los tres principales problemas asociados a la generación de vapor:

- La formación de incrustaciones.
- La corrosión.
- Los arrastres.

Las incrustaciones son debidas principalmente a la presencia en el agua de sales de calcio (carbonatos o sulfatos) menos solubles en caliente que en frío, o a una concentración demasiado fuerte de sílice con relación a la alcalinidad del agua contenida en la caldera.

Las corrosiones son de origen y naturaleza muy diversos, ya que pueden ser debidas a la acción del oxígeno disuelto o a corrientes de corrosión producidas por irregularidades en las superficies metálicas, o también al ataque directo del hierro por el agua.

También puede darse el arrastre, con el vapor, de cuerpos minerales volátiles a la temperatura de ebullición, entre los cuales el más nocivo es la sílice. Estos cuerpos se depositan en las paletas de las turbinas, provocando graves problemas en su funcionamiento.

Para conseguir estos objetivos, el agua de aporte suele someterse a un tratamiento externo que reduzca la presencia de contaminantes a un nivel adecuado (desmineralización). Para contrarrestar el efecto de los contaminantes residuales se añaden, además, los aditivos químicos apropiados. El tercer elemento de control de la calidad del agua, en el ciclo de vaporización-condensación, es la purga de una parte del agua del calderín para mantener las concentraciones máximas admisibles.

El método de tratamiento adecuado vendrá determinado por normas de seguridad y las especificaciones del fabricante.

Agua de refrigeración

La mayoría de las instalaciones industriales usan agua como medio de enfriamiento. Las principales razones para utilizar agua son su disponibilidad en la mayor parte de zonas industrializadas y su elevado calor específico.

Normalmente, el agua no entra en contacto directo con el material a enfriar, sino que el intercambio se realiza a través de una pared, por lo general metálica, buena conductora del calor. Esta pared es la superficie de intercambio de calor, y, lo mismo que el agua y el fluido a enfriar, está encerrada en un recipiente llamado intercambiador de calor.

En una primera división, los sistemas de refrigeración se clasifican en sistemas abiertos y cerrados. Los sistemas cerrados pueden, a su vez dividirse en sistemas con recirculación abierta y de recirculación cerrada.

1. Sistemas abiertos

El agua se utiliza una sola vez. La cantidad de agua requerida es elevada, resultando muy caro el tratamiento de ésta mediante productos químicos. Se puede, en algunos casos, efectuar una corrección simple de pH

y una adición de hipoclorito para impedir el desarrollo de algas y bacterias.

2. Sistemas cerrados

- Con recirculación abierta: el agua calentada en el proceso de refrigeración, se enfría de nuevo mediante evaporación de una parte de la masa que cede calor latente.
- Con recirculación cerrada: el agua caliente se enfría mediante contacto con un fluido secundario, aire o agua, retornándose al sistema.

Los problemas derivados del agua de refrigeración que surgen en las instalaciones son:

- Corrosión.
- Incrustaciones.
- Crecimiento microbiológico.
- Depósito de fangos.

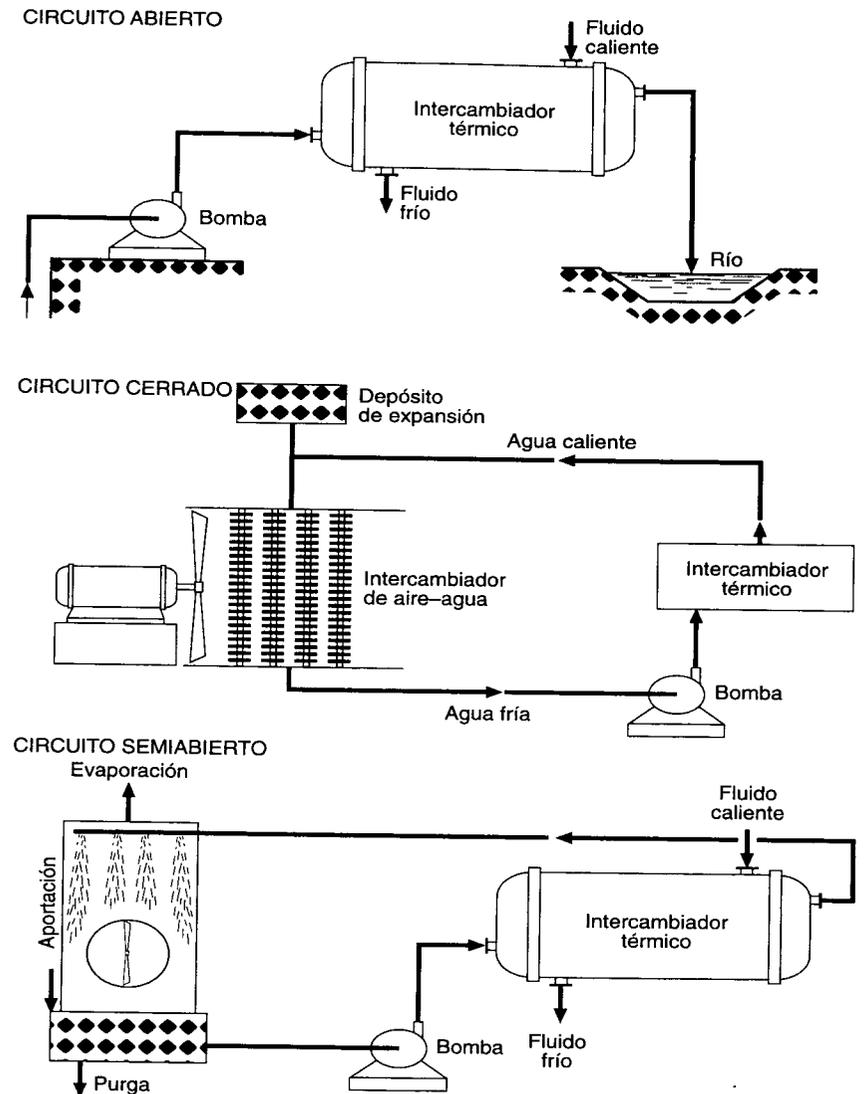
Las incrustaciones se producen como consecuencia del depósito de sales poco solubles sobre la superficie de las tuberías. Al evitar la formación de incrustaciones existirá el riesgo potencial de que se generen corrosiones, por lo que deberá buscarse el equilibrio del agua que garantice la protección de las instalaciones.

El carácter incrustante o corrosivo del agua de refrigeración, según el método de Langelier, es función de las siguientes variables: calcio, alcalinidad, temperatura, salinidad y pH. Las cuatro primeras variables determinan el pH de saturación del carbonato cálcico (pH_s), es decir, el pH por encima del cual el carbonato cálcico se depositará y por debajo del cual permanecerá disuelto.

El índice de Langelier se define como la diferencia entre el pH real y el de saturación. Cuando dicho índice es mayor que cero el agua es incrustante, si es menor que cero corrosiva, y si es igual a cero se considera que el agua está equilibrada:

$$\text{Índice de Langelier} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

- > 0 incrustante
- = 0 equilibrada
- < 0 corrosiva



**Tipos de circuitos
(Degremont, 1979)**

Este índice es cualitativo, pero no cuantitativo, por lo que experiencias posteriores llevadas a cabo por Ryznar han llevado a sustituir el índice de saturación por el de estabilidad, definido como la diferencia entre el doble del pH de saturación y el real. Cuando el índice de estabilidad es menor de seis, el agua es incrustante, si es mayor de siete, corrosiva y si se encuentra entre seis y siete, se considera un agua equilibrada:

$$\text{Índice de estabilidad} = 2\text{pH}_s - \text{pH}$$

< 6 incrustante

= 6-7 equilibrada

< 7 corrosiva

Los microorganismos presentes en el agua utilizada en los sistemas de refrigeración pueden afectar negativamente al correcto funcionamiento del circuito de refrigeración, actuando como agentes de corrosión. Estos microorganismos se introducen en los sistemas mediante el agua de aporte o el aire que cruza las torres.

Las características del agua y de la instalación permiten prever el tipo de tratamiento que convendrá aplicar a una instalación determinada. Sin embargo, es el seguimiento posterior de la instalación el que permitirá definir el programa más indicado por la eficacia de los resultados y el ajuste del costo operativo.

El programa de tratamiento se diseña con la recomendación de que el agua de circulación no sobrepase los 1.500 ppm de sólidos disueltos y sea siempre inferior a 2.500 ppm. La conductividad debe ser inferior a 4.000 microsiemens y los sólidos en suspensión a 100 ppm.

El control de los microorganismos suele ser complejo, debido a la gran variedad que presentan, haciendo en algunos casos que los productos eficaces en el control de ciertas especies puedan tener muy poco efecto sobre otras.

Tratamiento de aguas residuales

El objetivo de cualquier tratamiento es eliminar los componentes definidos como contaminantes, molestos o con efectos nocivos para el medio ambiente, y ajustar la calidad del agua vertida a las especificaciones legales.

La mejor forma de tratar un agua residual depende de una serie de factores: caudal, composición, concentraciones, calidad requerida del

efluente, abundancia de agua, posibilidad de reutilización, posibilidad de vertido a una depuradora municipal, etc. El costo de los consumos de agua de producción y el costo derivado de los vertidos de aguas residuales orientan la recomposición de muchos procesos industriales para disminuir ambos costos. El estudio de un tratamiento de aguas residuales se inicia por un análisis del inventario de vertidos, su posible reducción y el potencial reciclado de aguas después de su depuración. Una depuración suficiente puede significar la reutilización de importantes volúmenes de agua y el correspondiente ahorro en el consumo.

Para dimensionar una depuradora el inventario de efluentes, debe contener los caudales instantáneos y medios. No es suficiente partir de los consumos de agua, especialmente si parte es absorbida por los procesos de fabricación o hay pérdidas por evaporación.

La homogeneización previa de las aguas residuales industriales es, en general, inevitable para alcanzar un proceso estable y un dimensionado óptimo de las unidades de tratamiento.

Ocurre con frecuencia que el mayor nivel de contaminación se presenta con algunos efluentes de poco volumen. Conviene entonces segregar estos efluentes de otros de mayor volumen y poco contaminados, y hacer un tratamiento independiente que siempre representará una solución más económica.

La neutralización química de efluentes es un tratamiento necesario en la mayoría de las industrias, y a veces el único.

Para la depuración existen dos líneas fundamentales: la fisicoquímica y la biológica. La depuración biológica tiene un campo de aplicación limitado a vertidos cuyo principal contenido son los compuestos orgánicos. Para el resto de los vertidos el único medio puede ser el tratamiento fisicoquímico, que, frente a un elevado coste de reactivos puede requerir menores inversiones, su puesta en marcha es rápida y permite ajustes de capacidad y operación intermitentes.

Las aportaciones significativas de contaminación que se enumeran seguidamente, se han clasificado en función de los métodos de tratamiento que se les aplican:

- Elementos insolubles separables físicamente con o sin floculación:
 - Materias grasas, flotantes (grasas, hidrocarburos alifáticos, alquitranes, aceites orgánicos).
 - Materias sólidas en suspensión (arenas, óxidos, hidróxidos, pigmentos, fibras, etc.).

- Elementos orgánicos separables por precipitación:
 - Colorantes, detergentes, compuestos macromoleculares diversos, compuestos fenolados.
 - Elementos separables por precipitación:
 - Metales tóxicos o no, Fe, Cu, Zn, Ni, Be, Al, Pb, Hg, Cr, precipitables en una zona de pH.
 - Sulfitos, fosfatos, sulfatos, fluoruros, por adición de Ca⁺.
 - Elementos que pueden precipitar en forma de sales insolubles de hierro o de complejos:
 - Sulfuros, fosfatos, cianuros, sulfocianuros.
 - Elementos separables por desgasificación:
 - H₂S, NH₄⁺, alcoholes, fenoles, sulfuros.
 - Elementos que necesitan una reacción de oxidación-reducción:
 - Cianuros, cromo hexavalente, sulfuros, cloro, nitrito.
 - Ácidos y bases:
 - * Ácidos clorhídrico, nítrico, sulfúrico y fluorhídrico.
 - Elementos que pueden concentrarse por intercambio iónico o por ósmosis inversa:
 - Sales de ácidos y de bases fuertes, compuestos orgánicos ionizados.
 - Elementos que se adaptan a un tratamiento biológico:
 - Todos los elementos biodegradables por definición; por ejemplo, azúcares, proteínas, fenoles. Los tratamientos biológicos pueden aplicarse también, después de su aclimatación, a compuestos orgánicos tales como formol, la anilina y ciertos detergentes.
- Debido a la gran heterogeneidad de sectores industriales, y dado que dentro de cada sector se emplean procesos diferentes, se ha creído conveniente exponer los tratamientos de aguas como procesos independientes para una mejor comprensión. Sin embargo, hay que recordar que muchas industrias deberán emplear varios procesos de depuración para ajustarse a la calidad requerida para su vertido.

Los procesos unitarios se pueden clasificar en:

- Procesos físicos.
- Procesos químicos.
- Procesos biológicos.

Procesos físicos

1. Desbaste por rejillas, tamices, etc.

El objetivo de las rejillas y tamices es la eliminación de los sólidos gruesos presentes en el agua. Se colocan generalmente en cabecera de planta, evitando de esta forma las posibles obstrucciones en las conducciones y los efectos negativos que sobre un tratamiento biológico podrían ocasionar.

Atendiendo a la separación libre entre las barras, las rejillas de desbaste pueden clasificarse en:

TIPOS	ESPACIO ENTRE BARRAS (cms)
FINAS	< 1.5
MEDIAS	Entre 1.5 y 5
GRUESAS	Entre 5 y 15

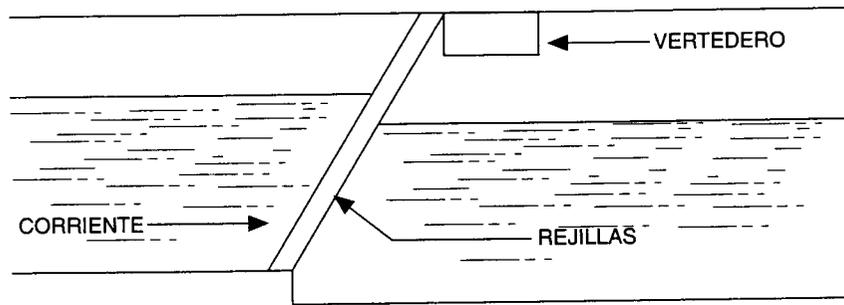
Según el tipo de limpieza:

- De limpieza manual.
- De limpieza mecánica.

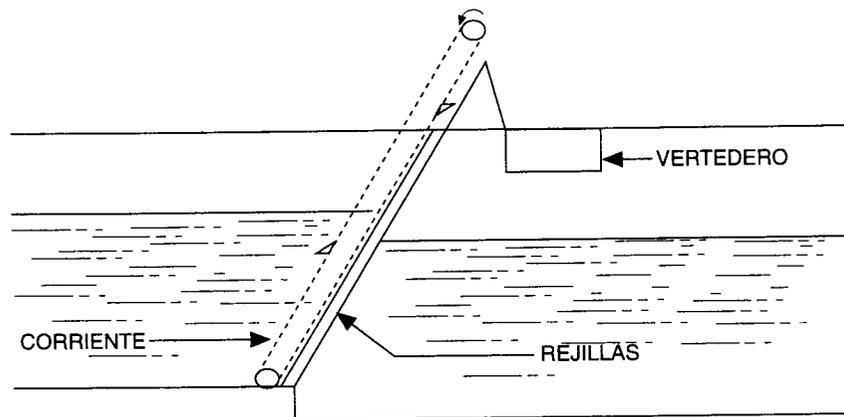
En la página siguiente continuación se muestran, de manera esquemática, los dos tipos de rejillas, pudiéndose comprender con sencillez cuál es el funcionamiento de una rejilla de limpieza automática.

Frente a las ventajas que la limpieza mecánica comporta, en cuanto a facilidad de mantenimiento, cabe señalar el gasto de energía adicional que supone.

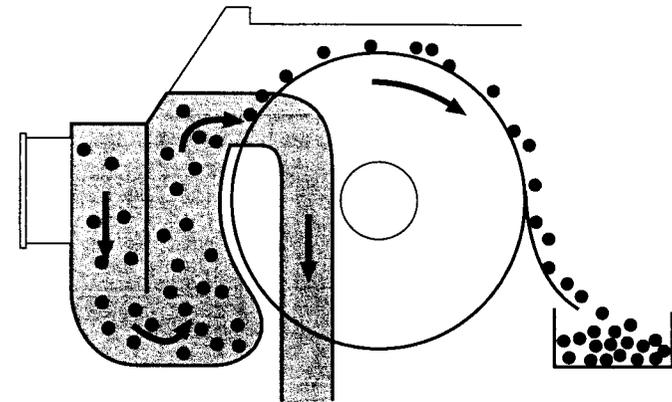
Los tamices que se utilizan actualmente son del tipo tambor o disco, provistos de una malla de acero inoxidable (véase figura página 263). El funcionamiento consiste en la elevación de los sólidos presentes en el agua mediante la rotación del tamiz, almacenando éstos en una bandeja receptora.



Reja de limpieza manual (Ortega (1), 1991)



Reja de limpieza automática (Ortega (1), 1991)



Esquema de un tamiz rotativo (Hernández (1), 1990)

2. Sedimentación

La sedimentación consiste en la separación por gravedad de los sólidos en suspensión presentes en el agua cuya densidad es superior a la misma.

Este proceso puede utilizarse en diversas etapas de una estación depuradora: eliminación de arena, decantación primaria, coagulación química, espesado de fango, etc.

Existen muy diversos tipos de decantadores. Hacer una clasificación exhaustiva de todos ellos sería una costosa labor que queda fuera de los objetivos de este manual.

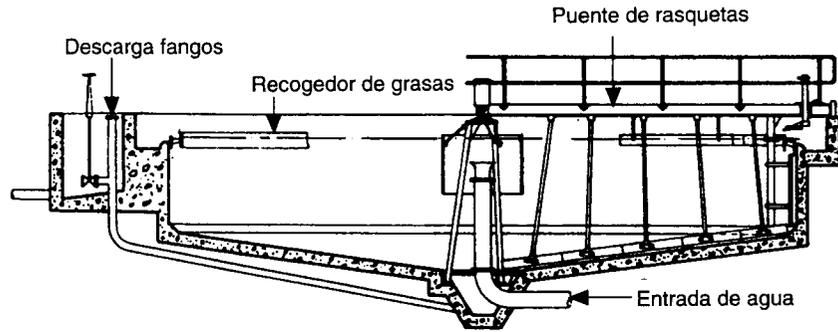
De forma general los decantadores pueden dividirse en dos tipos:

- Decantadores circulares

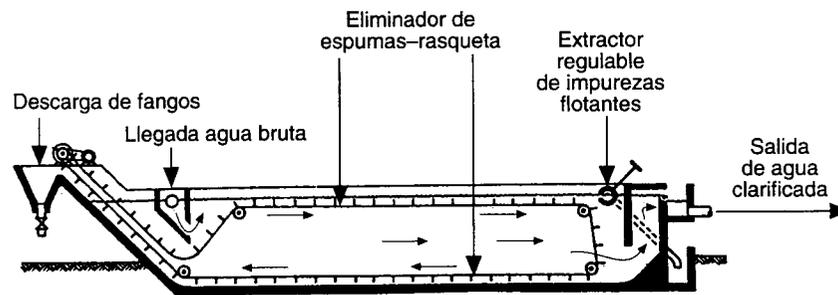
Generalmente el agua entra por la parte central y sale por la periferia mediante vertedero. Los fangos y los sobrenadantes se recogen en este caso mediante rasquetas giratorias.

- Decantadores rectangulares

El agua fluye paralela a la dimensión más larga, de un extremo al otro. Los fangos decantados se arrastran mediante rasquetas, recogiéndose en una tolva.



Decantador circular (Hernández (1), 1990)



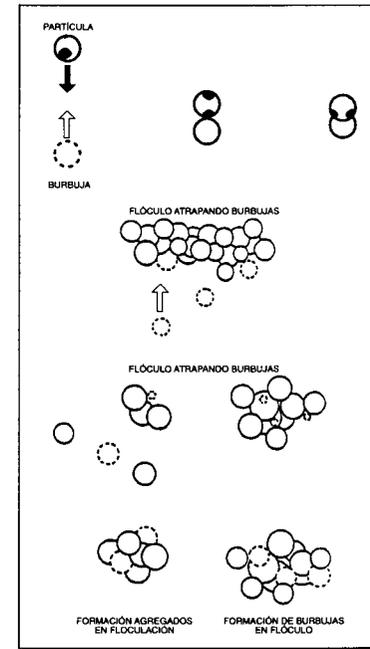
Decantador rectangular (Hernández (1), 1990)

Los sobrenadantes que se forman en la superficie del agua se recogen igualmente mediante rasquetas.

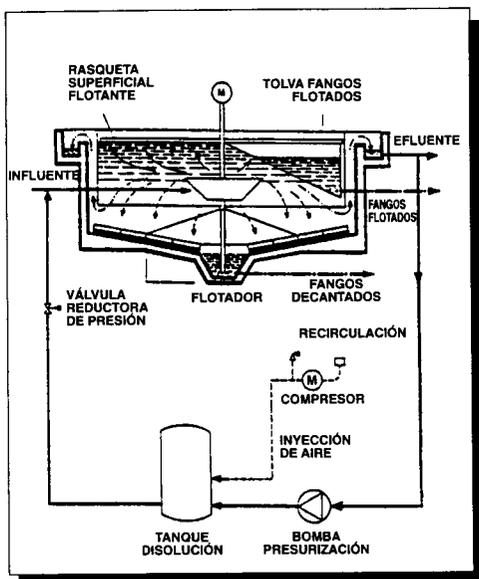
3. Flotación

Este proceso permite eliminar materias en suspensión por su menor densidad con relación a la del agua.

Para la separación por flotación de partículas se inyecta en el agua aire a presión que se disuelve. Al entrar el agua al decantador-flotador mediante una válvula de alivio, se disminuye la presión del agua, y, en consecuencia, se desprende el aire que se había disuelto en forma de finas burbujas que se adhieren a las partículas dispersas, elevándolas a la superficie, formando una especie de nata que se va retirando mediante una rasqueta que la barre.



Mecanismos de flotación (Tejero, 1994)



**Esquema de un decantador flotador
(Tejero, 1994)**

Normalmente, la operación de inyección de aire va precedida de una floculación química, con lo que se incrementa el tamaño de las partículas a separar.

Este procedimiento se utiliza frecuentemente para tratar aguas residuales que contengan aceites, procedentes de la fabricación de papel o de procesos de galvanotecnia, etc.

4. Evaporación

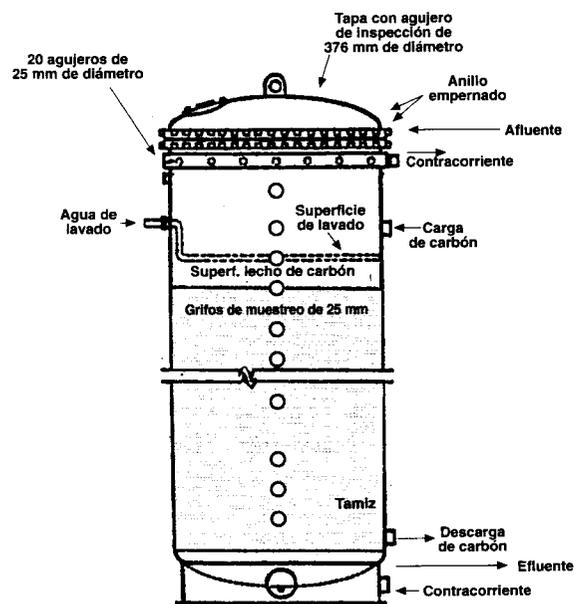
Este proceso se utiliza para concentrar materias en algunas circunstancias. La evaporación es el procedimiento empleado para llevar las aguas al punto de ebullición y evaporar agua pura. El vapor se utiliza para producción de energía, si está condensado para calefacción, o simplemente se pierde en la atmósfera que le rodea. Los compuestos inorgánicos del residuo pueden ser concentrados suficientemente hasta formar sólidos, para ser utilizados en el ciclo de producción o eliminados fácilmente.

5. Adsorción

Se emplea la adsorción para eliminar microcontaminantes. La adsorción define la propiedad de ciertos materiales (adsorbentes), de fijar en su superficie moléculas orgánicas extraídas de la fase líquida en la que se encuentran.

El adsorbente más utilizado es el carbón activo. Para la preparación de los carbones activos de uso frecuente se emplea principalmente antracita, carbones grasos o bituminosos, coques de petróleo, turba, madera.

La experiencia demuestra que los carbones activos son adsorbentes de amplio espectro: la mayoría de las moléculas orgánicas se fijan en su superficie, siendo las que peor se fijan las moléculas más cortas (especialmente las que contienen menos de tres átomos de carbono: alcoholes simples, primeros ácidos orgánicos) y las menos polares. Por el contrario, se fijan bien las moléculas más pesadas, los compuestos aromáticos, los hidrocarburos, sustituidos, etc.



**Columna típica de adsorción con carbón activo
(Metcalf & Eddy, 1985)**

Como puede observarse, los cuerpos que peor se fijan, son, por el contrario, los más fácilmente biodegradables, lo que confiere al tratamiento de adsorción un carácter de complementariedad apreciable con relación al tratamiento biológico.

Por ello se utilizan:

- En tratamiento terciario de aguas residuales o industriales: el carbón fija los compuestos orgánicos disueltos, refractarios al tratamiento biológico situado en la entrada, con lo que se elimina una gran proporción de la DQO residual.
- En tratamiento de aguas residuales industriales, cuando el efluente no es biodegradable o contiene elementos tóxicos orgánicos que impiden la puesta en práctica de técnicas biológicas. Se observa por otra parte, que, en este caso, mediante el empleo de carbón activo puede efectuarse generalmente, una retención selectiva de los elementos tóxicos y, por consiguiente, obtener un efluente normalmente biodegradable.

6. Procesos de separación por membranas

Son procesos que se utilizan para eliminar materia disuelta en el agua a tratar. Se pueden clasificar en:

- Membranas semipermeables: ultrafiltración.
- Membranas de diálisis: electrodiálisis.

En el caso de las membranas semipermeables, son permeables al agua y a ciertos sólidos e impermeables al resto de los sólidos y a toda partícula.

Las membranas de diálisis, por el contrario, son impermeables al agua, pero permiten la transferencia de todas las especies ionizadas, o la de un determinado signo, bajo el efecto de una diferencia de potencial químico entre las soluciones que bañan sus caras.

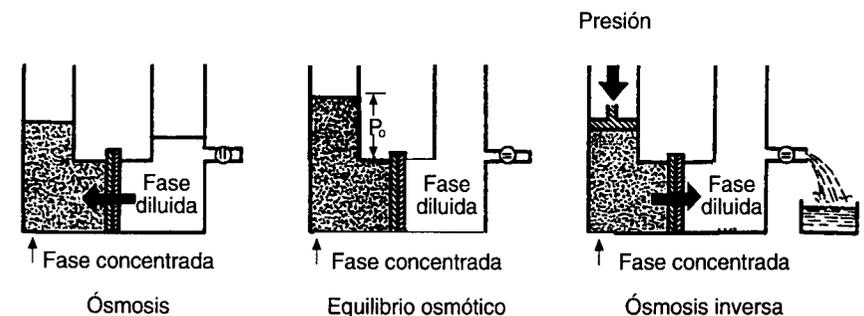
Las membranas de ultrafiltración son de naturaleza muy variable; gran número de polímeros o copolímeros de síntesis presentan propiedades satisfactorias. Por ello corresponde al fabricante informar sobre las propiedades exactas de cada membrana: punto de corte, resistencia química, resistencia a la temperatura, etc.

Se utiliza en la industria para el tratamiento de las aguas de lavado de cabinas de pintura por electroforesis (recirculación de los pigmentos y re-

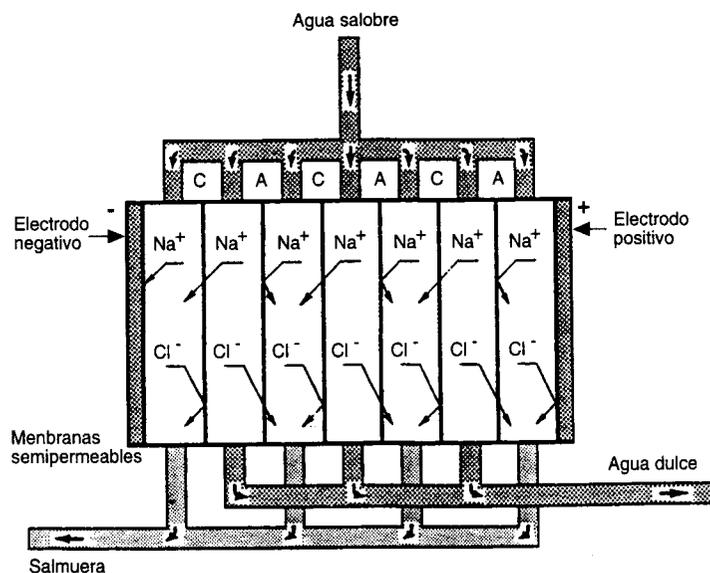
sinas de las pinturas). Asimismo, también se aplica la ultrafiltración para el tratamiento de aceites solubles usados.

La ósmosis inversa en un proceso de alta presión, basado en el fenómeno de presión osmótica natural, en el cual, cuando dos disoluciones de diferente concentración están separadas por una membrana semipermeable, se produce el paso de disolvente desde la solución más diluida hasta la más concentrada, hasta llegar al equilibrio en el que ambas tengan la misma concentración. La aplicación de una presión superior a la osmótica sobre la solución más concentrada produce el efecto inverso, pasando el disolvente desde la solución más concentrada a la más diluida, efectuándose de esta forma la separación de los contaminantes.

La electrodiálisis se basa en el siguiente principio: si un líquido rico en iones es sometido a un campo eléctrico por medio de dos electrodos entre los que se aplica una diferencia de potencial continua, los cationes se desplazan hacia el electrodo negativo y los aniones se dirigen hacia el electrodo positivo. Si se coloca entre los electrodos un conjunto de membranas de diálisis selectivas, unas negativas, permeables a los cationes únicamente, y otras, positivas, permeables sólo a los aniones, dispuestas alternativamente, se limita la migración de los iones, ya que los aniones no pueden atravesar las membranas negativas, ni los cationes las membranas positivas.



**Esquema de los procesos de ósmosis y ósmosis inversa
(De Lora, 1978)**



Esquema del proceso de electrodiálisis (De Lora, 1978)

Este procedimiento permite la desmineralización del agua. Por el contrario, las moléculas no ionizadas (especialmente compuestos orgánicos) y los coloides permanecen en el agua tratada.

Procesos químicos

1. Floculación y coagulación

Cuando existe dificultad para la sedimentación de las partículas en suspensión coloidales se emplea este procedimiento. La pequeña dimensión de las partículas coloidales presentes en un agua, así como la existencia de cargas negativas repartidas en su superficie, dan lugar a una gran estabilidad de las suspensiones coloidales.

La coagulación es el fenómeno de desestabilización por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas. La agrupación de las partículas descargadas, al ponerse en contacto unas con otras, constituye la floculación, que da lugar a la formación de flóculos capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento del agua.

Los inconvenientes que plantea este proceso son el coste de reactivos y principalmente el gran volumen de lodos que se produce en la floculación. La floculación provoca la precipitación de muchas sustancias coloidales, de forma que el contenido en materias sólidas de los lodos que sedimentan, respecto al volumen de los mismos se reduce notablemente, pasando, por ejemplo, de un 5 % a menos del 2 %. En consecuencia, la cantidad de lodos a eliminar se duplica o triplica y, por otra parte, resulta difícil de manejar, ya que los lodos con menos de un 3 % de materia sólida son difíciles de tratar en los sistemas clásicos de deshidratación.

Muchos vertidos industriales tienen color, característica que en ocasiones es más perjudicial por su efecto estético que por su incidencia ecológica. La reducción de color de los vertidos suele ser cara y en ocasiones complicada.

El proceso más utilizado para eliminar color es la floculación. Las aguas coloreadas que se resisten a este proceso es preciso recurrir a tratarlas con carbón activo y otros sistemas costosos.

2. Neutralización

En ocasiones las aguas residuales contienen ácidos o álcalis que deben ser neutralizados hasta valores de pH apropiados. Estos valores vendrán definidos bien por los límites marcados por la legislación en caso de vertido directo, o bien por los valores en los que es posible la actividad biológica en caso de su tratamiento biológico.

La forma de tratar estas aguas consiste en dosificar una base o un ácido en una cantidad tal que neutralice el exceso de ácido o base, respectivamente, hasta llevar al agua a pH 7 o próximo. De los diferentes tipos de sales neutralizantes será conveniente elegir aquella de menor coste que no ocasione efectos secundarios, tal como producir lodos o aportar otros iones que se consideren perjudiciales para la posterior eliminación o aprovechamiento del efluente neutralizado. En general, las bases más utilizadas son la cal, el hidróxido sódico, el hidróxido de calcio y en ocasiones el carbonato cálcico.

3. Oxidación y reducción

Estas reacciones se utilizan para modificar el estado de oxidación de ciertos elementos (nitrogenados, sulfurados, cianurados, etc.), con objeto de hacerlos insolubles o no tóxicos.

Algunos elementos se presentan en forma oxidada o reducida, y pasan de una a otra por incremento de electrones (reducción) o pérdida de electrones (oxidación). Un sistema formado por un receptor y un donante de electrones, entre los cuales puede efectuarse una transferencia de los mismos de forma que uno de los cuerpos se oxide en tanto que el otro se reduzca, se conoce con el nombre de sistema oxidante-reductor.

4. Intercambiador de iones

El intercambiador de iones se usa para eliminación de cobre, zinc, plomo, entre otros metales. Tiene una estructura macromolecular, que incluye uno o varios radicales de función ácida o básica.

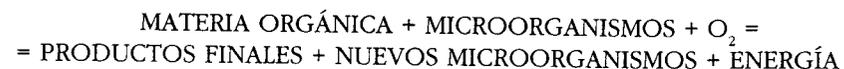
La presencia de estos radicales hace que, en el estudio de los fenómenos de intercambio, pueda equipararse un intercambiador de cationes con un ácido de forma H-R, y un intercambiador de aniones con una base de forma R-OH. La fuerza de este ácido o de esta base depende de la naturaleza del núcleo molecular y de los radicales unidos a él. Los intercambiadores de iones sólo pueden trabajar en presencia de una fase líquida de concentración limitada. Están destinados a fijar iones y no a filtrar materias en suspensión, coloides o emulsiones grasas.

El uso más extendido de este proceso se da en el ablandamiento del agua doméstica, donde los iones sodio procedentes de una resina de intercambios catiónica sustituyen a los iones magnesio y calcio presentes en el agua, reduciendo, por tanto, su dureza. Para la reducción de los sólidos totales disueltos deben usarse resinas de intercambio catiónicas y aniónicas. El agua residual se hace pasar primeramente a través de un intercambiador catiónico donde los iones cargados positivamente son sustituidos por iones de hidrógeno. El efluente del intercambiador catiónico se hace pasar a continuación sobre una resina de intercambio aniónico, donde los aniones se sustituyen por iones de hidroxilo. Por tanto, los sólidos disueltos son reemplazados por iones de hidronio e hidroxilo que reaccionan entre sí para formar moléculas de agua.

Procesos biológicos

Se busca en ellos una doble acción, la metabólica y la floculación de las partículas en suspensión.

El mecanismo consiste en la asimilación de la materia orgánica degradable biológicamente (DBO) por los microorganismos, en presencia de oxígeno y nutrientes, de acuerdo con la siguiente reacción:



Los productos finales del metabolismo aerobio son CO_2 y H_2O .
Los procesos convencionales son:

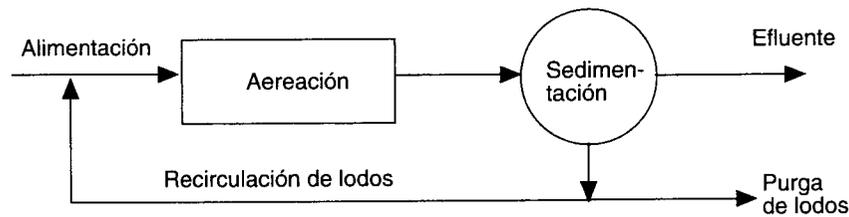
1. Fangos activados

El sistema consiste en desarrollar un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculo en un depósito agitado, aireado y alimentado con el agua a depurar. La agitación evita sedimentos y homogeniza la mezcla de los flóculos bacterianos con el agua residual. La aireación que puede hacerse partiendo del oxígeno del aire, de un gas enriquecido en oxígeno o de oxígeno puro, tiene por objeto suministrar el oxígeno necesario tanto a las bacterias como al resto de los microorganismos aerobios.

Se puede considerar este proceso como de autodepuración acelerada, reforzada y controlada artificialmente. Los fenómenos que se presentan son exactamente los mismos que en los ríos o lagos naturales, pero en las balsas de aireación los organismos se agrupan apretadamente en un espacio reducido y en gran número. Mediante aportación artificial de aire se procura que los organismos encuentren oxígeno suficiente, a pesar de su amontonamiento. El agua se agita para que las masas de flóculos no caigan al fondo y para que los microorganismos y la materia orgánica se pongan en contacto y se homogenicen.

El proceso de depuración se lleva a cabo por los microorganismos que se desarrollan en base a la materia orgánica, y a la existencia de nutrientes (N y P), así como de otros oligoelementos requeridos para el proceso aerobio de fangos activos. Por el contrario, cantidades excesivas de compuestos orgánicos, metales pesados y sales pueden inhibir o destruir el proceso biológico.

El proceso biológico por fangos activos quedará integrado por un reactor biológico y una decantación secundaria. Normalmente, ambos escalones de proceso se materializan en dos tanques, pero existen soluciones de tanques combinados, e incluso puede pensarse en un único depósito, actuando alternativamente como reactor y como decantador.



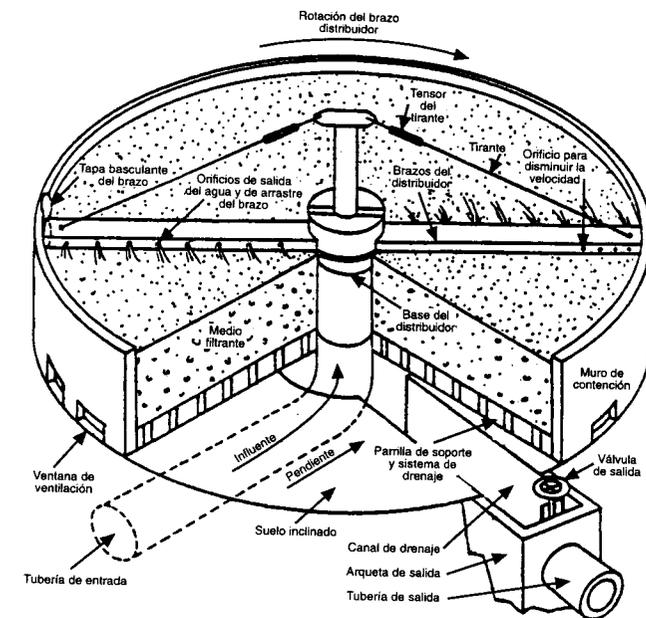
**Proceso convencional de fangos activados
(De Lora, 1978)**

2. Lechos bacterianos

El principio de funcionamiento consiste en hacer caer el agua a tratar, previamente decantada, en forma de lluvia sobre una masa de material de gran superficie específica que sirve de soporte a los microorganismos depuradores, los cuales forman en la misma una película de mayor o menor espesor según la naturaleza del material utilizado. La película se forma por adherencia de los microorganismos al árido y a las partículas orgánicas. Al aumentar el espesor de ésta entra en anaerobiosis la parte profunda, por no llegar el oxígeno. Se produce conjuntamente una fase anaeróbica con desprendimiento de gases y rotura de la película, siendo arrastrada por el agua residual y conducida a la decantación secundaria, donde se producirá la sedimentación. Se suelen aplicar los lechos bacterianos a: efluentes urbanos, industria lechera, industria cervecera, mataderos, etc.

3. Biodiscos y biocilindros

Estos procesos biológicos son válidos como elementos reductores de la materia orgánica y como elementos de nitrificación y desnitrificación.

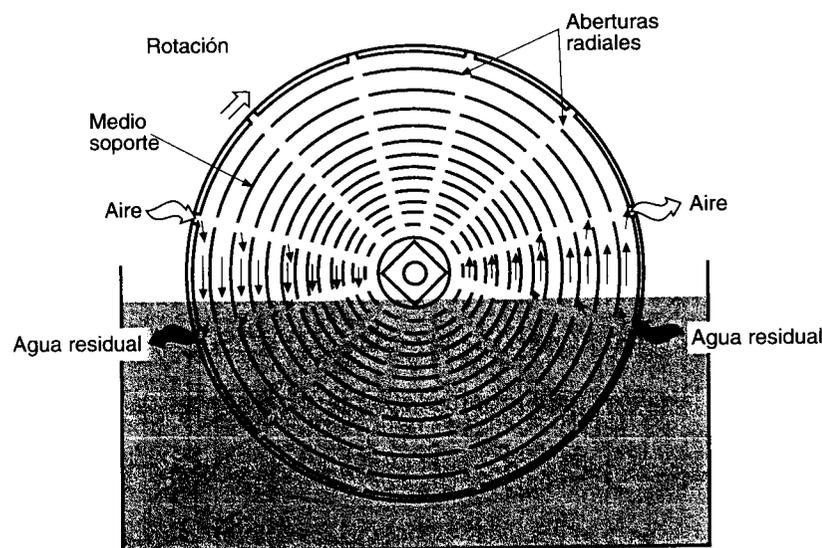


**Esquema de un lecho bacteriano
(Ortega (2), 1991)**

Su funcionamiento puede sintetizarse indicando que los elementos soporte integrantes de los biodiscos o biocilindros se sumergen parcialmente (40 %) en las aguas residuales a tratar contenidas en depósitos por los que fluyen y, girando a baja velocidad, se exponen alternativamente al aire y al agua residual dichos elementos soporte que integran el equipo. Una película biológica empieza a desarrollarse sobre sus superficies. Cuando, por la rotación, una sección de los tambores sale del agua, arrastra consigo parte de la misma que, goteando, forma una fina película líquida y, por lo tanto, con una elevadísima posibilidad de contacto y de intercambio con oxígeno atmosférico.

4. Tratamiento anaerobio

La digestión anaerobia es una fermentación en ausencia de oxígeno que estabiliza las materias orgánicas transformándolas, en el mayor grado



Sección de un biodisco. Intercambio aire-agua

posible, en gas metano y gas carbónico. Un primer grupo bacteriano, constituido por bacterias productoras de ácidos, transforma los compuestos orgánicos complejos en otros más simples (ácido acético, propiónico, butírico), los cuales, a su vez, sirven de alimento a un segundo grupo, las bacterias metánicas. Estas últimas son los organismos clave de la digestión anaerobia. La secuencia de etapas que se produce es la siguiente: licuefacción, gasificación y mineralización, obteniéndose un producto final inerte con liberación de gases.

La licuefacción se produce por enzimas extracelulares que hidrolizan los carbohidratos complejos a simples azúcares, las proteínas o péptidos y los aminoácidos y grasas a glicerol y ácidos, siendo el producto final de la licuefacción ácidos orgánicos volátiles.

Durante la gasificación, estos productos se convierten en gases cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono. Finalmente, la materia orgánica soluble es también descompuesta.

La digestión en su conjunto pasa por distintas fases, siendo las principales la fermentación ácida y la fermentación alcalina, por lo que resulta evidente la importancia del pH en el control de las mismas. También influye otra serie de fenómenos que determinan la eficacia del proceso de

digestión anaeróbica: concentración de los sólidos, mezcla del fango, ácidos volátiles en los fangos.

5. Lagunaje

Los procesos de lagunaje se desarrollan en lagunas artificiales expuestas al aire libre, donde se producen diversas reacciones biológicas (procesos anaerobios o aerobios según el tipo de laguna) que provocan la estabilización de la materia orgánica.

6. Filtro verde

Se denomina filtro verde al terreno cubierto por vegetación (principalmente plantaciones forestales) sobre el que se realiza el vertido de aguas residuales urbanas, produciendo la depuración de dichos vertidos mediante el conjunto de acciones físicas, químicas y biológicas provocadas por el suelo, los microorganismos y las plantas.

Los procesos anteriores de tratamiento de las aguas deben completarse con un proceso de tratamiento de lodos que evite la descomposición incontrolada posterior y reduzca la cantidad de agua presente en el fango, facilitando su evaporización final.

Tratamiento de fangos

Los contaminantes extraídos del agua durante su depuración se concentran en forma de lodos. La composición y características de los lodos depende, por tanto, del tipo de agua tratada y de los procesos de depuración a los que haya sido sometida. La evacuación y destino final del fango es uno de los problemas que se plantean al diseñar una planta depuradora, debiéndose estudiar el tratamiento más adecuado en cada caso, de acuerdo con el tipo de fango. El tratamiento se realiza fundamentalmente mediante diversos procesos físicos, químicos y térmicos que tienen como fin la eliminación de la materia orgánica y el agua presente en el fango, facilitando su manipulación y evacuación final. A continuación se describen brevemente algunos de estos procesos.

Espesamiento

Mediante el espesamiento se consigue la eliminación de buena parte del agua presente en el fango, haciéndolo más manejable y aumentando el rendimiento de tratamientos posteriores.

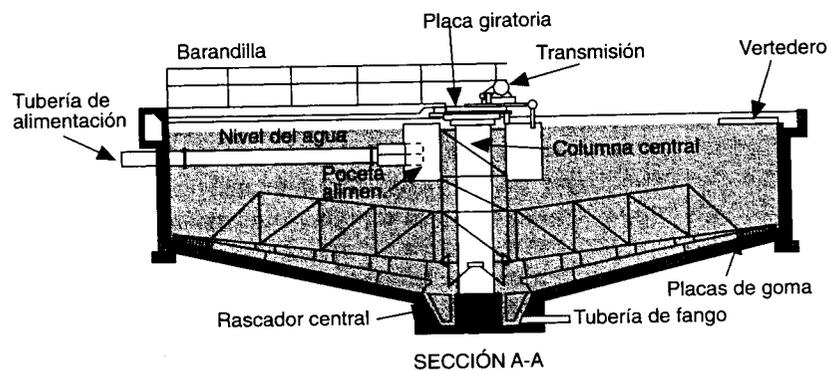
El espesado puede realizarse de las siguientes formas:

1. Por gravedad

La eliminación del agua se lleva a cabo como consecuencia de su diferente densidad frente a los sólidos que constituyen el fango. El diseño de los tanques de espesamiento por gravedad es muy similar al empleado en la sedimentación convencional, ya estudiada. El fango concentrado se recoge del fondo del tanque mediante rasquetas. El agua sobrenadante debe introducirse de nuevo en la línea de tratamiento de agua, debido a la carga contaminante que contiene.

2. Por flotación

El proceso es idéntico al estudiado en los decantadores de flotación, utilizándose en este caso para lodos ligeros de muy poca densidad. Lodos



**Esquema de un espesador mecánico
(en Metcalf & Eddy, 1977, de Dorr-Oliver)**

de estas características se generan, por ejemplo, en aguas de la industria papelera, que contienen fibras ligeras, en los decantadores secundarios de un proceso de fangos activos, etc.

3. Por centrifugación

La centrifugación se utiliza tanto para espesar como para deshidratar, aunque en el primer caso está muy limitada, por lo que estudiaremos este proceso en el apartado correspondiente a la deshidratación.

Estabilización aerobia

El objetivo de la estabilización consiste en la destrucción de la materia orgánica. Se trata de un proceso biológico en el que, en presencia de oxígeno libre, se produce la oxidación de la misma.

El fango sobrante que se retira de un proceso biológico, es decir, aquel que no se recircula en el mismo, tiene gran cantidad de microorganismos y células que necesitan respirar y ejercer sus funciones vitales, consumiendo su propia biomasa.



La necesidad de aportar oxígeno para aireación del fango conlleva un alto costo de explotación, por lo que su utilización se limita a pequeñas plantas.

Estabilización anaerobia

El proceso es idéntico al denominado como tratamiento anaerobio, en el apartado correspondiente al tratamiento de aguas residuales. Su objetivo es la destrucción de la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

Acondicionamiento

Con objeto de mejorar el rendimiento en el proceso de deshidratación del fango, éste puede ser acondicionado mediante alguno de los siguientes tratamientos:

- Tratamiento químico.
- Tratamiento térmico.

1. Tratamiento químico

Mediante la adición al fango de diferentes compuestos químicos puede conseguirse la coagulación de los sólidos, facilitando de esta forma los diferentes procesos de deshidratación que se verán a continuación, en especial la filtración por vacío y la centrifugación. Los productos químicos que más se utilizan son: cal, cloruro férrico y sulfato de alúmina.

2. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico consiste en calentar el fango bajo presión durante cortos períodos de tiempo. Al igual que con el tratamiento químico, se produce la coagulación de los sólidos presentes en el fango.

Deshidratación

La deshidratación es una operación física en la que se persigue la reducción del volumen de fangos mediante la concentración de éstos, disminuyendo lo máximo posible su contenido de humedad.

Los dispositivos de deshidratación más utilizados son:

- Eras de secado.
- Filtros de vacío.
- Filtros banda.
- Filtros prensa.
- Centrifugas.

1. Eras de secado

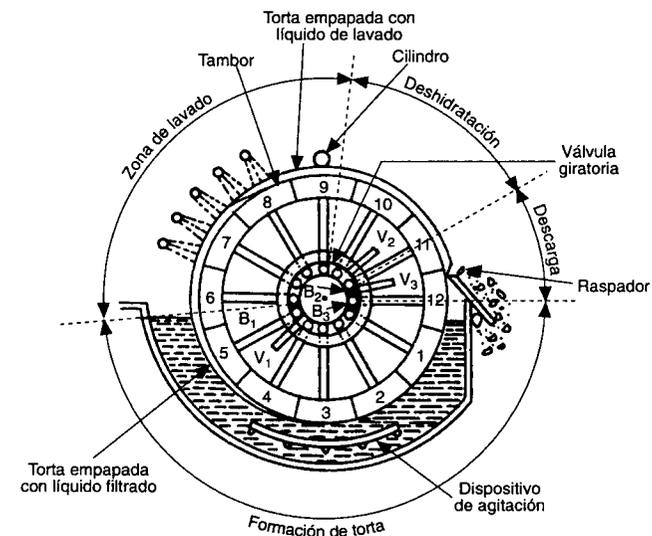
El proceso consiste en la disposición de los lodos a deshidratar sobre una superficie suficiente, para que el grosor de la capa esté en torno a 20-25 cm, dejándolos secar. Éste es un proceso simple y de bajo coste, debido a la prácticamente nula necesidad de equipos mecánicos. Se utiliza

fundamentalmente en pequeñas plantas depuradoras, ya que para plantas de gran tamaño sería necesaria una superficie muy extensa, suponiendo unos costes de inversión elevados.

Uno de los problemas adicionales que supone la utilización de eras de secado para la distribución del fango es la posibilidad de que puedan producirse malos olores cuando el fango no se encuentre perfectamente estabilizado.

2. Filtros de vacío

La filtración por vacío es uno de los métodos mecánicos de deshidratación más utilizados. La filtración se realiza mediante tambores cilíndricos rotativos, recubiertos por una tela metálica o de fibras, las cuales se sumergen parcialmente en el fango y giran a baja velocidad. En la parte interior del tambor se realiza la succión del agua, haciéndola pasar a través del filtro. La torta de fango adherida a la tela se elimina mediante un rascador para su almacenamiento posterior.

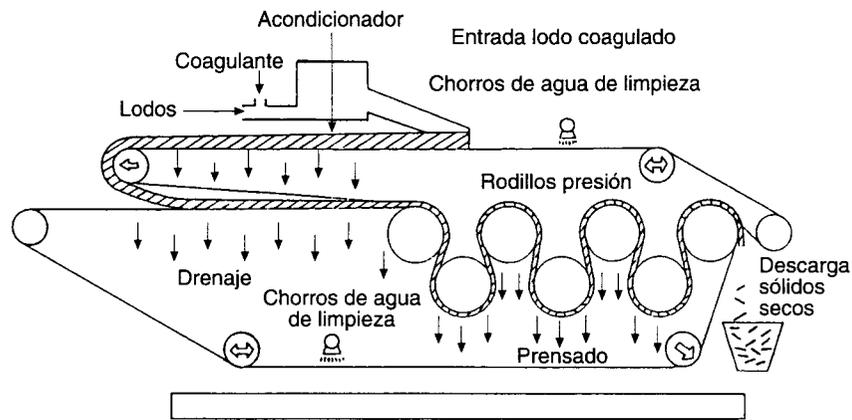


Filtro de vacío
(Díaz, 1988)

3. Filtros banda

Los filtros banda se fundamentan en un proceso mecánico de presión. En este tipo de filtros el fango pasa a través de dos cintas de tela conducida por rodillos que presan el fango con el fin de reducir su humedad.

Los filtros banda presentan ventajas considerables frente a las centrifugas, que se verán más adelante, y la filtración por vacío, como son el ahorro de energía, el sencillo y bajo mantenimiento, además de un rendimiento generalmente superior, consiguiendo una sequedad del fango elevada.

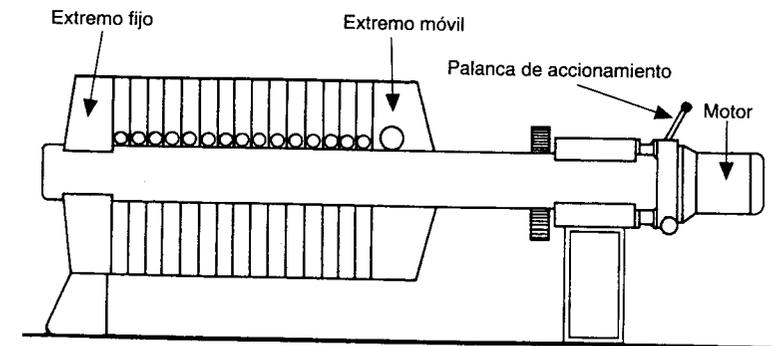


**Tipo de filtro banda
(Hernández (1), 1990)**

4. Filtros prensa

Los filtros prensa constan de una serie de placas paralelas entre las que se dispone el fango. Mediante sistemas hidráulicos o mecánicos se efectúa la unión y presión entre placas, produciendo la deshidratación del fango.

Los filtros prensa son los sistemas en los que mejor sequedad del fango puede obtenerse, alcanzándose en ocasiones sequedad del 45 %.



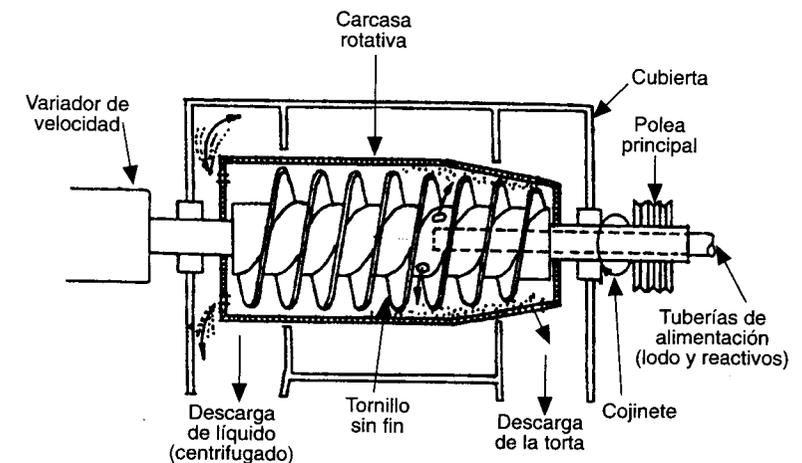
**Filtro prensa. Accionamiento hidráulico
(Hernández (1), 1990)**

5. Centrifugas

La filtración centrífuga se fundamenta en la fuerza del mismo nombre, consiguiendo la separación del agua del fango. Este proceso también se utiliza en la industria para la separación de líquidos o sólidos de diferente densidad.

La sequedad del fango conseguida mediante centrifugado es similar a la de los filtros de vacío y filtros banda.

Se muestra a continuación uno de los tipos de centrifuga.



Centrifuga de tornillo sin fin (Díaz, 1988)

Esquema básico de un sistema de depuración de aguas residuales urbanas

Para conseguir adecuar el agua residual a la calidad requerida para su vertido o reutilización será necesario, en la mayor parte de los casos, el diseño de una planta depuradora que combine los diversos tratamientos anteriormente indicados. A continuación se muestra un esquema básico de los diferentes procesos de tratamiento que constituyen una planta de depuración de aguas residuales urbanas.

Dentro de una estación depuradora se pueden distinguir dos líneas de tratamiento:

- Línea de agua: en ella se lleva a cabo una eliminación de los compuestos contaminantes presentes en el agua.
- Línea de fango: donde se tratan los residuos originados como consecuencia del funcionamiento de la línea de agua (fangos), con el fin de optimizar su manejo y destino final.

Las líneas de tratamiento, mencionadas anteriormente, se componen a su vez de diferentes fases, que se detallan a continuación.

- Línea de agua.
 - Pretratamiento.
 - Tratamiento primario.
 - Tratamiento secundario.
 - Tratamiento terciario.
- Línea de fango.
 - Espesamiento.
 - Estabilización.
 - Acondicionamiento.
 - Deshidratación.

Línea de agua

1. Pretratamiento

El pretratamiento se compone generalmente de diversas operaciones físicas y mecánicas mediante las cuales se eliminan las sustancias que por

su naturaleza o tamaño podrían originar problemas en los tratamientos posteriores (sólidos gruesos, arenas, grasas, etc.).

2. Tratamiento primario

El objetivo de esta etapa de tratamiento es la reducción de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual. Dichos sólidos estarán constituidos en parte por materia orgánica, por lo que durante esta etapa suele producirse una reducción de la demanda de oxígeno. Con este objetivo se pueden incluir dentro de la etapa de tratamiento primario diversos procesos como: filtración, tamizado, sedimentación, flotación. Como complemento al proceso de separación sólido-líquido que se elija en cada caso como tratamiento primario, y con el fin de mejorar el rendimiento de eliminación de sólidos en suspensión, puede llevarse a cabo además un proceso de floculación o coagulación.

Los rendimientos de eliminación de la demanda biológica de oxígeno y la materia en suspensión durante el tratamiento primario, dependerán del tipo de proceso elegido para esta etapa. Como ejemplo podemos señalar que mediante una decantación primaria se puede producir la eliminación del 30-35 % de la DBO₅ y el 60-65 % de los sólidos en suspensión.

3. Tratamiento secundario

Durante esta etapa se produce la eliminación de la contaminación orgánica presente en el agua residual mediante la aplicación de alguno de los procesos biológicos descritos con anterioridad. El porcentaje de contaminación orgánica extraído dependerá entre otras cosas del proceso utilizado; así, mediante los fangos activos, la disminución de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) se sitúa normalmente entre el 80 y el 95 %, según el tipo de aireación que se lleve a cabo. Son porcentajes de eliminación similares a los obtenidos para los sólidos en suspensión, utilizando este mismo tipo de proceso biológico. En el caso de los filtros biológicos, los rangos de reducción habituales para DBO₅ y los sólidos en suspensión son de 70-90 % y 80-90 % respectivamente, mientras que con los biodiscos pueden alcanzarse rendimientos superiores, similares a los obtenidos con un proceso de fangos activos.

4. Tratamiento terciario

En algunos casos, debido bien a una elevada calidad exigida en el efluente final de la planta o bien a una alta carga contaminante en el influente de la misma, no es posible conseguir una correcta depuración utilizando únicamente las etapas de depuración anteriormente indicadas, por lo que es necesario incluir procesos adicionales de afino. Algunos de

los complementarios que pueden aplicarse son: filtración, coagulación, nitrificación y desnitrificación, adsorción, cambio iónico, etc.

Línea de fangos

1. Espesamiento

El objetivo de esta etapa es la concentración de los fangos mediante la eliminación de agua. Los sistemas de espesamiento más importantes son el de gravedad y la flotación, expuestos anteriormente.

2. Estabilización

Como ya se ha indicado, la estabilización consiste en la destrucción de la materia orgánica presente en fango cuya descomposición se produce rápidamente, provocando la emisión de malos olores. La estabilización puede hacerse por digestión aerobia, de forma similar al tratamiento por fangos activados, o anaeróbicamente.

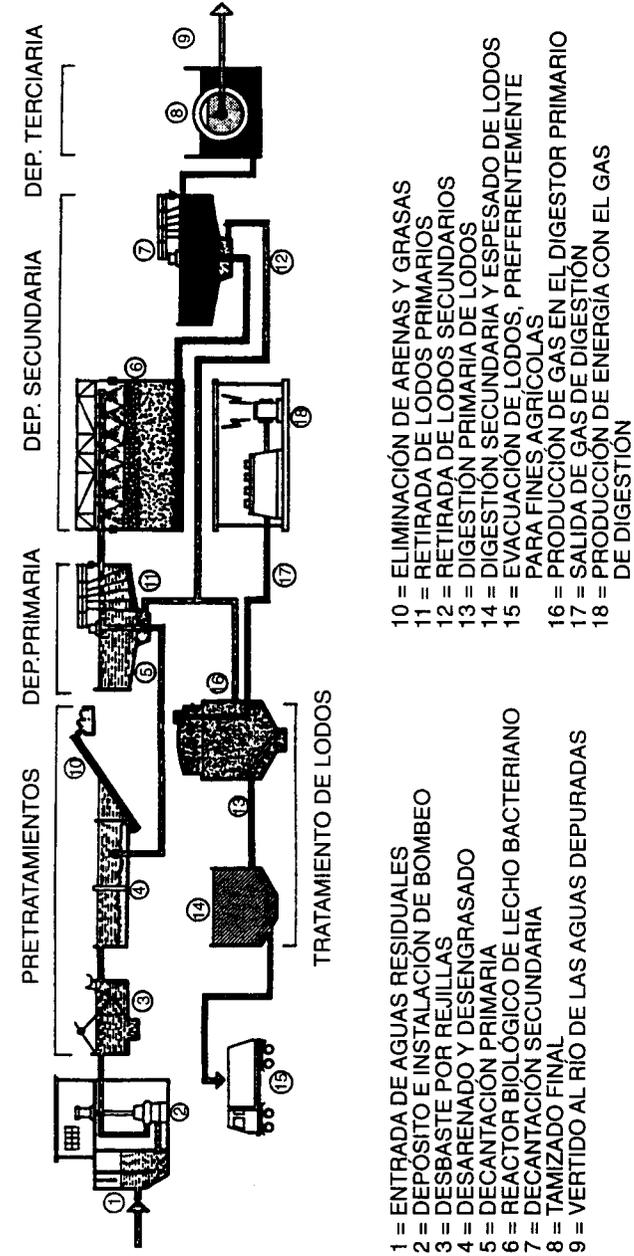
3. Acondicionamiento

El objetivo de esta fase es conseguir una mayor eficacia en las etapas posteriores, mediante la adición de reactivos que provocan la formación de flóculos en el fango, facilitando la eliminación del agua.

4. Deshidratación

Como último tratamiento, antes de proceder a la evacuación final del fango, se efectúa la deshidratación del mismo, haciéndolo más fácilmente transportable como consecuencia de la eliminación de humedad, y por tanto de peso y volumen. Los equipos de deshidratación más importantes, como ya se ha indicado, son los filtros por vacío, filtros banda, centrifugas y eras de secado, pudiéndose conseguir una sequedad de la torta en torno al 20-25 % con los tres primeros, y de hasta el 45 % mediante la utilización de un filtro prensa.

A continuación se muestra en esquema el modelo básico de una planta de depuración de aguas residuales, según lo expuesto anteriormente.



Esquema de una depuradora convencional (Hernández (1), 1990)

RESUMEN DE RENDIMIENTOS

Línea de agua	% Eliminación	
	Sólidos en suspensión	DBO ₅
Tratamiento PRIMARIO		
• Decantación.	60-65	30-35
• Decantación después de floculación	90	70
Tratamiento SECUNDARIO		
• Fangos activos.	80-95	80-95
• Filtros biológicos.	80-90	70-90
• Biodiscos.	85-95	80-90
• Lagunaje.		40-90
• Filtros verdes.	100	100
Línea de fango	Sequedad del fango (%)	
Filtros de vacío	20-25	
Centrífugas	20-25	
Filtros banda	20-25	
Filtros prensa	38-45	

Sectores industriales: caracterización y depuración

En este apartado se comentan las características generales y los sistemas de depuración empleados en los diferentes sectores industriales.

Industrias agrícolas y alimentarias

Las aguas residuales de la industria alimentaria se caracterizan por una contaminación esencialmente orgánica, biodegradable y por una tendencia general hacia la acidificación y rápida fermentación. Su tratamiento fundamental es biológico, utilizándose en la mayor parte de los casos un proceso de fangos activados. Eventualmente se lleva a cabo la reducción del dimensionamiento del reactor biológico mediante la instalación previa de un filtro precolador.

Industrias de la pasta de papel

En estas fábricas, debido al gran caudal de agua residual producido y a la elevada contaminación insoluble de la misma (fibras perdidas durante el proceso de fabricación, productos empleados), se aconseja la utilización de procedimientos de depuración físico-químicos que permitan reutilizar el agua en la instalación, lo que supondría para la empresa un importante ahorro. La floculación, seguida de una separación por decantación o flotación, es el sistema más empleado. Actualmente, debido sobre todo a la utilización de papel recuperado como materia prima, se ha producido un aumento de la materia orgánica disuelta en el efluente residual, por lo que en algunas papeleras se está realizando la depuración por el proceso de fangos activos.

Industrias textiles

La industria textil comprende, esencialmente, dos tipos de actividad: la actividad mecánica (hilatura, tejido) y el acabado textil (operaciones de blanqueo, tinte, impresión y apresto). Las operaciones de acabado son generalmente las más contaminantes, produciendo unos vertidos caracterizados por: colorantes, ácidos orgánicos, álcalis, oxidantes, reductores, emulsionantes, etc. En la mayoría de los casos, es necesario un desbaste fino y, eventualmente, unas etapas de desaceitado, desengrase, desarenado y, obligatoriamente, un depósito de homogeneización.

A continuación, debe elegirse uno de los tres tipos de procedimientos siguientes:

- Tratamiento fisicoquímico compuesto por neutralización, coagulación, floculación y decantación.
- Tratamiento biológico por fangos activados o en lagunas aireadas.
- Tratamiento de afino para eliminar el color y la DQO residual, el mejor procedimiento sigue siendo la adsorción en carbón activado.

Industria del petróleo

Los vertidos específicos de la industria del petróleo se caracterizan por una contaminación constituida principalmente por hidrocarburos, a la que se añaden otros compuestos de naturaleza muy variada como son:

materias orgánicas (fenoles, ácidos sulfónicos, etc.), compuestos sulfurosos (sulfuros, mercaptanos, tiosulfatos, etc.), materias en suspensión (arenas, brea de coque, catalizadores).

El desaceitado para la eliminación de los hidrocarburos puede realizarse en dos fases. Una primera de separación por gravedad, seguida de una flotación como fase de afino. La depuración biológica sólo podrá efectuarse una vez que el efluente está totalmente desaceitado, exento de sulfuros y metales pesados.

Industria química de síntesis

La industria química orgánica de síntesis es muy compleja y diversa. A partir de productos simples, obtenidos por destilación de la hulla o del petróleo, tales como etileno, propileno, benceno, tolueno, fenol, formol, etc., se llega a la producción de monómeros y después de plásticos y plastificantes, agentes tensoactivos, pinturas, barnices, disolventes, adhesivos, resinas, látex, productos cosméticos y farmacéuticos, etc.

Las operaciones elementales, con frecuencia discontinuas, son muy numerosas: oxidación, hidrogenación, deshidrogenación, alquilación, sulfonación, aminación, polimerización. En ellas intervienen catalizadores orgánicos y metálicos, se realizan a veces en presencia de fuertes concentraciones salinas y utilizan compuestos sulfurados que pueden dar lugar a la producción de sulfuros, sulfitos o mercaptanos.

Van seguidas de separaciones y de diversas operaciones de purificación, tales como precipitación, lavado, escurrido, etc., en la mayoría de los casos efectuadas en medio acuoso, que tienen por objeto separar el producto terminado y que vierten al desagüe el exceso de reactivos primarios y los compuestos intermedios no deseables. Estas operaciones, juntamente con los lavados de aparatos, normalmente dan origen a las aguas residuales más concentradas.

Teniendo en cuenta la complejidad y la variabilidad de estos fluentes, el tratamiento de depuración será diferente según la actividad industrial desarrollada.

Industria metalúrgica y derivadas

Las aguas residuales en esta industria, que recircula la mayor parte de sus aguas, corresponden a las aguas amoniacaes de coquería, las purgas

de los circuitos de lavado de gases de altos hornos y de convertidores de oxígeno y los efluentes de laminación en frío.

- Aguas amoniacaes de coquería: están constituidas por el agua del carbón y las aguas de lavado de gases procedentes, sobre todo, de una aportación de agua desendurecida. El tratamiento consiste en la eliminación de alquitranes de las aguas amoniacaes, por decantación y/o filtración, *stripping* del amoníaco volátil, depuración biológica, en general, por fangos activados en una o dos etapas y tratamiento terciario de clarificación con adsorción eventual de la DQO residual, a través de carbón activo.

- Purgas de los circuitos de lavado de gases de altos hornos: su tratamiento consiste en la precipitación de metales por alcalinización, la formación de complejos de cianuros por adición de sales ferrosas o su oxidación mediante compuestos peroxigenados y la eliminación del amoníaco por nitrificación biológica, o, eventualmente, por *stripping*.

- Purgas de los circuitos de lavado de los gases de convertidores de oxígeno: pueden contener fluoruros, que deben precipitarse mediante la adición de cal.

- Efluentes de laminación en frío. Comprenden principalmente: las aguas ácidas de aclarado, después de un decajado sulfúrico, clorhídrico o nítrico, que se tratan por neutralización, oxidación con aire y precipitación del hierro en forma férrica; las aguas de pasivación crómica, que a veces se añaden a las anteriores y que se desmineralizan mediante intercambio iónico, con vistas a su recirculación; las aguas de desengrase electrolítico, que presentan valores elevados de DQO y que pueden tratarse en circuito abierto, por coagulación y flotación.

Consideración administrativa de los vertidos

Los aspectos administrativos que regulan el tratamiento de los vertidos se incluyen en el Capítulo II del Título V de la Ley de Aguas y en el propio Título VI de dicha Ley sobre el régimen económico-financiero de la utilización del dominio público hidráulico.

Estos Títulos son desarrollados detalladamente en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

Los trámites para la obtención de la oportuna autorización administrativa se describen en los textos citados, por lo que sólo se comentarán algunos de los aspectos más relevantes.

En primer lugar, conviene señalar el que a estas disposiciones legales no les ha pasado desapercibida la posible afección del vertido, por infiltración, a las aguas subterráneas. Para ello, y cuando concurra presumiblemente dicha circunstancia, se exigirá el oportuno estudio hidrológico que determine el riesgo y nivel de influencia de los agentes contaminantes sobre la calidad del agua.

En su caso, y cuando las actividades superficiales puedan comprometer la calidad de las aguas subterráneas de un determinado acuífero, en función del uso que se realice de las mismas puede establecerse el oportuno perímetro de protección.

Asimismo, se establecen limitaciones cuantitativas y cualitativas de los vertidos con indicaciones específicas para las sustancias contaminantes. Es decir, de alguna manera la normativa legal vigente sigue recogiendo la forma tradicional de abordar el problema mediante normas de emisión.

En particular, las autorizaciones de vertidos que pueden incluir sustancias nocivas deben formularse de acuerdo con las previsiones realizadas por los Planes Hidrológicos de cuenca para reducción de la contaminación.

Especial atención merece el artículo 105 de la Ley de Aguas, por el que se establece un canon de vertido destinado a la protección y mejora del medio receptor de cada cuenca hidrográfica.

El importe del mismo es proporcional a la carga contaminante, medida en unidades de contaminación. Esta unidad de contaminación se establece convencionalmente como la producida por el vertido tipo de aguas domésticas correspondientes a mil habitantes y al período de un año. El valor que se asigne a la unidad de contaminación puede ser diferente para los distintos ríos, de acuerdo con las previsiones de los Planes Hidrológicos con respecto a la calidad de las aguas continentales.

Este tipo de exacción, finalista por dirigirse su recaudación a cubrir un objetivo concreto, pretende, asimismo, tener un efecto disuasorio, es decir, que pueda resultar más ventajoso para el causante del vertido depurar más sus efluentes, pues el incremento de coste que ello suponga podría verse paliado con un canon de vertido mucho más bajo al contener éste una reducida carga contaminante.

Por último, nuestro actual marco legal hidráulico en relación con los vertidos incorpora los elementos necesarios para su adecuación a la normativa de la Unión Europea, lo que probablemente exigirá nuevas modificaciones en el futuro.

TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

En este apartado se estudiarán, por un lado, los distintos métodos de tratamiento de los residuos, y, por otro, el tratamiento y control de la contaminación de suelos.

Aunque algunos suelos contaminados podrían ser considerados como residuos, las técnicas de tratamiento, en la mayoría de las ocasiones, son diferentes.

Control de la contaminación de los suelos

Se puede definir el tratamiento y recuperación de suelos contaminados como un conjunto de operaciones que se deben realizar con el objetivo de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes y sus efectos.

Ante la presencia de un espacio contaminado se plantea la cuestión de si es necesaria su recuperación, y en este caso determinar hasta qué nivel. Para ello, se realiza un estudio de viabilidad en el que, en función del estudio de caracterización del espacio contaminado y del análisis de riesgos, se ponderen las alternativas de tratamiento y los costes económicos, a fin de obtener el diseño correcto óptimo y su efectiva implementación.

Una de las posibles divisiones de los sistemas de tratamiento se establece en función de tres categorías de actuación:

- No recuperación.
- Contención o aislamiento de la contaminación.
- Recuperación.

Cuando se opta por la medida de no recuperación del espacio, se debe tener en cuenta que se parte de un espacio contaminado, aunque el estudio de viabilidad determine esa opción. Así pues, se tiene que registrar la localización real del espacio.

Esta sencilla solución evita una gama de problemas importantes, generados *a posteriori*, por un uso del suelo para el que ya no es adecuado (agricultura, residencial, espacios de ocio, etc.).