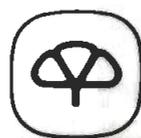


Manual
de
Contaminación
Ambiental



fundación
MAPFRE

ITSEMAP AMBIENTAL

N. 21534

R. 30232

Manual
de
Contaminación
Ambiental



fundación
MAPFRE

ITSEMAP AMBIENTAL

FONDO DONADO POR D. JULIO CASTEJO

"Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares con ella mediante alquiler o préstamo públicos."

© 1994, ITSEMAP Ambiental

© 1994, Fundación MAPFRE

© 1994, Editorial MAPFRE, S.A.
P.º de Recoletos, 25
28004 MADRID

I.S.B.N.: 84-7100-957-9
Depósito legal: M. 39.136/1994

Fotocomposición e impresión: Fernández Ciudad, S.L.

Impreso en España
Printed in Spain

ÍNDICE

	<i>Pág.</i>
Prólogo	XI
Introducción	XIII

PRIMERA PARTE DESCRIPTIVA

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	3
Capítulo 2. APROXIMACIÓN HISTÓRICA	5
Capítulo 3. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	7
Capítulo 4. MEDIOS RECEPTORES DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	11
La atmósfera	11
El agua	17
El suelo y las aguas subterráneas	21
Capítulo 5. AGENTES CONTAMINANTES	31
Contaminantes de la atmósfera	31
Contaminantes del agua	56
Contaminantes de los suelos	77
Capítulo 6. ORÍGENES DE LA CONTAMINACIÓN	92
Fuentes de contaminación de la atmósfera	92
Fuentes de contaminación del agua	108
Fuentes de contaminación de los suelos	117

	<u>Pág</u>
Capítulo 7. TRANSPORTE Y DISPERSION DE LOS CONTAMINANTES.....	137
Transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera.....	137
Transporte y dispersión de los contaminantes en el agua.....	151
Transporte y dispersión de los contaminantes en el suelo.....	162
Capítulo 8. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES.....	169
Efectos de la contaminación de la atmósfera.....	169
Efectos de la contaminación de las aguas.....	189
Efectos de la contaminación de los suelos.....	194

SEGUNDA PARTE

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN: PREVENCIÓN
Y CORRECCIÓN

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	199
Capítulo 2. MINIMIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS RESIDUALES.....	203
Técnicas de minimización de residuos.....	205
Desarrollo e implantación de un plan de minimización de residuos en la empresa.....	216
Capítulo 3. TRATAMIENTO Y CORRECCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN...	221
Control de la contaminación de la atmósfera.....	221
Control de la contaminación de las aguas.....	253
Tratamiento de los residuos y control de la contaminación de los suelos.....	293

TERCERA PARTE

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	341
Capítulo 2. TÉCNICAS Y MÉTODOS DE MUESTREO.....	343
Muestreo en atmósfera.....	344

	<u>Pág.</u>
Muestreo en aguas	360
Muestreo en suelos	369
Muestreo de residuos	372
Capítulo 3. TÉCNICAS Y MÉTODOS ANALÍTICOS	379
Clasificación de técnicas analíticas usadas más frecuentemente en el medio ambiente	379
Métodos analíticos específicos	405

CUARTA PARTE

GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE EN LA INDUSTRIA

Capítulo 1. PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO EN LA FASE DE PRO- YECTO	467
Capítulo 2. MEDIO AMBIENTE Y GESTIÓN EMPRESARIAL.....	471
Desarrollo sostenible y tecnología	471
El papel de la industria	473
La respuesta de la industria	474
Capítulo 3. INVESTIGACIONES AMBIENTALES EN LA INDUSTRIA.....	483
Estudio	484
Auditoría	484
Evaluación	485
Diagnóstico o inspección	485

QUINTA PARTE

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	491
Capítulo 2. MARCO LEGAL	493
Legislación de ámbito estatal	493
Legislación de las comunidades autónomas	495
Avances normativos	497
Capítulo 3. METODOLOGÍA DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIEN- TAL	499
Descripción y análisis del proyecto	500

	<u>Pág.</u>
Estudio del medio	502
Identificación y valoración de impactos	504
Medidas correctoras	508
Valoración de impactos residuales.....	508
Programa de vigilancia ambiental	509

SEXTA PARTE

AUDITORÍAS AMBIENTALES

Capítulo 1. ANTECEDENTES Y DEFINICIÓN DE LAS AUDITORÍAS DE GESTIÓN AMBIENTAL	513
Capítulo 2. AUDITORÍAS AMBIENTALES	517
Tipos de auditorías ambientales.....	517
¿De quién debe partir la iniciativa de realización de una auditoría ambiental?.....	518
Beneficios de una auditoría ambiental	519
Composición del equipo auditor	521
Factores de riesgo a investigar en una auditoría ambiental	521
Contenido y metodología de una auditoría ambiental.....	521
Evolución a corto plazo de la implantación de la realización de auditorías en el sector industrial.....	523

SÉPTIMA PARTE

PREVISIÓN DE LAS CONSECUENCIAS AMBIENTALES DE ACCIDENTES MAYORES

Capítulo 1. TRATAMIENTO DE LA PREVISIÓN DE LAS CONSECUENCIAS AMBIENTALES DE ACCIDENTES MAYORES	535
Introducción	535
¿Qué es un accidente mayor para el medio ambiente?.....	537

	<u>Pág.</u>
Causas y consecuencias de accidentes mayores..	539
Impacto ambiental de los accidentes mayores....	540
Mitigación de efectos y descontaminación (<i>clean-up</i>).....	543
Conclusiones	544

APÉNDICES

Apéndice A. LEGISLACIÓN AMBIENTAL.....	549
Apéndice B. FUENTES CONSULTADAS.....	569

PRÓLOGO

El presente texto es una nueva aportación a la colección de publicaciones que Fundación MAPFRE está desarrollando, tratando de cubrir progresivamente todas las áreas de la seguridad integral.

La génesis del libro comenzó con el proyecto de realizar un manual de medio ambiente. Pronto nos dimos cuenta de lo excesivamente ambicioso de tal idea y comprendimos que era necesario fragmentar el proyecto, dada su enorme amplitud y filosofía medioambiental. De este modo, para ser consecuentes con la línea preestablecida, decidimos ceñirnos al entorno como receptor de impactos vía agentes contaminantes, independientemente de sus características físicas, químicas o biológicas. Es decir, estábamos hablando de «contaminación».

A pesar de ello, son numerosos los agentes capaces de generar algún tipo de contaminación y nos veíamos obligados a centrarnos en algún grupo más concreto. Así pues, y para ser coherentes con el concepto de seguridad integral, nos hemos inclinado en esta primera etapa por abordar de manera más específica los problemas del medio ambiente industrial y, en definitiva, la gestión medioambiental en la empresa.

Estos temas, a los que se dedican los capítulos finales del texto, carecerían de sentido metodológico, si antes no se tratan de modo descriptivo todas las variables ambientales que es necesario conocer y evaluar para poder establecer estrategias y políticas ambientales en la empresa.

Esta primera parte, de carácter descriptivo, se aborda de una manera novedosa, de modo que el entorno, los agentes contaminantes, los focos, los mecanismos de transportes y los efectos se desarrollan de acuerdo con un esquema funcional y eminentemente didáctico. Este enfoque sustituye al más tradicional, basado en el desarrollo sectorial del medio ambiente (aguas, atmósfera, suelo, etc.), que, aunque más fácil de elaborar, pierde valor cuando se trata de plantear modelos de gestión ambiental o simplemente jerarquizar la toma de decisiones sobre prevención y corrección de la contaminación.

No en vano, en el presente manual se ha recogido la experiencia formativa y divulgativa del equipo técnico de ITSEMAP Ambiental, redactor del texto, al que agradecemos el esfuerzo realizado y la profesionalidad aportada.

A pesar del volumen del libro, somos conscientes de la necesidad de un mayor espacio para tratar exhaustivamente todos los aspectos técnicos recogidos. Por ello hay que considerarlo como una primera aproximación al hecho ambiental.

Fundación MAPFRE al patrocinar la edición de este manual espera transmitir de una forma sencilla el conjunto de problemas del medio ambiente y sus repercusiones desde un punto de vista industrial, aportando ideas y alternativas de solución genéricas que sirvan de base para el inicio de otras más sofisticadas y específicas.

CARLOS ÁLVAREZ JIMÉNEZ
Presidente de Fundación MAPFRE

INTRODUCCIÓN

Hemos pensado siempre que los grandes cambios acaecidos durante la historia de la humanidad han sido provocados por motivos políticos y económicos. Poco a poco vamos sabiendo que detrás de esos motivos existían respuestas drásticas del sistema planetario para recuperar un equilibrio dañado, tomando forma de grandes catástrofes naturales, bruscos cambios climatológicos, etc. El progresivo alejamiento del sector primario ha hecho olvidar al hombre actual su total dependencia de los recursos naturales.

Los graves problemas de ámbito global como el efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono o la superpoblación pueden ocasionar catástrofes que deriven en gravísimos problemas de índole política, social y económica. La historia se puede volver a repetir.

No se trata de paralizar la actividad humana. El hombre ha impactado en su entorno desde el mismo momento de su aparición en escena. Pero ese impacto debe ser absorbible por el medio, permitiendo que el equilibrio se restablezca. La visión global que se propone permite ver que el camino que lleva el hombre del siglo xx es el de la irreversibilidad, el de la consecución en el mínimo tiempo de la máxima entropía.

Los actuales avances tecnológicos y el bagaje cultural e histórico que poseemos no deben permitir que en unas decenas de años desaparezca aquello que ha tardado millones de años en crearse y que el propio hombre no ha conseguido destrozarse en decenas de miles de años.

PRÓLOGO

El presente texto es una nueva aportación a la colección de publicaciones que Fundación MAPFRE está desarrollando, tratando de cubrir progresivamente todas las áreas de la seguridad integral.

La génesis del libro comenzó con el proyecto de realizar un manual de medio ambiente. Pronto nos dimos cuenta de lo excesivamente ambicioso de tal idea y comprendimos que era necesario fragmentar el proyecto, dada su enorme amplitud y filosofía medioambiental. De este modo, para ser consecuentes con la línea preestablecida, decidimos ceñirnos al entorno como receptor de impactos vía agentes contaminantes, independientemente de sus características físicas, químicas o biológicas. Es decir, estábamos hablando de «contaminación».

A pesar de ello, son numerosos los agentes capaces de generar algún tipo de contaminación y nos veíamos obligados a centrarnos en algún grupo más concreto. Así pues, y para ser coherentes con el concepto de seguridad integral, nos hemos inclinado en esta primera etapa por abordar de manera más específica los problemas del medio ambiente industrial y, en definitiva, la gestión medioambiental en la empresa.

Estos temas, a los que se dedican los capítulos finales del texto, carecerían de sentido metodológico, si antes no se tratan de modo descriptivo todas las variables ambientales que es necesario conocer y evaluar para poder establecer estrategias y políticas ambientales en la empresa.

Esta primera parte, de carácter descriptivo, se aborda de una manera novedosa, de modo que el entorno, los agentes contaminantes, los focos, los mecanismos de transportes y los efectos se desarrollan de acuerdo con un esquema funcional y eminentemente didáctico. Este enfoque sustituye al más tradicional, basado en el desarrollo sectorial del medio ambiente (aguas, atmósfera, suelo, etc.), que, aunque más fácil de elaborar, pierde valor cuando se trata de plantear modelos de gestión ambiental o simplemente jerarquizar la toma de decisiones sobre prevención y corrección de la contaminación.

No en vano, en el presente manual se ha recogido la experiencia formativa y divulgativa del equipo técnico de ITSEMAP Ambiental, redactor del texto, al que agradecemos el esfuerzo realizado y la profesionalidad aportada.

A pesar del volumen del libro, somos conscientes de la necesidad de un mayor espacio para tratar exhaustivamente todos los aspectos técnicos recogidos. Por ello hay que considerarlo como una primera aproximación al hecho ambiental.

Fundación MAPFRE al patrocinar la edición de este manual espera transmitir de una forma sencilla el conjunto de problemas del medio ambiente y sus repercusiones desde un punto de vista industrial, aportando ideas y alternativas de solución genéricas que sirvan de base para el inicio de otras más sofisticadas y específicas.

CARLOS ÁLVAREZ JIMÉNEZ
Presidente de Fundación MAPFRE

INTRODUCCIÓN

Hemos pensado siempre que los grandes cambios acaecidos durante la historia de la humanidad han sido provocados por motivos políticos y económicos. Poco a poco vamos sabiendo que detrás de esos motivos existían respuestas drásticas del sistema planetario para recuperar un equilibrio dañado, tomando forma de grandes catástrofes naturales, bruscos cambios climatológicos, etc. El progresivo alejamiento del sector primario ha hecho olvidar al hombre actual su total dependencia de los recursos naturales.

Los graves problemas de ámbito global como el efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono o la superpoblación pueden ocasionar catástrofes que deriven en gravísimos problemas de índole política, social y económica. La historia se puede volver a repetir.

No se trata de paralizar la actividad humana. El hombre ha impactado en su entorno desde el mismo momento de su aparición en escena. Pero ese impacto debe ser absorbible por el medio, permitiendo que el equilibrio se restablezca. La visión global que se propone permite ver que el camino que lleva el hombre del siglo xx es el de la irreversibilidad, el de la consecución en el mínimo tiempo de la máxima entropía.

Los actuales avances tecnológicos y el bagaje cultural e histórico que poseemos no deben permitir que en unas decenas de años desaparezca aquello que ha tardado millones de años en crearse y que el propio hombre no ha conseguido destrozarse en decenas de miles de años.

Debemos ser conscientes de que no llegaremos a tener puntos de vista globales mientras no resolvamos los problemas que nos afectan de manera más directa e inmediata. Estos problemas tienen su solución, en la mayoría de los casos, en un mayor nivel de desarrollo, por lo que no hay que desvincular a la tecnología de las posibles soluciones de carácter global. Más bien al contrario, la tecnología debe ser el cauce que se ha de seguir para alcanzar un modelo de desarrollo compatible con el entorno.

Ésta ha sido la idea que ha guiado la elaboración del presente manual que, deliberadamente, se ha denominado de «contaminación ambiental». Conscientes de lo excesivamente ambicioso que puede resultar redactar un manual de medio ambiente, nos hemos ceñido al análisis de los problemas ambientales que genera el desarrollo, asumiendo, igualmente, que es el propio desarrollo, y a la postre la tecnología, lo que puede resolver dichos problemas, conjugando la obtención de mayores niveles de bienestar con impactos progresivamente menores sobre nuestro entorno.

El presente manual se ha estructurado conceptualmente en dos bloques. El primero intenta reflejar, en las tres primeras partes, la evolución temporal de cualquier episodio de contaminación, desde la descripción del agente causante hasta el control de la misma. El segundo bloque se ha dirigido a integrar todas las variables anteriores en la gestión industrial moderna, dedicando capítulos independientes a aquellos instrumentos de la gestión que se han considerado más importantes.

Este enfoque permitirá un mayor aprovechamiento didáctico del texto por ser más acorde con la realidad y, por otra parte, concuerda con los nuevos puntos de vista orientados a un tratamiento integrador de todas las variables ambientales.

Con este trabajo pretendemos contribuir a la puesta en práctica de los principios del desarrollo sostenible expuestos durante la cumbre de Río de 1992, y con ello hacer una pequeña aportación a que nuestro planeta continúe manteniendo las condiciones que permitan el desarrollo de la vida durante las generaciones venideras.

PRIMERA PARTE

DESCRIPTIVA

1

Introducción

Uno de los objetivos básicos del presente manual ha sido aportar una nueva forma de presentación de los problemas de la contaminación ambiental. Es en esta parte del libro, que atiende a la descripción de agentes y efectos, donde tal aportación es más evidente.

Se ha sustituido el tradicional enfoque sectorial basado en los problemas de agua, atmósfera, suelo, etc., por otro que, integrando a todos los medios, sea capaz de mantener una línea directriz basada en la relación causa-efecto. Ello no es fácil dada la fuerte especificidad de cada una de las áreas temáticas y su tradicional implantación de manera individualizada.

No obstante se ha realizado un esfuerzo por generalizar los aspectos referidos a agentes contaminantes, independientemente del medio en que intervienen, focos generadores, transporte o movimiento de los contaminantes en cualquier vector ambiental y efectos que producen sobre el entorno.

Con ello se pretende dar una visión más didáctica de la contaminación, facilitando los planteamientos integradores y, a la postre, la gestión ambiental más adecuada.

2

Aproximación histórica

El hombre, desde un principio, ha necesitado satisfacer sus necesidades primarias, y con ese objetivo ha utilizado los medios que la Naturaleza le ha ofrecido. Esta utilización ha supuesto una interacción con el medio y, en el mejor de los casos, una simple modificación de éste.

El Neolítico y, con él, la aparición de la agricultura, marcan el primer hito destacable en la historia del hombre con consecuencias importantes para el medio. Eliminó espacios forestales con el fin de incrementar la superficie disponible para tal fin, domesticó animales y se organizó socialmente formando poblados.

La Edad Media se caracterizó por una auténtica esquilmación de superficies arbóreas, con objeto de producir grandes cantidades de madera y utilizar las superficies libres para pastos.

Pero el gran cambio en la organización social vino de la mano de la revolución industrial iniciada en el siglo XVIII en Inglaterra, la cual produjo graves consecuencias por lo que respecta a la relación hombre-medio. En esta época, caracterizada por la aparición de nuevas técnicas de producción y comercio, se llegaron a explotar recursos hasta entonces impensables para el hombre.

Este desarrollo se vio acompañado de un gran incremento de la población y de una tendencia a la concentración de ésta en núcleos urbanos.

La reunión de todos estos factores dio lugar a un incremento en el consumo de energía y de materias primas, recursos, en una palabra, pensándose que éstos eran ilimitados.

Por otra parte hizo su aparición la *contaminación*, entendida ésta como la introducción de una serie de sustancias y/o energías en unas concentraciones tales que podían ocasionar, por un lado, daños directos a la salud humana y al medio y, por otro, efectos perjudiciales a largo plazo. Es decir, cualquier tipo de alteración respecto a «aquello» que sucede naturalmente. Efectos de este tipo se están comenzando a identificar en la actualidad.

En un principio, los efectos de esta contaminación se detectaron entre la población trabajadora, más directamente expuesta a los agentes contaminantes, por lo que es lógico que en primer lugar apareciera lo que se denomina «higiene industrial», preocupada por la prevención y corrección de los efectos derivados de la exposición a agentes químicos, físicos o biológicos.

Desde 1900, la población mundial se ha cuadruplicado; la economía mundial se ha multiplicado por 20 y el consumo de combustibles fósiles es hoy 30 veces mayor que entonces, siendo el factor de crecimiento de la producción industrial de 50. El 80 % de este incremento ha tenido lugar desde 1950.

Si representáramos cualquier tipo de indicador como los mencionados en función del tiempo, obtendríamos una curva de crecimiento exponencial. Es evidente que las alteraciones sobre el medio que ello produce son superiores en el período de un año de finales del siglo XX, que en decenas de miles de años anteriores. Esto es, a todas luces, insostenible durante unas decenas de años más.

Durante los últimos 30 años, el medio ambiente ha pasado de ser una moda o una forma de oposición a ciertos criterios excesivamente desarrollistas a una auténtica preocupación que se convierte en necesidad inmediata, si se proyecta nuestro ritmo actual de degradación a un plazo de tiempo no excesivamente largo.

La industria, principal artífice de nuestro desarrollo, se ha visto constantemente en el punto de mira de todos, como si fuera la única responsable del ritmo actual de deterioro ambiental.

No es cuestión de culpabilidades, es sólo una más de las actividades que causan un grave impacto sobre el medio. Lo que sí es cierto es que la industria sí posee la tecnología necesaria para minimizar esos impactos, y que su desarrollo futuro está vinculado directamente a integrar la componente ambiental en todas sus decisiones.

La industria puede provocar su segunda revolución si se convierte en el motor de este cambio estratégico.

3

Contaminación ambiental

De los diferentes planetas que componen nuestro sistema solar, sólo la Tierra reúne las condiciones necesarias para albergar y desarrollar la vida tal y como hoy la entendemos. Esta vida se encuentra organizada en niveles de complejidad creciente, desde el molecular hasta el de las comunidades de individuos.

Ninguno de estos niveles resulta estático; muy al contrario, son entidades en constante evolución, dotados de gran plasticidad y dinamismo. Motores de tal evolución son, de un lado, el material genético, inherente al concepto de la vida; y del otro la presión externa encarnada por un conjunto de factores bióticos y abióticos que actúan sobre aquél, determinando la forma y el desarrollo de los seres vivos. A este complejísimo conjunto de elementos es a lo que denominamos medio ambiente.

Del mismo modo que el entorno influye sobre los organismos y sus niveles de organización, la propia actividad de éstos influye sobre el medio que les rodea. Esta relación bidireccional se ajusta a un equilibrio dinámico que ha permitido, desde hace miles de millones de años, que la naturaleza exista y haya evolucionado hasta la diversidad de formas que hoy conocemos.

A nadie se le escapa que el estudio del medio ambiente en relación con los animales y plantas que pueblan nuestro planeta resulta fundamental para su mejor comprensión y conocimiento, y así lo prueba el he-

cho de que desde hace décadas diferentes disciplinas de la ciencia se han dedicado al mismo. Pero este objeto de investigación no sólo ha suscitado el interés de los estudiosos de las ciencias naturales.

En el reciente desarrollo de las ciencias sociales también cobran protagonismo primordial las variables medioambientales, tanto las de carácter estrictamente físico como las de tipo cultural y económico, pues todas ellas contribuyen a modelar y a determinar las vigentes cualidades sociales del mundo.

Hoy por hoy, la preocupación por lo ambiental, por el medio ambiente en definitiva, trasciende la esfera de lo estrictamente científico, habiéndose convertido en una prioridad política y social. La causa del fenómeno hay que buscarla en la degradación del entorno, tanto natural como urbano, debida a la actividad humana.

El equilibrio de esa relación bidireccional entre el organismo y el entorno se ha roto para el caso de nuestra especie. De entre las actividades que participan en la alteración de ese equilibrio destacan las desencadenantes de los procesos de contaminación. Si por contaminación entendemos «cualquier sustancia o forma de energía que altere el ambiente respecto a aquello que sucede naturalmente», descubriremos que, desde los tiempos de la revolución industrial, infinidad de actividades humanas son capaces de producirla.

Desempeña un papel destacado en este campo el auge del sector industrial. En el último siglo, el incremento cualitativo y cuantitativo de la actividad fabril ha sido espectacular. Gracias a los avances científicos y tecnológicos, la industria ha introducido importantes cantidades de compuestos y formas de energía, hasta el momento ajenos a la naturaleza, en todos los ecosistemas.

La situación ha llegado a tal punto que las autoridades de numerosos países, conscientes del daño que estas perturbaciones pueden ocasionar a las generaciones futuras, han apostado por un modelo de desarrollo económico diferente del tradicional. Un modelo respetuoso con el entorno y con los recursos no renovables, que se ha venido en llamar «desarrollo sostenible» y que, tal y como se define en el Informe Brundtland, es aquél capaz de incrementar la producción basándose en una reducción de su contenido energético y de materias primas.

Para hacer posible un desarrollo de este tipo es necesario un cambio de estrategia por parte del mundo industrial y empresarial. Dicho cambio implica pasar de la «corrección» de emisiones y residuos, como si estos fuesen «ajenos» al proceso de producción, a la «prevención» de dichas emisiones y residuos. No hay mejor tratamiento para un residuo que el no generarlo.

Hay que partir de la base de que el hombre ejerce un impacto sobre el medio por su simple presencia en él, y que su formación y concienciación a nivel global son los únicos medios para conseguir una integración lo más armoniosa posible con nuestro entorno.

Por otra parte, el medio tiene una gran capacidad de asimilación de estos impactos, y lo único que se nos pide es que no rebasemos esa elasticidad que nos ofrece, conduciéndola a lo que podría suponer una situación irreversible como consecuencia de nuestras agresiones.

4

Medios receptores de la contaminación ambiental

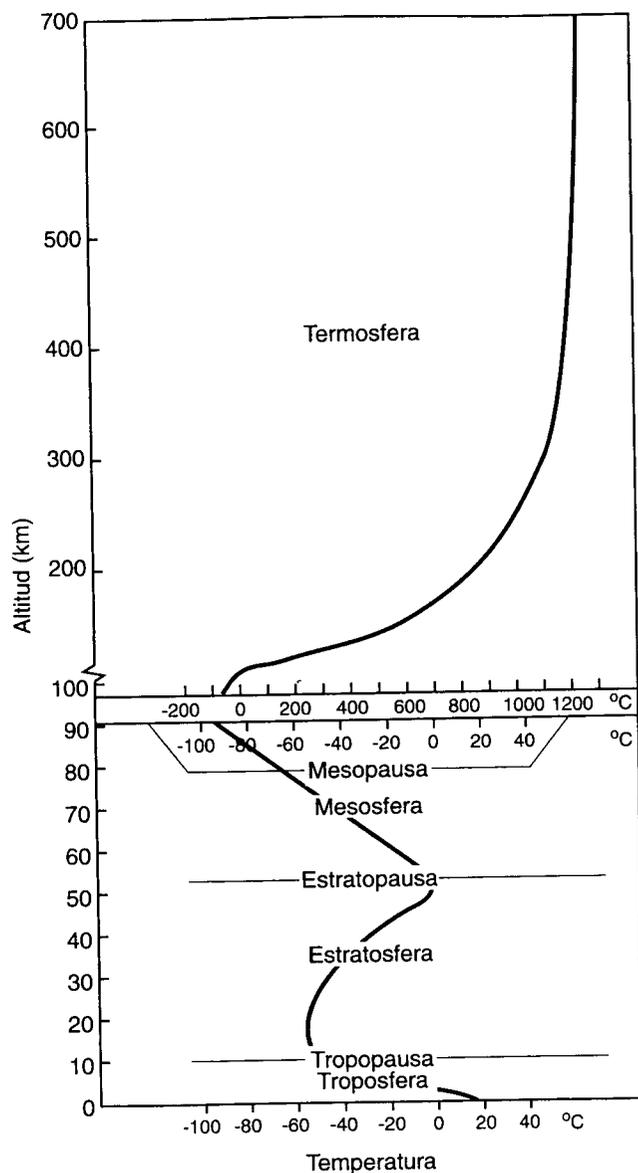
LA ATMÓSFERA

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea la Tierra, y constituye el principal modo de defensa de las diferentes formas de vida contra las radiaciones que provienen del espacio exterior, principalmente del Sol.

El espesor de la atmósfera alcanza aproximadamente unos 200 kilómetros, y se puede dividir, en función de sus propiedades térmicas, tal como se muestra en la siguiente figura.

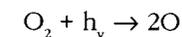
Según esta clasificación, se distinguen en la atmósfera las siguientes capas, desde la más alejada de la superficie terrestre a la más próxima: termosfera, mesosfera, estratosfera y troposfera. Las zonas en las que se produce el cambio de signo del gradiente de temperaturas se conocen como mesopausa, estratopausa y tropopausa, respectivamente.

Las fuentes de calor de la atmósfera son la radiación solar y la terrestre. La atmósfera es casi transparente a la radiación solar, por lo que el suelo absorbe gran parte de esta radiación. Una parte de la misma, no obstante, es absorbida por los componentes de la atmósfera, interviniendo en las reacciones fotoquímicas. Mediante estas reacciones es posible explicar el perfil de temperaturas de la atmósfera, dado que algunas de ellas son fuertemente exotérmicas.

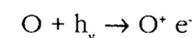


**Clasificación de las capas de la atmósfera
(Miller, 1966)**

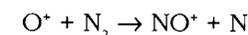
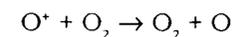
La *termosfera* es la capa de la atmósfera más alejada de la tierra. Se extiende a partir aproximadamente de los 90 kms. de altura. En esta capa, los fotones ultravioletas procedentes del sol, $h\nu$, y presentes a alturas de 100 kms. o más elevadas causan la fotodisociación del oxígeno molecular, según la siguiente reacción endotérmica:



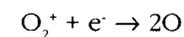
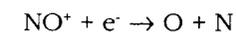
A alturas de 200 kms. o más, la concentración de oxígeno atómico es predominante en comparación con el oxígeno molecular, y es la fuente principal de partículas cargadas que se producen por fotoionización:



Los átomos de oxígeno cargados pueden intercambiar electrones con moléculas de oxígeno neutras o reaccionar con moléculas de N_2 neutras:

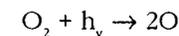


La primera de estas reacciones es fuertemente exotérmica, y contribuye parcialmente a las altas temperaturas de esta región. Otras reacciones exotérmicas son las siguientes:



Cuando la altura disminuye, la radiación solar ultravioleta se debilita y las reacciones de fotodisociación e ionización son relativamente menores en número. Al mismo tiempo, la concentración de electrones y la temperatura van disminuyendo hasta la mesopausa (80-90 kms).

La *mesosfera* se extiende entre los 50 y los 90 kms de altitud aproximadamente. En esta capa tienen lugar muchas reacciones químicas complejas, ya que la densidad ha aumentado a un nivel en que pueden ocurrir colisiones simultáneas de tres moléculas. La reacción de fotodisociación del oxígeno se produce como en la termosfera, pero a una velocidad menor:

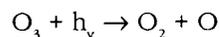
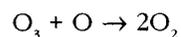


El oxígeno atómico puede colisionar con el oxígeno molecular y un tercer átomo (M), formándose ozono. Este último se necesita para redu-

cir el exceso de energía, y la ausencia del mismo a mayores alturas impide la formación de ozono según dicho mecanismo:



El ozono se descompone mediante las siguientes reacciones exotérmicas:



Tanto la formación de ozono como estas dos últimas reacciones, se dan a velocidades crecientes cuando la altura disminuye, debido al aumento de la densidad, la cual favorece la formación del ozono. La gran rapidez con que se realizan las reacciones exotérmicas ocasionan el aumento de la temperatura, con un incremento de la concentración de ozono cuando la altura disminuye hasta la estratopausa, aproximadamente a los 50 kms.

La *estratosfera* es la región de la atmósfera que se encuentra entre la tropopausa y la estratopausa, extendiéndose, por término medio, entre los 10 y los 45 kms. de altitud.

En la estratosfera, la radiación ultravioleta responsable de la fotodescomposición exotérmica del ozono se ha reducido a un punto en que la temperatura de nuevo empieza a descender con la disminución de la altura. La producción de ozono todavía es suficiente, ya que la densidad de gas aumenta. La concentración de ozono aumenta al disminuir la altura en parte gracias a que existe una menor velocidad de descomposición. La concentración de ozono llega a su valor máximo a unos 25-30 kms., y posteriormente disminuye, porque los fotones ultravioletas que son necesarios para la reacción de disociación del oxígeno han sido absorbidos a alturas mayores y, en consecuencia, la concentración de oxígeno atómico disminuye rápidamente. La formación de ozono debida a colisiones entre tres cuerpos se produce, por tanto, a escasa velocidad, y la concentración de ozono disminuye con la altura. La temperatura disminuye hasta que se alcanza la tropopausa a una altura que varía con la latitud y la estación del año, pero que se considera, de forma general, que se encuentra a unos 11 kms. de la superficie de la Tierra.

La *troposfera* es la capa más próxima a la Tierra y la más importante de la atmósfera, ya que en ella se desarrolla la vida.

En esta capa acaba la formación natural de ozono porque la radiación ultravioleta, responsable de la producción del oxígeno atómico, ha sido absorbida completamente en la mesosfera y en la estratosfera. Las reacciones de fotoionización no existen por las mismas razones.

La temperatura, que alcanza un mínimo en la tropopausa, evitando la pérdida del vapor de agua, aumenta continuamente en la troposfera al disminuir la altura. La temperatura de la atmósfera próxima a la superficie es sensiblemente igual a la temperatura de la tierra, que está controlada a su vez por los procesos de absorción y emisión de energía radiante, siendo esta zona donde se producen las variaciones más rápidas en el sentido vertical.

Composición del aire

La atmósfera es una mezcla de gases que no ejercen ninguna acción química entre sí. A esta mezcla de gases se le denomina *aire*. Si no se tienen en cuenta las partículas líquidas y sólidas de diferentes orígenes que aparecen en suspensión, queda una mezcla gaseosa con unos compuestos en concentraciones más o menos constantes, como el oxígeno, el nitrógeno, los gases nobles y otros variables, como el anhídrido carbónico, el vapor de agua, el ozono y también (en cantidades muy diversas y pequeñas, aunque a veces de efectos acusados) otros gases como el SO_2 , NO y NO_2 , CH_4 , NH_3 , etc.

El conjunto de gases denominados permanentes se conservan, por lo general, en proporción constante hasta una altura de unos 15 kms. como mínimo.

A continuación se detallan algunas de las características más importantes de los principales componentes variables.

Anhídrido carbónico

Su origen se encuentra en la respiración de los seres vivos y en la combustión. Desaparece fundamentalmente gracias a la acción clorofílica de las plantas y, en pequeña escala, por la fijación química al convertirse en carbonatos. El contenido de CO_2 en la atmósfera no alcanza el 0,3 %, variando de forma sensible de unas regiones a otras, siendo mínimo sobre los océanos (debido a que el dióxido de carbono es muy soluble en el agua). Los continentes son los grandes manantiales de este gas, a expensas del oxígeno, y los océanos los grandes sumideros.

COMPOSICIÓN DEL AIRE LIMPIO Y SECO

Componentes principales	Concentración % (porcentaje en volumen)
Nitrógeno (N ₂)	78,1
Oxígeno (O ₂)	20,9
Argón (Ar)	0,93
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,033
Componentes menores (1)	Concentración % (porcentaje en volumen)
Neón (Ne)	0,0018
Helio (He)	0,00052
Metano (CH ₄)	0,00015
Kriptón (Kr)	0,0001
Hidrógeno (H ₂)	0,00005
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,00002
Monóxido de carbono	0,00001
Xenón (Xe)	0,000008
Ozono (O ₃)	0,000002
Amoníaco (NH ₃)	0,0000006
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0,0000001
Óxido nítrico (NO)	0,00000006
Dióxido de azufre (SO ₂)	0,00000002

(1) Los porcentajes en volumen de los gases presentes en cantidades traza (menos del 0,0001 %) no se conocen con exactitud.

Fuente: Stocker y Seager, 1981.

Ozono O₃

El ozono es una variedad alotrópica del oxígeno y, como ya se ha comentado, se encuentra casi por completo localizado a una altura de entre 10 y 35 kms. Se origina al reaccionar la molécula de oxígeno con el átomo de este mismo gas, que a su vez se forma al incidir la luz solar de longitud de onda corta sobre la molécula de oxígeno, descomponiéndola en presencia de nitrógeno, que actúa como catalizador.

La destrucción se causa al absorber radiaciones específicas; se descompone siguiendo un camino inverso al de su formación.

Vapor de agua

El origen de su presencia en la atmósfera hay que buscarlo principalmente en la evaporación de las aguas continentales y marinas y en los fenómenos de evaporación y transpiración de los seres vivos. Su desaparición se produce por condensación y precipitación. En cuanto a su concentración en el aire, puede variar desde 0 a un 7 % en volumen. La cantidad de vapor que puede admitir el aire es limitado a una temperatura y presión dadas, pudiendo llegar a la saturación si alcanza el máximo posible.

Polvo atmosférico

El origen del polvo atmosférico es muy variado, pudiendo tener un origen natural o antropogénico.

Se encuentran en el aire partículas de muy distintos tamaños, desde partículas microscópicas, hasta granos de arena del orden de un milímetro de diámetro, que a no ser que sean arrastrados por fuertes vientos se depositan pronto en la tierra.

Desde el punto de vista químico, su naturaleza puede ser de tipo higroscópico o no. Las primeras facilitan la formación de nieblas y, entre éstas, tienen una especial relevancia los humos de origen industrial y urbano, a los que se puede atribuir a veces acusados cambios micro-climáticos.

EL AGUA

El agua, siendo la más común y familiar de las sustancias que se encuentran en la naturaleza, resulta ser, si se la observa atentamente, una sustancia extraordinaria, anómala en casi todas sus propiedades físico-químicas, y posiblemente la más compleja de todas las que están constituidas por un único compuesto químico.

La singularidad del agua radica, al parecer, en la facilidad con que sus moléculas forman grandes agregados tridimensionales cuando está en estado líquido. Esto la diferencia de los fluidos normales y explica los altos valores de viscosidad, tensión superficial y temperaturas de fusión y ebullición. Por analogía con el ácido sulfhídrico, que tiene una molécula químicamente similar a la del agua, ésta debería ser, a las temperaturas ordinarias, un gas en vez de un líquido.

Esta estructura molecular en forma de racimos, todavía no muy bien conocida, se debe a que los átomos de hidrógeno no están geométricamente alineados con el oxígeno central, sino que se encuentran plegados formando un ángulo de 105° , lo que da lugar a una dipolaridad y a enlaces de hidrógeno entre moléculas adyacentes.

La verdadera molécula de agua sería, pues $(H_2O)_n$, variando el valor de n con las condiciones de presión y temperatura.

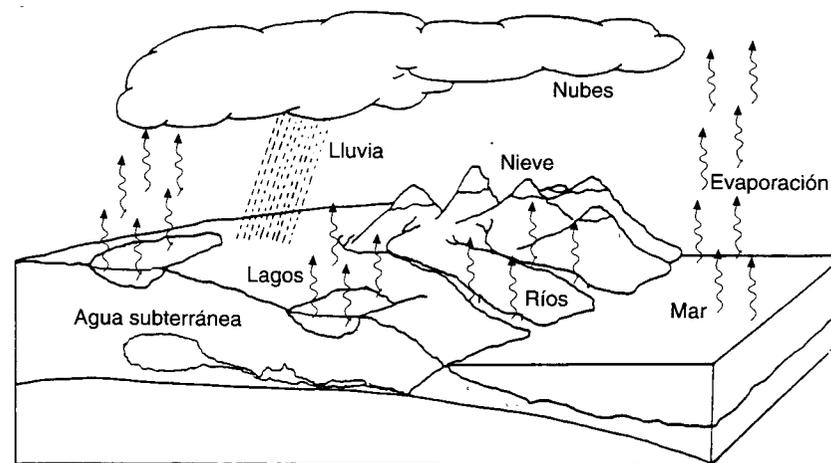
Conviene destacar que debido, al menos en parte, a la disposición espacial plegada de la molécula de agua, ésta tiene una gran capacidad de disolución, siendo esta propiedad, precisamente, la que hace más vulnerable su calidad.

Otra de las características singulares del agua es su gran estabilidad, incluso a altas temperaturas. A $2.700^\circ C$, únicamente el 11 % se disocia en moléculas de hidrógeno y de oxígeno. De esto se deriva que la cantidad total de agua en la tierra permanece constante durante largos períodos de tiempo, si bien su estado y situación varía, formando lo que se ha dado en llamar el ciclo hidrológico. En determinadas circunstancias el vapor de agua existente en la atmósfera se precipita en forma de lluvia o nieve. Parte del agua caída sobre la tierra se evapora directamente; otra parte, vuelve a la atmósfera a través de la evapotranspiración vegetal; el resto llega, por caminos más o menos complejos superficiales o subterráneos, al mar, donde, por evaporación, es restituida a la atmósfera, completándose así el ciclo.

Se clasifica la masa de agua terrestre en dos grandes subsistemas: superficiales (marinas y continentales) y subterráneas.

Las aguas subterráneas son las que se encuentran en las capas interiores de la tierra, en forma de corrientes o estancadas, constituyendo horizontes o capas acuíferas que afloran a la superficie de la tierra por fuentes o manantiales, o bien es extraída por medio de pozos. Las características físico-químicas del agua son constantes y dependen fundamentalmente de la naturaleza de las rocas que atraviesan. En general, no contienen materia viva. Serán comentadas con más detalle en el apartado siguiente.

Las aguas superficiales (mares, ríos, lagos, etc.) poseen una composición físico-química variable, dependiendo de factores geológicos, geográficos, climáticos y biológicos. Las aguas marinas poseen una composición bastante homogénea de los elementos mayoritarios (cloruro, sodio, sulfato, magnesio, etc.). En el seno de las aguas superficiales se desarrollan y viven un gran número de organismos que dependen del medio para su existencia. La gran accesibilidad de estas aguas para el hombre ha supuesto su mejor uso y, por consiguiente, es responsable de la calidad del agua.



Ciclo del agua

A lo largo del ciclo hidrológico, el agua, que al pasar a la atmósfera por evaporación es agua destilada de máxima pureza, se va cargando de otras sustancias que determinan, en el momento de su utilización, las características de calidad.

Aunque ya en la atmósfera el agua de lluvia recibe impurezas por gases, aerosoles, polvo y sales, si nos limitamos al ciclo natural, en el sentido de no considerar causas de contaminación debidas de una u otra forma a la actividad humana, la mayor parte de las impurezas provienen de las formaciones geológicas por las que discurre o en las que se almacena y que, en mayor o menor grado, va disolviendo. Por ello, la geología es un factor determinante de la composición del agua y, en definitiva, de su calidad natural.

Así, por una parte, el agua, de acuerdo con la litología de las formaciones geológicas con las que está en contacto, resulta ácida o alcalina, con alto o bajo contenido de sales disueltas, con preponderancia de carbonatos, sulfatos, cloruros, etc. Por otra parte, el contacto con formaciones minerales puede ser ocasión para que en el agua se encuentren determinados elementos como el hierro, manganeso, cobre o mercurio, cuya procedencia natural conviene conocer para diferenciarla de la contaminación posterior.

La composición química y biológica que las aguas llegan a tener de forma natural se modifica por la recepción de efluentes, de muy diferen-

tes características, originados por la actividad humana. Esta composición final es la que determina la calidad de un agua en un determinado momento.

Calidad y usos del agua

A los efectos prácticos, no se puede hacer una clasificación absoluta de la calidad del agua. El agua destilada que, desde el punto de vista de la pureza, tiene el más alto grado de calidad, no es adecuada para beber. El grado de calidad del agua ha de referirse a los usos a que se destina.

Esto complica las medidas de la calidad, así como la determinación de objetivos relacionados con la calidad de las aguas, que habrán de estar referidos a los usos previstos. Análogamente, el concepto de contaminación ha de estar referido, desde un punto de vista práctico, a los usos posteriores del agua. En este sentido, la Ley de Aguas establece que se entiende por contaminación la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía que impliquen una alteración perjudicial de la calidad del agua en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

Los objetivos de calidad han de tener en cuenta los usos siguientes:

- Agua destinada a la producción de agua potable.
- Agua destinada al consumo y usos domésticos.
- Agua destinada a fines industriales.
- Agua destinada a fines agrícolas:
 - Riego.
 - Consumo de los animales.
- Agua destinada a actividades recreativas:
 - Contacto primario con el agua.
 - Contacto secundario con el agua.
- Vida acuática:
 - Especies sensibles a la contaminación.
 - Especies tolerantes a la contaminación.

Las aguas destinadas al consumo público deberán de tener los tratamientos adecuados con el fin de obtener una calidad determinada. Como

norma general hay que tener en cuenta que el fin último es la protección de la salud pública.

El agua requerida para la industria suele ser de inferior calidad que la requerida para usos domésticos o para el consumo, si bien hay que tener en cuenta que ciertas industrias necesitan de aguas tratadas más cuidadosamente.

La calidad mínima necesaria para poder utilizarla en cada uno de los procesos industriales es distinta según el agua sea utilizada o consumida, ya que la utilización implica la devolución íntegra del volumen de agua tomada para un determinado proceso, mientras que el consumo implica que el agua se incorpora de alguna manera, al producto fabricado, pasando a formar parte de él.

No todas las aguas son aptas para riego, dependiendo su mayor o menor bondad, no sólo de su contenido iónico en calidad y cantidad, sino de otra serie de factores, como son entre otros la permeabilidad del suelo, su pH, tipo de cultivo a irrigar, sistema de riego, etc.

EL SUELO Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Formación y composición del suelo

El suelo es básicamente el resultado de la mezcla de materia orgánica, partículas minerales y aire, en proporciones variables. Para los organismos vivos supone el soporte material de su desarrollo.

La formación del suelo es un proceso dinámico, muy lento, que requiere el cumplimiento de una serie de fases determinadas, con independencia del tipo de suelo que se obtenga finalmente. No se le puede considerar como un medio inerte que únicamente refleje la composición de la roca subyacente, sino que nace y evoluciona bajo la acción de los llamados factores «activos» del medio, el clima y la vegetación.

En las fases de juventud, madurez y en los períodos de regresión, el suelo va alcanzando un equilibrio estable con los distintos factores, principalmente con la vegetación autóctona.

Los orígenes del suelo están en la alteración superficial de las rocas que afloran a la superficie terrestre como consecuencia de su desintegración física en pequeños fragmentos, que a su vez sufren un posterior ataque químico y biológico por el cual se liberan nutrientes que sirven para el crecimiento de las plantas. La acción biológica es llevada a cabo por los organismos que viven en el suelo, principalmente bacterias, hongos y gusanos.

Es interesante mencionar que el factor climático tiene la propiedad de conseguir suelos análogos a partir de rocas madre diferentes, mientras que la misma roca en climas distintos origina suelos diversos. No siempre la composición inicial de la roca madre tiene influencia decisiva en la composición química del suelo, pues algunos componentes solubles (sales de sodio, potasio, sulfato cálcico, carbonato cálcico, etc.) pueden migrar con facilidad, concentrándose aquellos que no son solubles.

La vegetación que se desarrolla sobre el suelo en las primeras etapas va dejando en él una cierta cantidad de residuos originados en su ciclo vital, constituyéndose así el soporte orgánico, cuyas propiedades reflejan e integran el conjunto de los factores del medio. Por otra parte, esta materia orgánica al unirse más o menos íntimamente con la materia mineral orienta la formación del suelo en una dirección determinada.

El material originario del suelo presenta una gran variedad de posibilidades mineralógicas, de textura, grado de consolidación, tamaño de partícula, etc., y, en función de un relieve y un clima determinado, la evolución progresiva de ese suelo puede ser erosiva o sedimentaria. Inmediatamente comienza la implantación de una vegetación, fauna y microorganismos adaptados a la situación y que a su vez intervienen poderosamente en el proceso de maduración del suelo. Se establece una doble evolución, de los perfiles del suelo y de la vegetación asociada, que conducen a un equilibrio estable denominado clímax.

Como se ha comentado anteriormente, este proceso es muy lento, de tal manera que la formación de un centímetro de suelo puede llegar a tardar algunos centenares de años.

Constituyentes y estructura del suelo

Un suelo, es un sistema biogeoquímico que mantiene con la biosfera, la atmósfera y la hidrosfera un intercambio de materia y energía. La multitud de constituyentes que lo forman se distribuyen por término medio en tres categorías:

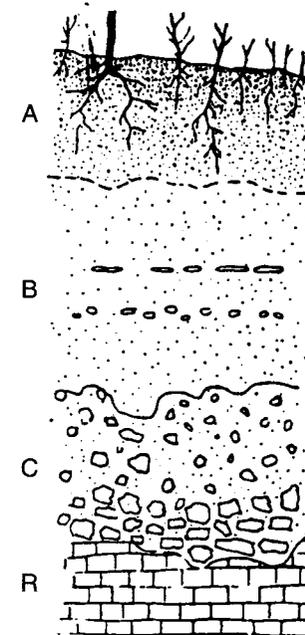
- El 50 % del volumen es materia sólida, tradicionalmente dividida en un 45 % de fracción inorgánica o mineral (especies iónicas, carbonatos, sulfatos, silicatos, óxidos e hidróxidos y los minerales de la arcilla como caolinitas, vermiculitas, etc.) y el 5 % de fracción orgánica (sustancias húmicas y no húmicas como proteínas, hidratos de carbono, grasa, sales metálicas de ácidos orgánicos, etc.).

- El 20 ó 30 % del volumen restante, lo constituyen cada una de las fases líquida y gaseosa, ocupando los espacios porosos existentes entre partículas sólidas.

La distribución de los materiales que constituyen el suelo no es homogénea, ya que a lo largo de su evolución va pasando progresivamente de ser superficial al principio a hacerse más profundo, destacándose capas o estratos sucesivos de color, textura y estructura diferentes, llamados horizontes. El conjunto de los horizontes es lo que constituye el perfil.

El estudio detallado del perfil, teniendo en cuenta la acción de diversos factores ecológicos del medio, permite reconstruir la historia del suelo, pues los caracteres de los horizontes reflejan la acción de los procesos bioquímicos y físico-químicos que tienen lugar en él.

En el suelo ya bien desarrollado se distinguen en profundidad tres horizontes, que se designan por las letras «A», «B», «C».



Perfil normal de un suelo maduro en el que se diferencian los tres horizontes «A», «B», «C» y la roca madre (R)

- Horizonte «A»

Constituye la capa más superficial, hasta una profundidad de unos 60 cms. Contiene la mayor parte de la materia orgánica del suelo, siendo de color oscuro, debido a su abundante contenido en humus, y es donde tiene lugar la máxima actividad biológica, constituyendo la zona donde arraigan la mayor parte de las plantas.

Está formado por partículas muy finas de arena y arcilla, y en él la penetración del agua provoca la desaparición de los compuestos coloidales y del carbonato cálcico, que emigran a niveles inferiores.

- Horizonte «B» o subsuelo

Está situado debajo del horizonte «A», con un espesor variable hasta 1 metro, y de color más claro, pardo-rojizo o amarillento, por la ausencia de humus y la presencia de los óxidos de hierro.

Está formado por los productos de alteración de las rocas subyacentes, y recibe material orgánico y mineral disuelto del horizonte superior, mediante un proceso denominado lixiviación. Contiene alúmina coloidal, que le da un carácter más plástico y menos poroso que el del horizonte «A».

- Horizonte «C»

Es el más profundo, y constituye el tránsito hacia la roca madre. Está formado por material disgregado procedente del fondo rocoso, cantos sueltos en una matriz de arcilla y arena que van siendo más numerosos y de mayor tamaño hacia la zona profunda. Su espesor oscila entre unos escasos metros hasta más de 30, presentándose más desarrollado en los climas cálidos y húmedos.

El agua y el aire como integrantes de los suelos

Como ya se ha comentado, el agua puede constituir alrededor de un 20 o un 30 % de la composición del suelo. Se encuentra en su parte superior adherida a las partículas pequeñas mediante enlaces químicos, interacciones de tipo físico o constituyendo libremente las partes inferiores las aguas subterráneas.

Con respecto al aire contenido en el suelo, éste reside en los pequeños poros existentes en los dos primeros horizontes. La composición del aire edáfico es significativamente distinta al atmosférico. La causa de esta diferencia se encuentra en el consumo de oxígeno para la degradación de la materia orgánica del suelo y en la liberación del dióxido de carbono en este proceso.

Mientras que el aire atmosférico contiene un 21 % de volumen de oxígeno y un 0,03 % de dióxido de carbono, la composición del aire en los poros del suelo es más rica en dióxido de carbono y se reduce a un 15 % el oxígeno.

En consecuencia, al disolverse la mayor parte de dióxido de carbono en las aguas subterráneas, éstas se acidifican, contribuyendo a la disolución de los carbonatos, principalmente del carbonato cálcico.

Por otra parte, en los horizontes más profundos, debido a la ausencia de oxígeno se promueve el desarrollo de los procesos anaeróbicos, en los que se producen gases reductores como el metano, el óxido nitroso, el hidrógeno, el sulfuro de hidrógeno, etc., que pasan a ser los componentes minoritarios del aire edáfico.

Material sólido del suelo

La naturaleza del material sólido que forma parte del suelo, como ya se ha comentado, es muy diversa.

El material inorgánico que compone el suelo puede dividirse en dos tipos: las partículas coloidales y los minerales.

Respecto a las partículas coloidales provenientes de la erosión de la roca subyacente, son aquellas que tienen un tamaño inferior a una micra ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$), y suelen estar constituidas por minerales arcillosos, formados por óxidos de silicio y aluminio hidratados.

Presentan una gran superficie sobre la que desarrollan su importante capacidad de adsorción, convirtiéndose en los almacenes de agua y de nutrientes de los que disponen las plantas para alimentarse.

Los principales minerales que constituyen el suelo son el cuarzo y diversos silicatos, procedentes de la disgregación de rocas que han sido originadas a elevadas temperaturas y grandes presiones, como son las rocas ígneas y metamórficas.

También se encuentran en el suelo, en elevadas proporciones, los óxidos de hierro, que confieren al suelo la típica coloración ocre, y, en menor proporción, los óxidos de magnesio, titanio, aluminio, zinc, etc.

Los carbonatos, principalmente el carbonato cálcico, son una gran fuente de carbono con abundante presencia en el suelo.

La materia orgánica ubicada en el suelo consiste en una mezcla de biomasa, plantas parcialmente degradadas, organismos vivos microscópicos, de tamaño visible y, finalmente, el humus. Este último no es más que el residuo originado por la acción de hongos y bacterias sobre las plantas, siendo la lignina su principal precursor. Ésta es la causa de su brillante color oscuro.

El humus está compuesto por una fracción soluble, constituida por los denominados ácidos húmicos y fúlvicos, y una fracción insoluble, que es la humina. Es en realidad una mezcla de moléculas complejas, con un alto grado de aromaticidad y con grupos ácidos, fenólicos y carbonílicos.

Este componente desempeña un papel muy importante en los procesos físicos y químicos que tienen lugar en el suelo. Sus grupos funcionales pueden unirse a gran número de sustancias. Por ejemplo, los ácidos fúlvicos pueden enlazarse a partículas de arcilla, lo cual determina la fertilidad y la consistencia del suelo.

Propiedades características de los suelos

Cada suelo se caracteriza por sus propiedades físicas, determinadas por la naturaleza y organización de sus componentes, así como por sus propiedades químicas, debido fundamentalmente a que se trata de un medio poroso. El conocimiento de las características físico-químicas de un suelo nos permitirá prever la dinámica de las sustancias contaminantes.

A) La porosidad, determinada por el tamaño, forma y situación de los agregados del suelo, así como del tamaño de partículas sueltas, condiciona la movilidad de los compuestos solubles y de los volátiles.

B) La temperatura del suelo, de la que dependen procesos como la alteración de los materiales originarios, la retención de agua o la difusión de contaminantes.

C) Los procesos ácido-base, influyen en el grado de descomposición de la materia orgánica y de los minerales, y por lo tanto en la formación de la arcilla, en la disponibilidad de nutrientes para la vegetación, la solubilidad de algunos contaminantes, y, en conjunto, los procesos controlados por el pH del suelo.

D) Las reacciones redox, principalmente originadas en el metabolismo de los microorganismos del suelo, afectan a elementos naturales y a contaminantes (arsénico, selenio, cromo, mercurio o plomo).

E) Las propiedades coloidales, que explican los procesos de agregación e inmovilización de partículas de los minerales de arcilla y compuestos húmicos.

F) Las interacciones superficiales como las fuerzas de adsorción entre componentes del suelo y otros compuestos, ya sean naturales o contaminantes.

G) Una de las propiedades que más caracteriza a un suelo es su capacidad de intercambio iónico, que corresponde a la cantidad de iones metálicos que una determinada cantidad de suelo (normalmente 100 grs.), es capaz de intercambiar.

Tanto las partículas minerales como las orgánicas manifiestan una determinada capacidad de carga. Las partículas coloidales de arcilla poseen cargas negativas en su retículo cristalino, que es compensada por cationes metálicos móviles, que serán intercambiados por otros presentes en el entorno de la partícula. El humus también presenta una importante capacidad de intercambio iónico.

Esta capacidad para intercambiar iones que tiene el suelo es vital para que los iones metálicos, como el potasio, el calcio, el magnesio y otros iones esenciales puedan acceder a la planta. El proceso que tiene lugar es el siguiente: en un ambiente acuoso el suelo libera un ión metálico y adquiere iones hidrógeno, mientras que el dióxido de carbono se transforma en ión bicarbonato, debido al aumento del pH del medio. De esta forma los iones metálicos, al quedarse libres, se desplazan en el entorno líquido en el que se encuentran hasta ser captados por las raíces de las plantas.

La modificación o transformación (por contaminación, deforestación, etc.) de alguno de los factores que conforman un suelo implica un desequilibrio que afecta al resto de los factores y, normalmente, activa procesos de regresión en ese suelo.

Tipos de suelos

Las clasificaciones modernas de los suelos proceden de una reflexión o síntesis ecológica basada en la confrontación de los datos ecológicos, morfológicos, físico-químicos y biológicos, ya que estas características no son independientes entre sí, sino que constituyen un conjunto global.

Al ser ésta una obra general sobre el medio ambiente, se ha considerado más apropiado utilizar una clasificación general, en la que se han

elegido las condiciones climáticas como el principal factor, independientemente de que en función del carácter mineralógico los suelos se subdividan en: calcáreos, silíceos, arcillosos y salinos.

Como ya se ha apuntado, el clima proporciona al suelo un carácter típico determinado con independencia del tipo de roca madre de la que proceda.

La clasificación que se expone a continuación tiene en cuenta este hecho:

- Podzol

Es el suelo típico de climas húmedos y fríos, con abundante materia vegetal en el primer horizonte, arenoso y de carácter ácido. En él predomina el humus, por lo que es de color oscuro. El horizonte «B» recibe los materiales coloidales, que son arrastrados hasta las zonas más profundas, formando en ellas una zona endurecida.

- Chernozem

Este suelo es característico de las regiones de clima húmedo con veranos cálidos, en los que el horizonte «A» es rico en humus y en óxidos de hierro, presentando un color pardo-amarillento. El horizonte «B», al tener depósitos de carbonato cálcico, presenta un color gris-pardo.

- Lateritas

Este tipo de suelo es propio de las regiones tropicales de clima cálido y húmedo, en el que el horizonte «A» es prácticamente inexistente y con un horizonte «B» de color rojizo, debido a que los óxidos de hierro y alúmina se fijan en él.

- Suelos desérticos

Es un suelo propio de las regiones de clima desértico, con el horizonte «A» de color gris claro o amarillento y un horizonte «B» en el que se forman nódulos de carbonato cálcico por las aguas de infiltración.

Características de las aguas subterráneas

El agua subterránea se origina en la precipitación de lluvia o nieve, parte de la cual se infiltra directamente o bien a partir de ríos y lagos, a

través de grietas y poros de la roca hasta alcanzar un nivel en el que el substrato es impermeable. La acumulación de agua depende de las formaciones geológicas, consistentes a veces en rocas porosas (arenas, gravillas, etc.) o fracturadas (calizas, areniscas, lavas, etc.) que puedan contener agua en sus huecos.

Un acuífero es, por tanto, un conjunto de rocas que contiene y puede proporcionar agua bajo ciertas condiciones, dependiendo de la porosidad o conjunto de intersticios existentes entre los sólidos discontinuos, y de la permeabilidad o capacidad de ceder el agua almacenada. En España se contabilizan más de 350 grandes unidades o sistemas acuíferos, con una extensión aproximada de 170.000 kilómetros cuadrados y un volumen de recarga anual aproximado de 20.000 hectómetros cúbicos.

Se distinguen, en España, tres grandes tipos de formaciones geológicas permeables que dan lugar a los acuíferos. La primera la constituyen las formaciones carbonatadas, en la que el agua se infiltra a través de cavidades de erosión y fracturas de las masas rocosas, formando depósitos de tamaño considerable y aflorando en superficie en forma de manantiales (cornisa Cantábrica, Sistema Ibérico, cabeceras del Guadalquivir, Guadiana y Ebro). La segunda son las formaciones detríticas, donde el agua accede a las capas inferiores por la porosidad del suelo —arcillas, arena y grava—, y se corresponde con los tramos medios de los ríos Tajo y Duero, y los tramos bajos del Guadalquivir y Segura. Por último están las formaciones de origen volcánico, de gran interés, en las Islas Canarias.

Los acuíferos, en función de la estructura geológica de los materiales que lo forman y de las condiciones hidráulicas del agua contenida, se clasifican en:

- Acuíferos libres

Un estrato impermeable sirve de base a una zona permeable saturada de agua, sobre la que existe una zona también permeable y no saturada. Al excavar un pozo, la presión en el agua es igual a la atmosférica, y la altura del agua subterránea nos señala el nivel freático, que en este caso coincide con el piezométrico.

- Acuíferos confinados

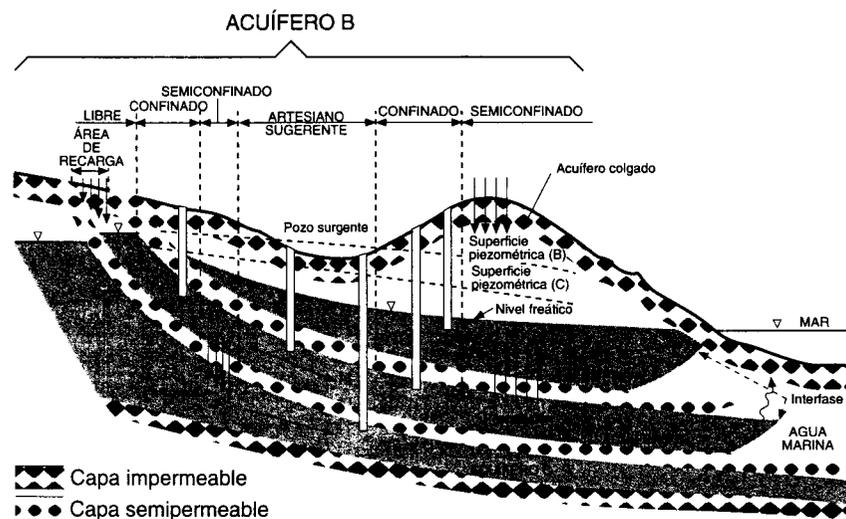
La roca permeable cargada de agua queda confinada entre dos capas impermeables, de forma que la presión en las grietas y poros saturados

de agua es mayor que la atmosférica. Al realizar un sondeo, el agua ascenderá hasta la altura de equilibrio, el nivel piezométrico; en ocasiones, cuando este nivel esté por encima de la cota del terreno, tendremos un pozo surgente o artesiano.

- Acuíferos semiconfinados

En este caso, una de las rocas encajantes de la zona permeable, no es totalmente impermeable, permitiendo cierta transmisión del agua a través de ella. El acuífero presenta unas características intermedias entre el libre y el confinado.

Por último, cabe destacar la importancia en nuestro país de los sistemas acuíferos como recurso: de los 20.000 hectómetros cúbicos de recarga por infiltración de lluvias que se recogen anualmente se extraen unos 6.000 para su consumo, principalmente agrícola. La problemática se origina al sobreexplotarse algunos acuíferos, siendo casos conocidos los del Guadiana, Júcar, Segura, Sur y Canarias, y también por contaminación de sus aguas ya sea por vertidos o por actividades agrarias intensivas con utilización de fertilizantes, herbicidas y fitosanitarios en general.



Acuíferos libre (A), semiconfinado (B), y confinado (C)
(Bear, 1982)

5

Agentes contaminantes

CONTAMINANTES DE LA ATMÓSFERA

La contaminación atmosférica se define como la condición atmosférica en la que ciertas sustancias y/o energías alcanzan concentraciones o niveles lo suficientemente elevadas, sobre su nivel ambiental normal como para producir riesgos, daños o molestia a las personas, ecosistemas o bienes.

Los contaminantes pueden dividirse en tres grupos:

- Biológicos.
- Físicos.
- Químicos.

Contaminantes biológicos

El aire no es un medio adecuado para el desarrollo de microorganismos. Sin embargo, actúa como medio de transmisión de todos aquellos agentes biológicos que puedan estar en él.

Todos estos «contaminantes» existen ya en la naturaleza, pero debido a la actividad humana en ocasiones estos agentes se multiplican en cier-

tos ambientes, dando lugar a problemas epidemiológicos en los seres vivos.

Los contaminantes biológicos se pueden clasificar en:

— Organismos vivos causantes de enfermedades infecciosas, como las bacterias, virus, hongos, etc.

— Provenientes de animales, principalmente domésticos, pelos, plumas, y plantas, como polvo vegetal, etc., que pueden producir enfermedades respiratorias y alergias.

Este tipo de contaminación tiene un tratamiento especial en todos los Estados dentro de los Departamentos de Sanidad y, por tanto, no se incide más sobre estos agentes.

Contaminantes físicos

Ruido

La propagación de ondas de presión audibles a través de un medio elástico es lo que se conoce por sonido. El ruido no es más que un sonido indeseable para la persona que lo percibe, y por lo tanto, es un concepto subjetivo.

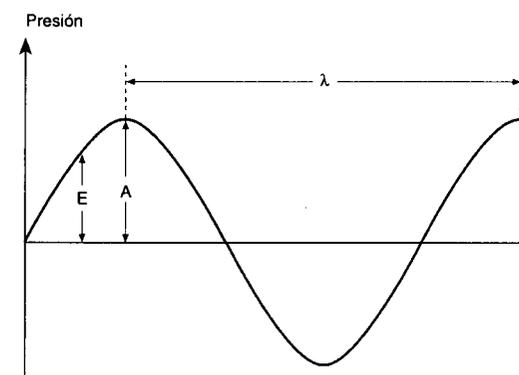
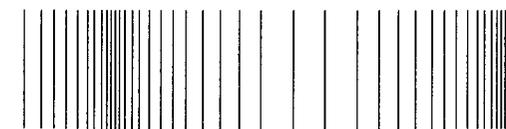
En una onda sonora distinguimos los siguientes parámetros:

- Elongación: Desplazamiento del punto en vibración de su posición de equilibrio. (E)
- Amplitud: Elongación máxima. (A)
- Período: Tiempo transcurrido para completar un ciclo. (T)
- Longitud de onda: Distancia recorrida en un tiempo igual al período. (λ)
- Frecuencia: Número de variaciones de presión por segundo (Hz). (f)

Los parámetros que caracterizan los ruidos son tres: el nivel o intensidad, la frecuencia y la duración.

El oído humano transforma las ondas de presión acústicas en sensación auditiva, estando comprendida su sensibilidad entre los 20 μ Pa («umbral de audición», valor $5 \cdot 10^9$ veces inferior a la presión atmosférica, que provoca un desplazamiento de la membrana del oído de menos del diá-

metro de un átomo) y los 100 Pa («umbral del dolor»). Trabajar con valores de presión acústica tan elevados dificultaría mucho los cálculos, por lo que se utilizan «niveles de presión acústica». Entre ambas magnitudes existe una relación logarítmica cuya unidad es el decibelio, definiéndose éste como el logaritmo de la relación entre dos valores.



Onda sonora

Se define el nivel de presión acústica (L_p) como la variación de la presión atmosférica en un punto como consecuencia de la propagación a través del aire de una onda sonora. Es el parámetro más usado para la medición de ruidos, por ser medible directamente con los sonómetros. Éstos miden la presión acústica de un ruido en relación a una presión tomada como referencia.

La fórmula que determina el número de decibelios de nivel de presión acústica en función de ésta, es la siguiente:

$$\text{N.P.S.} = 10 \cdot \text{Log.} \frac{P}{P_0} \text{ dB}$$

donde:

N.P.S.: representa la medida del nivel de presión acústica de un sonido en decibelios.

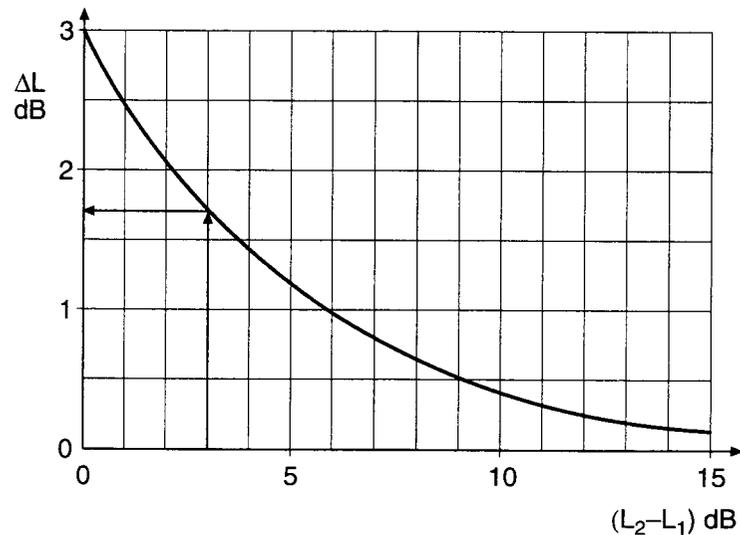
P: es la presión media del sonido medido.

P_0 : es la presión acústica de referencia. Ésta se corresponde con la menor presión acústica audible que un oído joven puede detectar en condiciones de audición ideales (0,0002 microbares). La aplicación de la escala logarítmica le atribuye el valor de 0 dB.

Las unidades logarítmicas no pueden sumarse aritméticamente. En el caso de sumar decibelios, se debe utilizar el método numérico o bien el método gráfico, en el que se observa que, al sumar dos niveles iguales, el nivel resultante es 3 dB mayor que cada uno de los niveles por separado.

Para la utilización del siguiente gráfico, se procede de esta forma:

1. Medir por separado los niveles a sumar (L_1 y L_2).
2. Hallar la diferencia entre ambos niveles.
3. Entrar en el eje horizontal del gráfico con la diferencia obtenida en el paso 2, hasta encontrar la curva e ir después horizontalmente hasta el eje vertical.



4. Sumar el valor que se obtenga en el eje vertical al mayor de los niveles medidos. El resultado de dicha operación corresponderá a la suma de los niveles de ruido.

Ejemplo:

1. Máquina 1: 85 dB.
2. Máquina 2: 82 dB.
3. Corrección obtenida del gráfico: 1,7 dB.
4. Ruido total: $85 + 1,7 = 86,7$ dB.

Cortesía de Brüel & Kjaer

El Nivel Sonoro Continuo Equivalente (L_{eq}), representa la energía sonora total de un período de tiempo, expresada en dB, permitiendo describir el suceso de ruido discontinuo o fluctuante con un solo valor. La buena correlación encontrada entre la energía sonora recibida y la respuesta comunitaria permite utilizar el L_{eq} como descriptor del ruido ambiental.

Viene dado por la expresión:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{P_{A(t)}^2}{P_0} \right) dt \right]$$

donde:

$T = T_2 - T_1 =$ Tiempo de exposición al ruido.

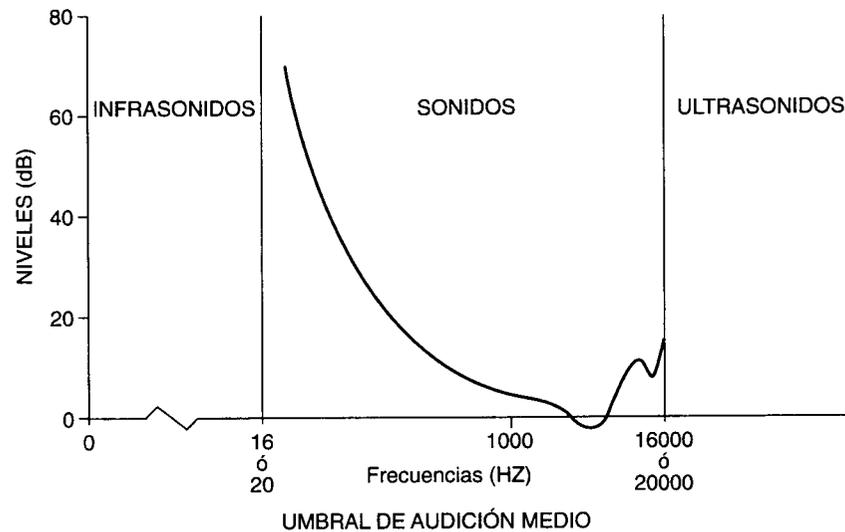
El Nivel Sonoro Máximo (L_{max}), es el nivel de presión sonora máximo obtenido durante el tiempo de medida, expresado en dB.

El Nivel Sonoro Mínimo (L_{min}), es el nivel de presión sonora mínimo obtenido durante el tiempo de medida, expresado en dB.

Para caracterizar un ruido no basta con conocer su nivel sonoro, sino que debemos saber cómo se distribuye su energía sonora en cada una de las frecuencias que componen el espectro del ruido.

La división de las ondas sonoras en base a la variación de frecuencias se recoge en el siguiente gráfico:

El campo audible está comprendido entre los 20 y los 20.000 Hz. La línea de la gráfica representa el nivel de ruido mínimo necesario para percibirlo para cada una de las frecuencias que forman parte del campo audible.



División de las ondas sonoras basadas en la variación de frecuencia

El campo de frecuencias audibles es muy amplio, por lo que para hacer el análisis espectral de una onda sonora se emplean divisiones, tales como la octava, media octava y tercio de octava.

La octava se define como el intervalo de frecuencia comprendido entre una determinada y otra igual al doble de la anterior (f , $2f$), y se representan por sus frecuencias centrales. Cuanto más pequeño sea el intervalo de frecuencia a estudiar, dispondremos de más valores del espectro de la onda sonora.

El comportamiento del oído humano ante el ruido se ha estudiado experimentalmente y se ha reflejado mediante las curvas de igual sensación sonora o sonoridad para tonos puros (Figura A), las cuales son la base para la elaboración de las curvas de ponderación (Figura B).

Se puede decir, pues, que el oído humano percibe los sonidos como si dispusiese de unos filtros a distintas frecuencias y niveles, de modo que permite con más facilidad el paso de unos sonidos que otros, siendo menos sensible a las frecuencias más bajas (tonos graves) que a las frecuencias medias o altas (tonos agudos).

Estos filtros son los que se incorporan a los instrumentos de medida, con el fin de que los aparatos midan las mismas perturbaciones que llegan al oído, es decir, discriminan en su respuesta el peso relativo de cada frecuencia en el conjunto del espectro de frecuencias.

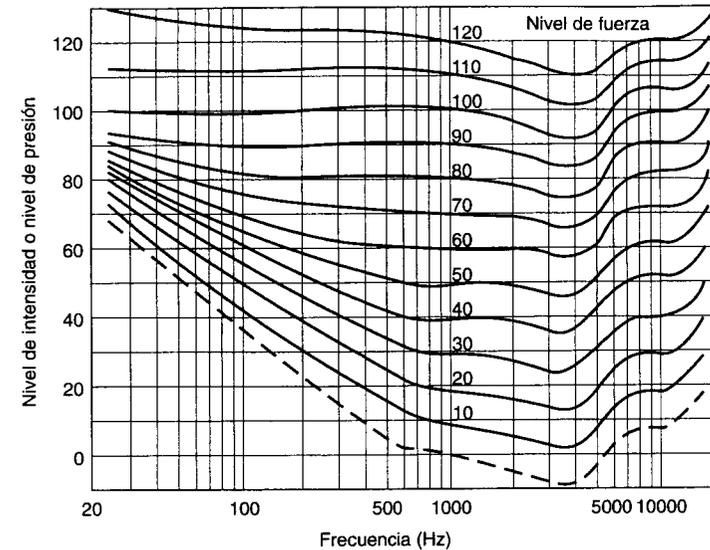


Figura A. Perfiles de igual sensación sonora de Fletcher-Munson

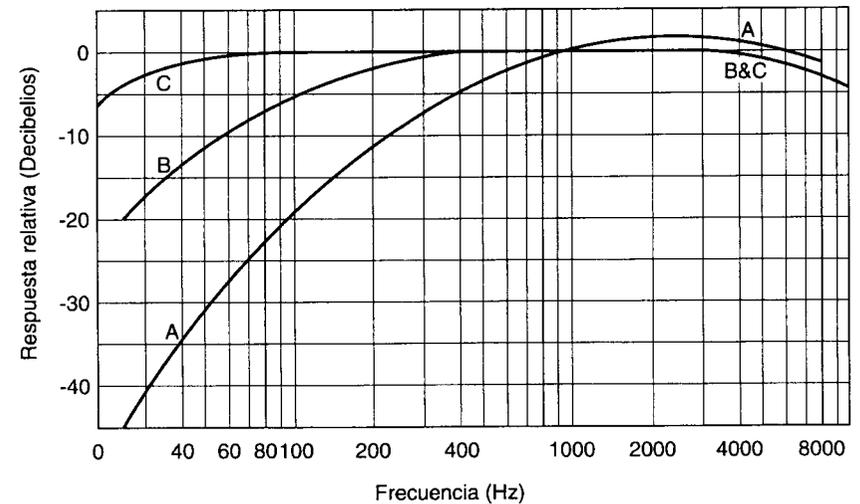


Figura B. Escalas A, B y C de atenuación o ponderación

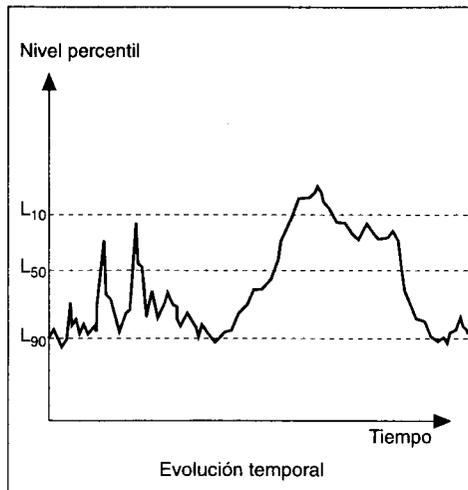
Así pues, el nivel de presión acústica ponderado en A (L_pA) es el nivel de presión acústica en decibelios, determinado con el filtro de ponderación frecuencial A. A este nivel también se le conoce como «Nivel de Intensidad Fisiológica», y se mide en decibelios A, dB(A).

Con respecto a la duración, el ruido sufre fluctuaciones de nivel en el tiempo cuya incidencia sobre la molestia que ocasionan es muy importante, de ahí que a la hora de estudiar un ruido, se estudie cómo varía éste con respecto al tiempo mediante el análisis estadístico. Este análisis puede expresarse de varias formas: gráfico de niveles percentiles, curva de distribución acumulativa y curva de distribución de probabilidad.

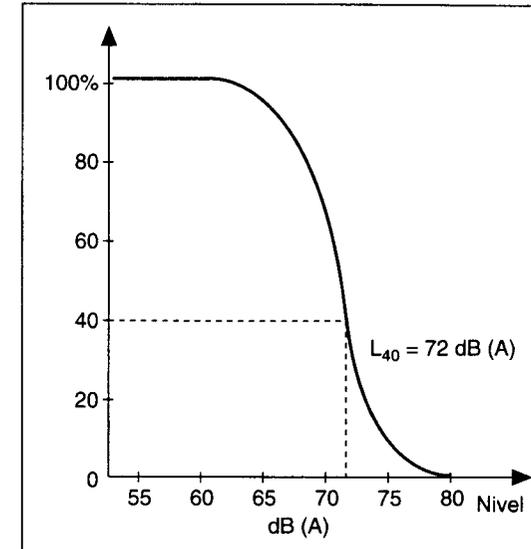
El percentil (L_N) es un parámetro estadístico que indica el porcentaje del tiempo de medida durante el que un cierto nivel fue superado; así por ejemplo, un valor de L_{30} igual a 65 dB(A) indica que durante el 30 % del tiempo de medida se superaron los 65 dB(A). En el análisis de la evolución temporal de un ruido, suele considerarse el nivel L_{10} como nivel de pico, el nivel L_{50} como nivel medio y el nivel L_{90} como nivel de ruido de fondo.

La curva de distribución acumulativa muestra el porcentaje del tiempo de medida durante el que se sobrepasa un determinado nivel, mientras que la curva de distribución de probabilidad refleja el porcentaje de tiempo entre dos niveles, L y $L+2dB$.

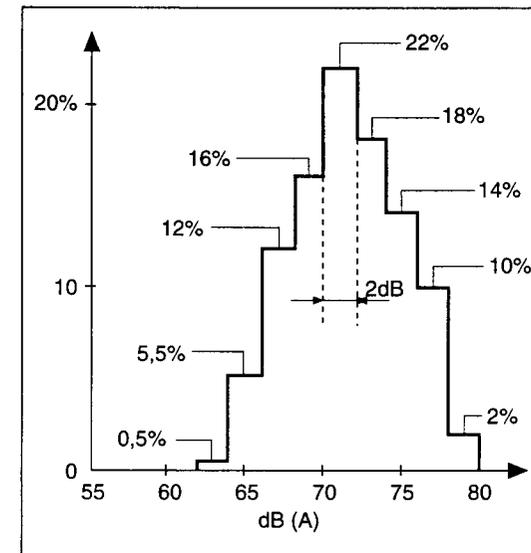
En los siguientes gráficos se recogen las distintas formas de expresar estos análisis.



Niveles percentiles (Brüel & Kjaer)



Curva de distribución acumulativa que muestra el porcentaje de tiempo durante el que se sobrepasa un cierto nivel (Brüel & Kjaer)



Curva de distribución de probabilidad que muestra el porcentaje de tiempo entre L y $L + 2$ dB (Brüel & Kjaer)

El sonido se propaga omnidireccionalmente, es decir, en todas las direcciones.

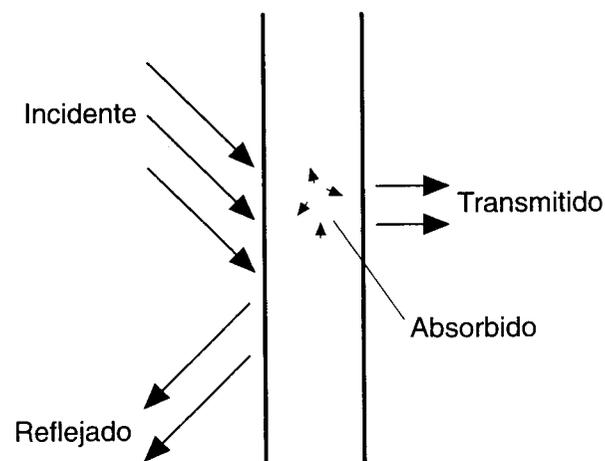
La propagación del sonido en el aire depende de varios factores como son el tipo de fuentes de ruido, su distribución en el espacio, el medio donde se propaga y las condiciones atmosféricas (presión y temperatura) en las que se realiza la propagación.

El problema más típico que se suele plantear es qué nivel de ruido tendremos en un punto situado a una determinada distancia de una fuente sonora cuyo nivel sonoro es conocido. El estudio de campo se resuelve tomando medidas simultáneas (para que el ruido de fondo sea el mismo) en el punto de emisión y en el de inmisión (receptor).

La propagación del sonido nunca se realiza sin pérdidas, sino que está supeditada a una mayor o menor amortiguación; es decir, la presión o la velocidad disminuyen al aumentar la distancia al foco sonoro. La amortiguación del sonido se basa en el concepto de absorción del mismo.

La onda acústica emitida sufre fenómenos de reducción debidos a la dispersión de la energía en el espacio, de atenuación por el aire, de reflexión y difracción en obstáculos, reflexión y formación de sombras por las variaciones atmosféricas y de reflexión y absorción debidas al suelo.

Cuando una onda acústica incide en una superficie, parte de la energía de la onda se transmite, es decir, se propaga a través de dicha superficie, otra parte se refleja en la superficie y es devuelta al punto de emisión. El ejemplo más claro lo tenemos en el eco, y el resto de la energía es absorbida por la superficie, ya sea en forma de calor o de vibración.



Cuando la energía reflejada (reverberada) es nula, la energía decrece con una pendiente de 6 dB al duplicar la distancia. Así, si tenemos que a 50 mts. de una fuente sonora el nivel de ruido es de 66 dB y podemos suponer que no existe energía reflejada, caso de una cámara anecoica en la que toda la energía que se emite, se transmite o se absorbe, pero no existe energía reflejada, el nivel a 100 mts. será de 60 dB.

Ésta es la forma en que algunas máquinas recogen en sus especificaciones técnicas los niveles de emisión de ruido que producen.

Radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes son de cuatro tipos principalmente:

- Rayos X.
- Partículas alfa.
- Partículas beta.
- Rayos gamma.

Los rayos X son ondas electromagnéticas, como la luz, que se caracterizan por tener una longitud de onda muy corta y mucha energía, y se producen al transformarse la estructura electrónica de un átomo.

Las radiaciones alfa, beta y gamma son el resultado del fenómeno conocido como radiactividad.

Los átomos están compuestos de un núcleo en el que se localizan los protones, con carga positiva y masa, y neutrones, con masa pero sin carga, y de electrones, con carga negativa y masa prácticamente nula, que giran alrededor del núcleo en diferentes órbitas. El número de electrones y de protones es igual, ya que el átomo es eléctricamente neutro. Sin embargo, el número de neutrones en un elemento puede variar. La naturaleza química de un elemento viene determinada por el número de protones, denominándose número atómico.

Así, el carbono tiene seis electrones y seis protones, pudiendo tener seis neutrones, siete neutrones u ocho neutrones, carbono-12, carbono-13 o carbono-14. Los tres tienen las mismas propiedades químicas, pero su masa es diferente. A estos tres tipos de átomos de carbono se les denomina isótopos.

Hay isótopos que son estables, como el carbono-12, mientras que en otros, debido a la descompensación entre los protones y los neutrones, existe una inestabilidad que conlleva un exceso de energía. Este exceso

lo eliminan emitiendo energía en grandes cantidades y/o partículas con mucha energía. A este fenómeno se le conoce con el nombre de radiactividad.

Los tres tipos de radiaciones que se pueden emitir en este proceso son:

- Radiaciones alfa.
- Radiaciones beta.
- Radiaciones gamma.

Las radiaciones alfa son núcleos de helio desprendidos del núcleo del radioisótopo, dos protones y dos neutrones, que al carecer de electrones tienen dos cargas positivas. Estas partículas en seguida interaccionan con la materia, al tener masa y estar cargadas eléctricamente.

Las radiaciones beta son electrones procedentes del núcleo por la conversión de un neutrón en un protón (que se queda en el núcleo) y un electrón (radiación beta). La interacción con la materia de estas partículas no se produce tan rápidamente como con las alfa, aunque al estar cargadas son menos penetrantes que las gamma.

Las radiaciones gamma son ondas electromagnéticas de una longitud de onda muy corta y muy penetrante, ya que sólo es desviada o neutralizada por los electrones de los átomos.

La radiactividad puede ser natural o artificial. La natural se produce espontáneamente, mientras que la artificial se provoca mediante el bombardeo de determinados átomos con partículas con mucha energía.

Un ejemplo de radiactividad natural es la desintegración del carbono-14 antes mencionado en nitrógeno-14, de la que se desprende una radiación beta. El nitrógeno, ya con siete protones, solamente tiene seis electrones, por lo que rápidamente captará un electrón del ambiente para convertirse en un átomo neutro.

El radio-226, con 86 protones, se transforma en radón-222, 84 protones (también radiactivo), emitiendo una radiación alfa. Esta radiación es un núcleo de helio, con dos protones y cuatro neutrones, faltándole dos electrones para ser neutro, y tiende a capturarlos del medio.

Una característica de los isótopos radiactivos es que su desintegración es espontánea, y la velocidad con que se desintegran es constante y específica de cada radioisótopo. Por tanto, el número de átomos de un isótopo radiactivo en una determinada masa irá disminuyendo con el tiempo. Se denomina período de semidesintegración (T) al tiempo que tarda una masa de un determinado isótopo en reducirse a la mitad. Esto es muy importante de cara a la peligrosidad de este fenómeno, ya que este período

do es característico de cada radioisótopo y abarca desde millonésimas de segundo hasta millones de años.

El gran peligro para los seres vivos de las radiaciones alfa, beta, gamma y rayos X es el poder ionizar la materia que encuentra a su paso, de ahí el nombre de radiaciones ionizantes.

Contaminantes químicos

Desde el punto de vista de su origen, los contaminantes químicos se pueden dividir en dos grupos:

- Contaminantes primarios, emitidos directamente a la atmósfera desde los focos contaminantes.
- Contaminantes secundarios, que se originan en la misma atmósfera por reacción entre dos o más contaminantes primarios o con los constituyentes normales del aire.

La mayor parte de los contaminantes son constituyentes naturales de la atmósfera que están presentes en pequeñas concentraciones (trazas). A continuación se describen cada uno de estos tipos de contaminantes.

Partículas

Se pueden realizar diversas divisiones de los contaminantes particulados. Así, atendiendo a su composición química, pueden estar formados por muy diversas sustancias: metales, carbón, alquitrán, resinas, polen, hongos, bacterias, óxidos, nitratos, cloruros, sulfatos, fluoruros, silicatos, carbonatos, etc. Según su origen se pueden dividir en:

- Procedentes de las reacciones químicas y/o procesos físicos sobre materiales inanimados.
- Radiactivas, producidas durante la utilización del hombre de sustancias radiactivas naturales o artificiales.

Además de por su composición química, los contaminantes particulados pueden clasificarse en función de su tamaño. Existe un amplio margen de tamaños que se extienden desde 6×10^{-4} a 1×10^2 μ de radio, si prescindimos de las dispersiones gaseosas, nubes, niebla y gotas de lluvia.

En cuanto a su tamaño, las partículas pueden dividirse en:

1. Iones

Partículas de tamaño inferior a 10^{-1} μ , portadoras de cargas eléctricas. Pueden estar constituidas por moléculas gaseosas o agrupaciones moleculares con un exceso o deficiencia de electrones (iones pequeños: tamaño inferior a 10^{-3} μ), o por materia particulada finamente dividida que ha perdido o ganado carga eléctrica (grandes iones: tamaño comprendido entre 10^{-3} y 10^{-1} μ).

La formación de los iones pequeños se debe a la acción directa de las radiaciones, solar, cósmica o radiactiva, mientras que los grandes iones se producen por combinación de los iones pequeños con las partículas de los aerosoles o con las gotas de agua en la atmósfera. Otros procesos de generación de iones en menor cuantía son la combustión, fusión de metales, pulverización de líquidos. Debido a esta diversidad de procesos, la naturaleza química de los iones es muy diversa.

La concentración atmosférica de iones varía entre las diferentes estaciones climatológicas, habiendo mayor cantidad en verano que en invierno en el caso de los iones pequeños, y a la inversa con los grandes iones. También entre los diferentes períodos del día se pueden observar diferencias, con valores máximos al principio de la mañana y mínimos al inicio de la tarde.

Estas partículas pequeñas implican un importante riesgo para la salud debido a su facilidad para penetrar en los pulmones.

2. Materia suspendida

Este tipo de materia se divide en dos grupos:

2.1. Núcleos de Aitken

Son núcleos de condensación activa responsables de las gotitas que dan lugar a las nubes. Su tamaño está comprendido entre el 0,005 μ y 0,1 μ .

Los procesos de formación de este tipo de materia particulada pueden tener bien un origen natural, emitiéndose en incendios forestales, tormentas de polvo, actividad volcánica, evaporación del agua del mar pulverizada, efecto de radiaciones alfa, beta, gamma, ultravioleta, o bien origen antropogénico, produciéndose la formación de núcleos Aitken en los procesos de combustión fundamentalmente.

La composición química es muy variada, predominando especialmente compuestos orgánicos e inorgánicos, como el cobre, manganeso y sodio. La concentración atmosférica de estos núcleos presenta un ritmo diario, obteniéndose un valor mínimo en las últimas horas de la noche, aumentando durante el día, para posteriormente decrecer después de la puesta de sol.

2.2. Materia particulada suspendida

Este grupo está constituido por los aerosoles. En general, son partículas sólidas o líquidas dispersas en un medio gaseoso o en la atmósfera. Su tamaño se encuentra comprendido entre 0,1 y 10 μ de radio, lo que les otorga una velocidad de sedimentación muy baja, permaneciendo suspendidas gran cantidad de tiempo y siendo arrastradas por las corrientes de aire lejos de su lugar de emisión.

Los procesos de formación, al igual que en los núcleos Aitken, pueden ser naturales o antropogénicos. Los aerosoles naturales, según su procedencia, se pueden clasificar en continentales y marinos. Estos últimos están constituidos por partículas cuyo componente principal es el cloruro sódico, formándose al evaporarse la espuma del mar.

Los aerosoles continentales, según su forma de introducción en la atmósfera, se dividen a su vez en: aerosoles continentales, primarios cuando se introducen directamente en la atmósfera por alguna fuente y secundarios si se forman por reacciones en la atmósfera. Entre los aerosoles continentales primarios se encuentran las partículas de polvo levantadas por el viento y las emitidas en erupciones volcánicas o incendios forestales. Entre los aerosoles continentales secundarios se pueden citar las formaciones de partículas finas de $<0,4$ μ , originadas en las reacciones de determinados tipos de hidrocarburos (tipo terpenos) emitidos por la vegetación con el O_3 , así como las originadas en las transformaciones de ciertos gases como pueden ser el SH_2 , NH_3 y NO_x cuando se transforman en sulfatos, amonio y nitratos o nitritos, respectivamente.

La composición química de la materia particulada suspendida depende de las características de la zona contaminada; sin embargo, en casi todas las áreas urbanas están presentes unos determinados componentes. Así, la fracción inorgánica está compuesta, fundamentalmente, por sulfatos, nitratos, hierro y plomo. En cuanto a la fracción orgánica, ésta tiene un elevado contenido en hidrocarburos aromáticos policíclicos, originados en la combustión o pirólisis de los combustibles de naturaleza carbonada.

3. Materia sedimentable

Está constituida por partículas sólidas de tamaño comprendido entre 10 y $5 \times 10^2 \mu$. Es, por tanto, «polvo grueso» que tiene una velocidad de sedimentación apreciable y tiempo de permanencia en la atmósfera relativamente corto.

Los componentes químicos más usuales en el polvo sedimentable son las sustancias inorgánicas, fundamentalmente, SiO_2 , sulfatos, cloruros, nitratos, hierro, calcio, aluminio, manganeso, plomo, cinc, magnesio y cobre. Los constituyentes orgánicos son fundamentalmente sustancias procedentes de la combustión incompleta del carbón o de los derivados petrolíferos, es decir, alquitranes e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Las partículas son eliminadas, principalmente, por retención y arrastre con las gotas de lluvia. Las partículas pequeñas son retenidas por las gotitas de agua de las nubes y posteriormente eliminadas con la lluvia. Las partículas mayores pueden ser eliminadas por el mismo proceso, o bien por arrastre directo de las gotas de lluvia.

Compuestos de azufre

Entre los compuestos de azufre cabe destacar el dióxido de azufre (SO_2), el trióxido de azufre (SO_3), sulfuro de hidrógeno (SH_2) y mercaptanos. Los óxidos de azufre se forman como consecuencia del proceso de combustión del azufre contenido en el carbón y el petróleo, la descomposición y la combustión de materia orgánica y el aerosol masivo procedente de los océanos y los volcanes.

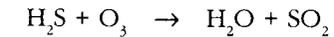
El dióxido de azufre es un gas incoloro de olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm. Es 2,2 veces más pesado que el aire, a pesar de lo cual se desplaza rápidamente en la atmósfera, siendo un gas bastante estable. Sus fuentes principales de producción son: volcanes, combustiones, fundiciones, refinerías de petróleo, etc. El SO_2 se oxida en la atmósfera a trióxido de azufre por alguno de estos dos procesos: catalítico o fotoquímico. El proceso de oxidación catalítico prevalece en condiciones muy húmedas, cuando las gotas de agua absorben fácilmente el SO_2 . La reacción es catalizada por sales metálicas presentes en las gotas de agua, con formación de sulfatos (SO_4). El proceso fotoquímico está asociado con condiciones diurnas de baja humedad.

El SO_3 , formado a partir de SO_2 , es un gas incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente. En condiciones normales no se encuentra como SO_3 ,

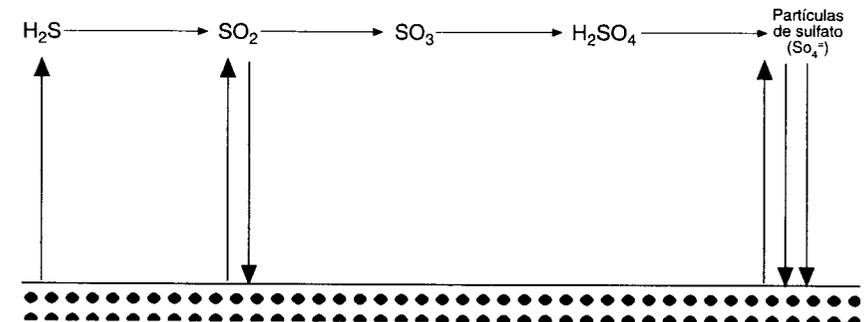
en la atmósfera, ya que reacciona casi inmediatamente con agua para dar H_2SO_4 . Éste se combina con las gotitas de agua originando una solución de sulfúrico. El H_2SO_4 reaccionará con sales y bases para dar sulfatos.

El SO_3 , formado a partir del SO_2 , y el ácido sulfúrico son, por tanto, contaminantes secundarios y dan lugar a los problemas de lluvia ácida que se comentarán en el apartado de efectos y al smog reductor.

El sulfuro de hidrógeno (SH_2) se produce de forma natural por los volcanes, las aguas sulfhídricas y algunas putrefacciones, siendo las refinerías de petróleo y las plantas de gas, junto con determinadas industrias metalúrgicas, las actividades del hombre que en mayor grado contribuyen a la emisión de SH_2 . Éste se oxida rápidamente a SO_2 . La reacción de oxidación más importante es la que se lleva a cabo con el ozono:



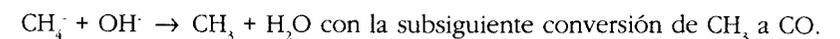
La siguiente figura resume el destino de los compuestos de azufre en la atmósfera:



Ciclo de los compuestos del azufre

Óxidos de carbono

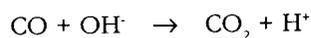
El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro e insípido, siendo un gas muy ligero que no es apreciablemente soluble en agua. Es inflamable y arde con llama azul, aunque no mantiene la combustión. Las principales fuentes naturales de producción de CO son: los océanos, incendios forestales y la oxidación del metano ambiente (CH_4) por iones hidroxilos (OH^\cdot).



En cuanto a las fuentes antropogénicas, el monóxido de carbono se origina como consecuencia de los procesos de combustión incompleta de cualquier tipo de combustible. En las zonas urbanas, la principal fuente de producción de CO son las emisiones de los vehículos automóviles, pudiéndose observar una evolución paralela entre la concentración de CO y el volumen de circulación.

Los posibles mecanismos de eliminación del CO atmosférico son:

- Reacción de CO con los radicales hidróxilos en la troposfera:



- Migración a la estratosfera y reacción con OH.
- Eliminación de CO por el suelo.

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas incoloro e inodoro, no tóxico, más denso que el aire y que se origina en los procesos de combustión. Se halla presente en atmósferas puras de forma natural, si bien la actividad humana provoca un aumento variable de su concentración.

Entre las fuentes naturales de generación de este gas se encuentran la respiración de las plantas verdes, la oxidación del CO natural y los incendios forestales, siendo la fuente antropogénica principal los procesos de combustión de combustibles fósiles (fueles y carbones). La concentración ambiental de dióxido de carbono ejerce una cierta acción sobre la temperatura media de la atmósfera por absorción de determinadas radiaciones solares.

Los compuestos de nitrógeno

Los compuestos de nitrógeno más importantes son el óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el óxido nitroso (N_2O) y el amoníaco (NH_3).

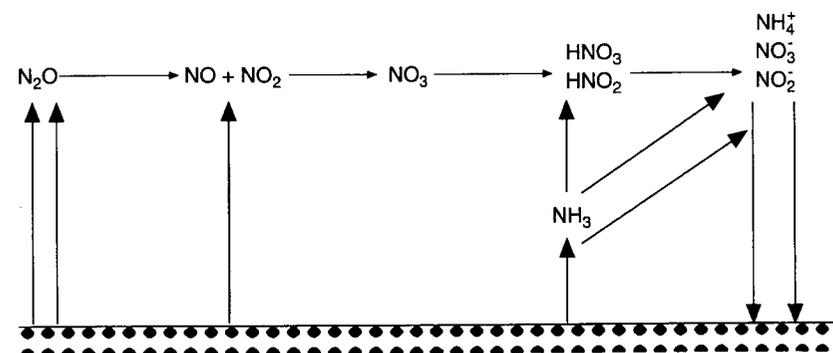
El óxido de nitrógeno (NO) es un gas incoloro, inodoro y no inflamable, pero tóxico. El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas pardo-rojizo, no inflamable, tóxico. Ambos compuestos se representan conjuntamente como NO_x . Estos óxidos de nitrógeno son compuestos naturales en la atmósfera, en donde se encuentran en muy pequeñas cantidades. Las fuentes naturales de generación de estos óxidos son los procesos biológicos en suelos, las tormentas eléctricas y, en el caso del NO_2 , la oxidación del NO natural.

En cuanto a las fuentes antropogénicas, la generación principal de óxidos de nitrógeno se produce en las combustiones a altas temperaturas,

así como en la fabricación de los ácidos nítrico y sulfúrico y en diversos procesos de nitración industrial. La fuente principal de NO antropogénico es la oxidación incompleta del nitrógeno atmosférico en los motores de combustión interna.

El amoníaco (NH_3) es un gas incoloro de carácter básico y olor característico. La presencia de niveles elevados en la atmósfera se debe a escapes accidentales de origen industrial. Las fábricas de abono, ácido nítrico y productos orgánicos son las principales fuentes de producción.

En la siguiente figura están representados los principales compuestos de nitrógeno y sus posibles transformaciones en la atmósfera, comprobándose que se pueden formar ácido nítrico (HNO_3) y nitratos (NO_3^-) como contaminantes secundarios:



Ciclo de los compuestos del nitrógeno

Los hidrocarburos

Los hidrocarburos son sustancias que contienen hidrógeno y carbono, dependiendo su estado físico de su estructura molecular y del número de átomos de carbono que forman la molécula.

Además de los hidrocarburos de alto peso molecular, presentes en la materia particulada, existe una amplia gama de compuestos orgánicos volátiles entre los que cabe destacar, desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, los que tienen de uno a cuatro átomos de carbono, ya que se encuentran en estado gaseoso a temperatura ambiente, participando en las reacciones de oxidación fotoquímica.

Las principales fuentes de emisión de estos productos son las industrias del petróleo y del gas natural, así como los vehículos, tanto por efectos de evaporación como por combustión incompleta.

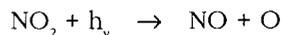
Ozono y oxidantes - smog fotoquímico

El ozono es un contaminante primario o secundario. Es un gas azulado, sobre 1,6 veces más pesado que el aire y altamente reactivo. Se forma en altitudes elevadas por reacciones fotoquímicas dependiendo, por tanto, su concentración en la atmósfera de la altitud, como ya se ha comentado en la estructura de la atmósfera. El ozono puede emitirse directamente por distintos focos, aunque siempre en muy pequeñas cantidades, o bien formarse por distintas maneras y en condiciones específicas en presencia de luz solar.

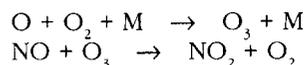
Se ha demostrado que la concentración de ozono y oxidantes sufren un ciclo repetitivo cada día, coincidiendo las concentraciones más altas con la hora de máxima actividad solar, es decir, a mediodía.

El smog fotoquímico es una mezcla de reaccionantes y productos existentes cuando ciertos hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno están presentes en una atmósfera con humedad relativa baja y en presencia de luz solar. El mecanismo de formación del smog es complicado y tiene un carácter oxidante fuerte. Se pueden resumir las reacciones existentes de la siguiente manera:

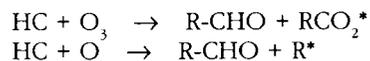
- Reacciones de iniciación:



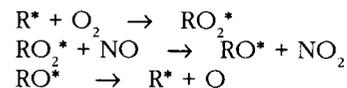
- Reacciones de formación de oxidantes:



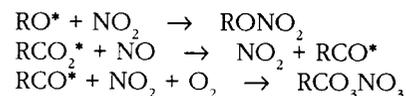
- Reacciones de formación de radicales libres:



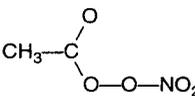
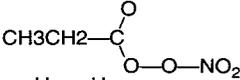
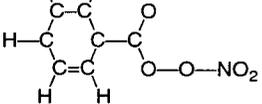
- Reacciones de ramificación:



- Reacciones de terminación:



Los diversos nitratos formados, así como el ozono y los aldehídos, son los productos del smog fotoquímico, que aparecen a continuación:

Nombre	Símbolo	Estructura
Ozono	O ₃	
Nitrato de peroxiacetilo	NPA	
Nitrato de peroxipropionilo	NPP	
Nitrato de peroxibenzoilo	NPBz	

Oxidantes fotoquímicos más comunes

El smog fotoquímico es una situación típica de contaminación oxidante, que es característica de la ciudad de Los Ángeles. Según los datos estadísticos, la emisión de contaminantes en esta ciudad se caracteriza por los gases y materia particulada procedente de los escapes de los motores de combustión interna, que alcanzan un 68 % de la totalidad de contaminantes emitidos y que están constituidos, fundamentalmente, por CO, NO_x y gases de naturaleza orgánica, fundamentalmente hidrocarburos olefinicos.

En conjunto, la gran cantidad de contaminantes emitidos, su largo período de permanencia en las capas inferiores de la atmósfera y la gran cantidad de energía solar que incide sobre la masa de aire contaminado, contribuyen a que en la atmósfera de Los Ángeles se produzcan un gran número de reacciones fotoquímicas que dan lugar a la formación de elevadas cantidades de NO_2 , O_3 , nitrato de peroxiacetileno y radicales libres orgánicos que deterioran los alimentos, secan y ennegrecen las pinturas, desintegran el caucho, producen sustancias resinosas en los derivados del petróleo, alteran la función clorofílica e irritan las mucosas oculares y respiratorias de los animales y el hombre.

En la actualidad los oxidantes fotoquímicos se presentan, cada vez con mayor frecuencia, en grandes ciudades con elevados niveles de industrialización y densidades de tráfico muy importantes.

Se manifiesta principalmente por la mañana en el entorno de las grandes ciudades, coincidiendo con la intensa emisión de los precursores de ésta (hidrocarburos y óxido nítrico) debido al encendido de calefacciones y tráfico intenso.

Compuestos halogenados

De las diferentes sustancias que contienen halógenos en su molécula, desde el punto de vista de la contaminación atmosférica cabe destacar por su poder contaminante el cloro, el fluoruro de hidrógeno, el cloruro de hidrógeno y ciertos haluros.

El cloro es un gas pesado de color amarillento, con un fuerte olor picante. Es muy reactivo y altamente irritante para las mucosas. Se utiliza generalmente en industrias químicas y plásticas, así como en plantas de potabilización de agua y las plantas depuradoras de aguas residuales.

El cloruro de hidrógeno es un contaminante habitual emitido por un gran número de industrias y actividades domésticas (tales como la incineración de plásticos clorados).

Las medidas como gases en el aire del cloruro de hidrógeno y del cloro no son muy corrientes, ya que en ambos casos su toxicidad no es muy elevada y, por lo general, se encuentran presentes en el aire en concentraciones relativamente bajas si se comparan con otros gases ácidos, como el dióxido de azufre.

El fluoruro de hidrógeno es el compuesto halogenado más importante como contaminante de la atmósfera. El origen de la aparición del FH y de los fluoruros en la atmósfera es consecuencia fundamental de emisio-

nes de ciertas actividades industriales, como la metalurgia del aluminio y la fabricación de fertilizantes fosfatados y de cemento y, en menor medida, la combustión de carbón mineral.

En ambiente urbano, la concentración normal de FH oscila entre 0,18 y 1,8 ppm, mientras que en los alrededores de las plantas fertilizantes pueden encontrarse fluoruros hasta valores de 4,3 ppm.

Metales pesados

Los metales pesados son elementos metálicos de masa atómica relativamente elevada y alta densidad. Al hablar de contaminación se suelen incluir en este grupo otros elementos que no cumplen alguna de estas condiciones, pero que se comportan de la misma manera con respecto al medio ambiente: son persistentes en el medio y bioacumulativos en los seres vivos.

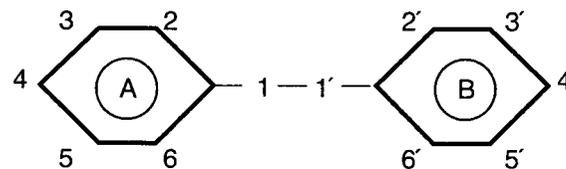
Entre los metales pesados más importantes de cara a la contaminación atmosférica están el mercurio, el cadmio, el cromo, el cobre, el cinc, el arsénico (no es un metal, pero se considera en este grupo por sus efectos), el plomo, etc.

En general, se encuentran en la atmósfera en concentraciones muy bajas, en forma de partículas. Algunos metales y sus compuestos tienen una presión de vapor lo bastante elevada como para presentarse en estado gaseoso en el aire, como por ejemplo el mercurio y algunos compuestos orgánicos del plomo, como el tetraetilo de plomo, que se utiliza como antidetonante en la gasolina.

En general, la contaminación por metales pesados se produce en zonas cercanas al foco que las produce.

Policlorobifenilos (PCB's)

Los bifenilos clorados son un grupo de compuestos órgano clorados muy numeroso, cuya estructura general es la siguiente:



Su fórmula general es $C_{12}H_{10-x}Cl_x$, pudiendo ser sustituidos los 10 átomos de hidrógeno por átomos de cloro. Existen 209 combinaciones posibles.

Su estado físico normal es líquido, dependiendo su viscosidad del porcentaje de cloro que incluye su molécula. Son compuestos estables, termorresistentes e incombustibles, poseen una presión de vapor baja y tienen una elevada constante dieléctrica.

Son compuestos de elevada toxicidad (DL50 en ratas = 1,6 g/Kg), persistentes en el medio ambiente y de escasa biodegradabilidad, lo que les hace susceptibles de bioacumulación. Las vías de riesgo son la inhalación de humos que contengan PCB's y los policloroterfenilos (PCT's), la ingestión y el contacto con los ojos o la piel.

Su producción industrial se realiza desde 1930, y se produce mediante la cloración controlada del difenilo y trifenilo, en presencia de algún catalizador. Las características mencionadas anteriormente les han proporcionado una extensa aplicación industrial, sin embargo, su principal aplicación ha sido como aislante en condensadores eléctricos y transformadores.

La existencia de casos de intoxicación durante los primeros años de su fabricación, así como las consecuencias de diversos accidentes industriales ocurridos con estos productos, que han supuesto un serio peligro para la salud y el medio ambiente, han llevado a la promulgación de disposiciones legales que limitan el uso de diversas sustancias y preparadas industriales que los contienen, así como a la definición de los sistemas de eliminación más adecuados.

En los accidentes de explosión o incendio de condensadores eléctricos se puede producir la emisión de cloro, así como de otros compuestos clorados como dioxinas y furanos.

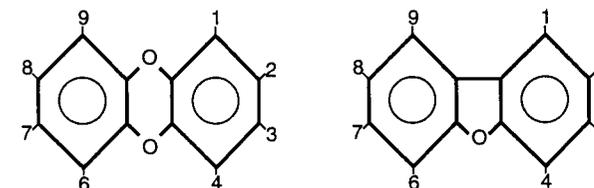
Las concentraciones medidas en el aire de PCB's y PCT's, se encuentran en el orden de 1 a 50 mg/m³, habiéndose determinado hasta 60 mg/m³ en determinados casos de incendios.

Dioxinas y furanos

Este tipo de sustancias se pueden encuadrar dentro de los denominados microcontaminantes. A partir del año 1949, y a consecuencia de diversos accidentes industriales relacionados con la fabricación de fenoles clorados, estos compuestos han despertado un gran interés en algunos sectores de la sociedad debido a su potencial tóxico, lo que actualmente

se refleja en la incorporación de límites de emisión específicos en las legislaciones de determinados Estados.

Se conoce por dioxinas y furanos a una familia de compuestos aromáticos clorados tricíclicos, con propiedades químicas similares. Las dioxinas se diferencian de los furanos en la cantidad de átomos de oxígeno presentes en la molécula, encontrándose un átomo de oxígeno en los furanos y dos en las dioxinas. Las estructuras básicas de estos compuestos son las siguientes:



Dibenzo-para-dioxina

Dibenzofurano

Estructuras de dioxinas y furanos

Las posiciones numeradas pueden ser ocupadas tanto por átomos de hidrógeno como de cloro. La suma de átomos de cloro e hidrógeno en el interior de la molécula de las dioxinas y furanos es igual a ocho.

Se conocen un total de 75 isómeros de dioxinas, llamadas genéricamente policlorodibenzo-para-dioxinas (PCDD), y 135 de furanos, llamados policlorodibenzofuranos (PCDF), dependiendo de la cantidad de átomos de hidrógeno que son sustituidos por átomos de cloro y su posición en el interior de la molécula. Existe mayor número de PCDFs que de PCDDs, ya que el único átomo de oxígeno hace que la molécula de furano sea menos simétrica que la correspondiente de dioxina y, por tanto, existe un mayor número de posibilidades de sustitución.

Las características físico-químicas de estos compuestos, se pueden resumir en que son poco solubles en agua ($< 0,12$ ppb), decreciendo la solubilidad cuanto mayor es el número de átomos de cloro que presenta la molécula; sin embargo, son un poco más solubles en disolventes y grasas. Tienen una presión de vapor de $6,2 \times 10^{-7}$ Pa., característica ésta que les hace poco volátiles. Son estables a la descomposición térmica por debajo de los 850° C, y se descomponen rápidamente por acción de la luz en presencia de hidrógeno. Sin embargo, cuando se incorporan al suelo o a las corrientes hídricas son prácticamente inalterables, persistentes y bioacumulativos.

La emisión de dioxinas y furanos a la atmósfera proviene fundamentalmente de la combustión de compuestos orgánicos clorados. Los mecanismos de formación no se conocen muy bien.

El Center for the Biology of Natural Systems (CBNS) propone los siguientes mecanismos de formación de dioxinas y furanos en los incineradores de residuos:

- La combustión de plásticos que contienen cloro, como el PVC, produce ácido clorhídrico.
- La combustión incompleta de la lignina, procedente de los residuos derivados de la madera (papel, cartón, etc.), produce compuestos fenólicos.
- La reacción entre los compuestos fenólicos y el ácido clorhídrico produce dioxinas y furanos.

Todos estos mecanismos parece que se pueden producir tanto en fase gaseosa únicamente como en fase gaseosa y sólida a la vez.

En la fase gaseosa, diversos autores han constatado la formación de dioxinas a partir de los precursores de tipo fenólicos clorados mencionados anteriormente, existiendo un cierto equilibrio entre las reacciones de formación y descomposición a elevadas temperaturas. Sin embargo, en las zonas de la instalación de incineración que se encuentran a temperaturas más bajas, en un rango de 250 a 450° C aproximadamente, aquellas reacciones pueden disminuir su probabilidad de ocurrencia y, dependiendo a su vez de que las partículas actúen o no como catalizador de las mismas, llevarse a cabo fundamentalmente en fase heterogénea (sólida y gaseosa) sobre la superficie de las cenizas volantes.

CONTAMINANTES DEL AGUA

La clasificación de los contaminantes del agua contempla las características de las sustancias o parámetros más comunes, agrupados en tres bloques según sean físicos, químicos y biológicos.

Contaminantes físicos

Las características definidoras de los fenómenos físicos aparecidos por la existencia de episodios de contaminación en el medio hídrico propor-

cionan información complementaria e independiente a la aportada por los componentes químicos o biológicos detectados también en él. Muchos de los parámetros aquí incluidos como son el color, la turbidez, la conductividad y el pH, satisfacen inequívocamente esta categoría, junto con los demás, pero no siempre pueden considerarse por separado de la composición química del agua contaminada propia de ese momento.

Aspecto

El aspecto del agua es una de las características principales que inciden sobre el uso o rechazo del agua para beberla. Ésta debe ser incolora y sin sustancias en suspensión a simple vista para tener la aceptación de la población.

El aspecto se refiere, por tanto, entre otras cosas, a la presencia de color, turbidez, sólidos en suspensión, larvas, sedimentos o partículas similares detectables *de visu*.

Dada la subjetividad de interpretación de este parámetro, siempre que sea posible debe de ir acompañado de valores numéricos sobre el color, la turbidez o los sólidos en suspensión, parámetros todos ellos que serán expuestos a continuación.

Color

El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. El agua pura sólo es azulada en grandes espesores. No se puede atribuir a ningún constituyente en exclusiva, aunque ciertos colores en aguas naturales son indicativos de la presencia de ciertos contaminantes.

El color puro, eliminada la turbidez, es el debido exclusivamente, a sustancias disueltas. Además se tiene el llamado «color aparente», que es el color resultante tanto por las sustancias disueltas como por las materias en suspensión. Los colores real y aparente son aproximadamente idénticos en el agua clara y en las aguas de turbidez muy débil.

Las sustancias presentes en las aguas naturales productoras de color son de muy variada naturaleza, proporcionando cada una y en conjunto las diversas tonalidades observables.

La coloración de un agua natural, no polucionada, está causada principalmente por la presencia de sustancias húmicas que le proporcionan el color amarillo, compuestos de hierro que le dan colores rojizos, así

como tonalidades negras debidas a la presencia de manganeso. También el contenido en fitoplancton puede afectar a este parámetro del agua.

Turbidez

La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos e incluso microorganismos, que se presentan principalmente en aguas superficiales.

La transparencia de una masa natural de agua es un factor decisivo para la calidad y productividad de los ecosistemas que contienen, ya que las aguas turbias impiden la penetración de la luz, y con ello disminuye la incorporación de oxígeno disuelto por la fotosíntesis que realizan los productores primarios.

Olor

El olor, junto con el gusto, son determinaciones organolépticas de carácter subjetivo para las cuales no existen instrumentos de observación, ni registro, ni unidades de medida.

A través del sentido del olfato puede detectarse la presencia de sustancias que están en el agua en mínimas cantidades.

Un agua destinada a la alimentación debe ser completamente inodora. En efecto, todo olor es un signo inequívoco de contaminación o de la presencia de materias orgánicas en descomposición.

Sabor

Este parámetro no suele emplearse, debido fundamentalmente a cuestiones de seguridad médica, ya que suele ser común el desconocimiento *a priori* del origen de la potencial contaminación, careciéndose de unas garantías físico-químicas y biológicas mínimas. El agua destinada a ser bebida debe ser insípida.

El gusto define solamente las sensaciones gustativas, designadas como amargas, saladas, ácidas y dulces, resultantes de la estimulación química de las terminaciones nerviosas sensitivas de las papilas de la lengua y del paladar blando. En cambio, en el concepto de sabor intervienen más órganos sensoriales, ya que abarca un complejo de sensaciones olfativas,

gustativas y táctiles, originadas por los estímulos de las terminaciones nerviosas localizadas en la lengua y en las cavidades nasal y bucal.

Las aguas adquieren un sabor salado a partir de los 300 ppm de Cl^- ; y el amargo con más de 450 ppm de SO_4^{2-} . El CO_2 libre le da un gusto picante, y trazas de fenoles u otros compuestos orgánicos le confieren un olor y sabor desagradables.

Temperatura

La temperatura es una de las constantes físicas que tienen más importancia en el desarrollo de los diversos fenómenos que se realizan en el seno del agua, y determina la evolución o tendencia de sus propiedades, ya sean físicas, químicas o biológicas.

La temperatura desempeña un papel muy importante en la solubilidad de las sales, y principalmente de los gases, por lo tanto, también en la conductividad y en la determinación del pH, sobre todo.

Un incremento de más de 3° C en una zona respecto de las adyacentes, sería síntoma de que se está produciendo una contaminación térmica, es decir, se está produciendo un vertido de aguas más calientes que las del medio receptor.

Conductividad

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es, por tanto, indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. Ésta proviene de un ácido, una base o una sal, disociadas en iones.

El agua pura contribuye mínimamente a la conductividad medible, siendo su casi totalidad el resultado del movimiento de los iones de las impurezas presentes.

La temperatura modifica mucho la conductividad de una solución. Como ejemplo, baste señalar que una disolución de Cl^- que contenga 10 miliequivalentes por litro duplica su conductividad al pasar su temperatura de 0° C a 25° C. Este hecho ha creado la necesidad de reducir las medidas de la conductividad a una temperatura única, con el fin de que puedan ser comparables.

La conductividad y la dureza de las aguas también son dos parámetros cuyos valores están, en general, bastante relacionados, ya que las sa-

les de calcio y magnesio son las más abundantes en la naturaleza y, en ausencia de aportes ajenos al sustrato por el que discurren, la conductividad de las aguas se debe a la concentración de las sales de estos dos cationes en las mismas.

La conductividad y la dureza reflejan, a su vez, el grado de mineralización de las aguas y su productividad potencial, siendo utilizados con frecuencia como criterios de clasificación de las aguas naturales.

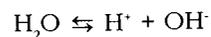
Nisbet y Verneaux (1970) clasifican las aguas según estos dos parámetros en:

- Aguas con una mineralización muy débil y escasa productividad, cuya conductividad es inferior a 10 $\mu\text{mhos/cm}$ y su dureza inferior a 20 $\text{mg/l CO}_3\text{Ca}$.
- Aguas con una mineralización débil y productividad media, cuya conductividad oscila entre 20 y 80 $\mu\text{mhos/cm}$ y su dureza entre 20 y 40 $\text{mg/l CO}_3\text{Ca}$.
- Aguas con una mineralización moderada y alta productividad, cuya conductividad oscila entre 80 y 200 $\mu\text{mhos/cm}$ y su dureza entre 40 y 110 $\text{mg/l de CO}_3\text{Ca}$.
- Aguas con una fuerte mineralización y algo duras, cuya conductividad oscila entre 200 y 400 $\mu\text{mhos/cm}$ y su dureza entre 110 y 200 $\text{mg/l de CO}_3\text{Ca}$.
- Aguas con una mineralización muy fuerte y muy duras, cuya conductividad oscila entre 400 y 800 $\mu\text{mhos/cm}$ y su dureza entre 200 y 300 $\text{mg/l CO}_3\text{Ca}$.
- Aguas con una mineralización y dureza excesivas, cuya conductividad es mayor de 800 $\mu\text{mos/cm}$ y su dureza mayor de 300 $\text{mg/l CO}_3\text{Ca}$.

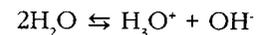
Resumiendo lo expuesto hasta este momento, se puede decir que la conductividad es un parámetro que sirve como indicador de la mineralización del agua.

pH

Las moléculas de agua están parcialmente dissociadas en iones hidronio (H^+) e iones hidróxilo (OH^-):



Los iones hidronio no existen en solución, sino que nada más formarse se unen a una molécula de agua por medio de un puente de hidrógeno para formar el ión H_3O^+ ; así pues, tenemos:



A la ecuación anterior se le aplica la ley de acción de masas y se obtiene:

$$\frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} = K_W$$

siendo K_W una constante que depende de la temperatura.

El número de iones $[\text{H}_3\text{O}^+]$ es igual al de iones $[\text{OH}^-]$ en un agua neutra, y como para $K_{W_{\text{H}_2\text{O}}}$ se ha encontrado un valor de $1.008 \cdot 10^{-14}$ a 25°C , tenemos que la concentración de iones hidronio e hidróxilo en un agua neutra es igual (10^{-7}).

Se utiliza la notación de pH como medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa.

Se expresa como la concentración de iones hidronio, y se define como:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

es decir, que:

$$\begin{aligned} \text{pH} = 7 & \text{ tenemos un medio neutro} \\ \text{pH} < 7 & \text{ medio ácido} \\ \text{pH} > 7 & \text{ medio básico} \end{aligned}$$

El pH del agua natural depende de la concentración de anhídrido carbónico, consecuencia de la mineralización de las sales presentes en el agua.

Dado el poder tampón del agua, y salvo en el caso de vertidos industriales particulares, es raro que el pH del agua alcance valores en contradicción con su potabilidad.

El pH de las aguas naturales se debe a la composición de los terrenos atravesados, así pues, el pH alcalino indica que éstos son calizos, y un pH ácido que son silíceos. Los valores de pH compatibles con la vida de las especies acuáticas está comprendido entre 5 y 9, situándose los más favorables entre 6 y 7,2.

Un incremento del pH alcalino acompañado de un color verde parduzco suele ser debido a un *bloom* de fitoplancton, que altera el ciclo carbonatos-bicarbonatos.

En un vertido con pH ácidos, se disuelven los metales pesados, y con pH alcalinos precipitan.

Sólidos

Los sólidos pueden afectar negativamente a la calidad del agua o al suministro para su consumo de varias maneras. Las aguas con abundantes sólidos disueltos suelen ser de inferior palatabilidad, y pueden inducir una reacción fisiológica desfavorable en el consumidor ocasional.

Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales, y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan sus vertidos.

Se definen los sólidos totales como los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida. Los sólidos totales incluyen los sólidos suspendidos, o porción de sólidos totales retenidos por un filtro, y los sólidos disueltos totales, o porción que atraviesa el filtro.

El tipo de material de que está hecho el filtro, el tamaño del poro, el área y el espesor del filtro, así como la naturaleza física, el tamaño de las partículas y la cantidad de material depositado en el filtro, son los factores principales que afectan a la separación de los sólidos suspendidos y los disueltos.

Otro tipo de sólidos son los denominados fijados, expresión aplicada a los sólidos totales, suspendidos o disueltos después de someterse a ignición durante un tiempo determinado y a una temperatura especificada. La pérdida de peso por ignición se debe a la pérdida de sólidos volátiles. La determinación de sólidos fijados y volátiles no distingue exactamente entre materias orgánica e inorgánica, ya que la pérdida por ignición no se limita sólo al material orgánico.

El origen de los sólidos disueltos puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas superficiales como subterráneas. Aunque para las aguas potables se indica un valor máximo deseable de 500 ppm, el valor de los sólidos disueltos no es por sí solo suficiente para determinar la bondad del agua. En los usos industriales, la concentración elevada de éstos puede interferir en los procesos de fabricación, o como causa de espuma en las calderas.

El contenido de materias en suspensión es muy variable según los cursos de agua, de hecho todos las contienen, variando mucho en función del origen. En el caso de las aguas subterráneas, éstas suelen tener menos de 1 ppm.

En general, el contenido en sólidos en suspensión está en función de la naturaleza de los terrenos atravesados, de la pluviometría y de los vertidos al cauce, entre otros factores. No ocasionan problemas mayores si se encuentran en algunos miligramos por litro; sin embargo, contenidos mayores pueden impedir la penetración de la luz, disminuir el oxígeno disuelto y limitar entonces el desarrollo de la vida acuática.

Generalmente, la concentración de compuestos minerales orgánicos y de contaminantes biológicos es más elevada en las materias en suspensión y en los sedimentos que en el agua. Las arcillas y las partículas orgánicas con una gran superficie de adsorción constituyen un soporte para iones, moléculas y los agentes biológicos. A causa de esto, pueden llegar a ser un vector para la penetración de estos productos en las cadenas tróficas.

Cuando las condiciones del medio hídrico se vuelven anóxicas, los metales pesados complejados con las arcillas o la materia orgánica se redisuelven y pasan a la lámina de agua.

Contaminantes químicos

Un número importante de elementos, compuestos y sustancias que, dependiendo de las condiciones físico-químicas del medio hídrico, pueden llegar a convertirse en contaminantes químicos del mismo, son miembros integrados en algunas de las etapas que estructuran el desarrollo de los ciclos biogeoquímicos principales.

Por este motivo se tratan éstos en primer lugar y, a continuación, se hablará de otros contaminantes químicos encuadrados como inorgánicos, orgánicos y microcontaminantes.

Los principales ciclos biogeoquímicos

En el medio hídrico, determinados elementos desarrollan un ciclo biogeoquímico que está marcado por las propiedades del elemento, por la de sus compuestos y por las fuentes naturales origen de ambos.

Los ciclos están movidos por el consumo de nutrientes de las plantas, por la degradación de restos de plantas y animales muertos, por la ero-

sión climatológica de las rocas, por el arrastre, solubilización y sedimentación de los materiales erosionados.

Los elementos más importantes y cuyos ciclos presentan mayor interés biogeoquímico son el carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre. La gran fuente de carbono y nitrógeno es la atmósfera, la de el fósforo son los fosfatos existentes en la corteza terrestre y la del azufre los sulfatos.

El estado de cada elemento dentro de su ciclo correspondiente depende fundamentalmente del medio hídrico, es decir, la intervención de los componentes reductores u oxidantes depende de la concentración de oxígeno disuelto, del pH, del potencial redox, la temperatura, la turbidez, etc.

Las características químicas de las aguas naturales, incluida su contaminación, difícilmente se podrá interpretar sin tener presentes los ciclos biogeoquímicos de los elementos mencionados.

1. Compuestos del carbono

El carbono es el elemento que forma parte de todos los compuestos orgánicos vivos y muertos, lo que hace que tenga una gran importancia en los fenómenos que se desarrollan en el agua. Si a esto unimos que el sistema ácido carbónico-bicarbonatos-carbonatos (fundamentalmente de calcio y magnesio) es el que regula normalmente la acidez y la alcalinidad de las aguas no polucionadas, se llega a la conclusión de que los compuestos de carbono desempeñan un importante papel en la química del agua.

En el proceso de descomposición aerobia, el oxígeno se combina con los elementos hidrógeno, azufre, nitrógeno, fósforo, etc.; en particular, el carbono se transforma en anhídrido carbónico. Durante esta descomposición bioquímica aparecen productos intermedios que sirven de indicadores de la importancia del proceso.

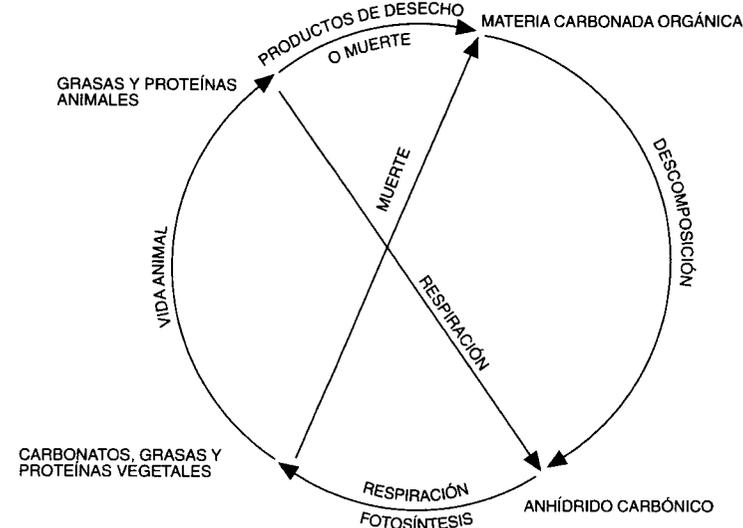
Estos productos de la descomposición terminan integrándose en la materia viva, los vegetales y animales.

A continuación se detalla específicamente, la participación del anhídrido carbónico y las sales del ácido carbónico en el ciclo comentado.

1.1. Anhídrido carbónico

El anhídrido carbónico (CO_2) disuelto en el agua tiene su origen principalmente en la respiración (consumo de O_2) de los organismos y mi-

croorganismos que se encuentran en el sedimento y en el agua, así como en la descomposición de la materia orgánica. Concretamente, en el agua hay un incremento de anhídrido carbónico por las noches debido a que por la falta de luz no se realiza la función clorofílica, no aportándose oxígeno al medio.



Ciclo del carbono (Catalán, 1981)

El anhídrido carbónico es uno de los elementos causantes de la agresividad o de las incrustaciones en el agua. Desde el punto de vista industrial, el empleo de un agua exige una buena evaluación del equilibrio carbónico, en particular para las canalizaciones y los generadores de vapor.

1.2. Sales del ácido carbónico

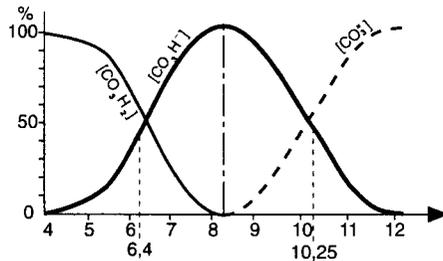
Para el estudio del sistema agua - ácido carbónico (CO_3H_2) - bicarbonato (CO_3H^-) - carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$) hay que tener en cuenta el pH del medio, como se recoge en la figura adjunta.

Se observa que el dominio de los bicarbonatos está comprendido entre los pH 4,3 y 12,6. A un pH inferior a 4,3 no habrá en solución más que ácido carbónico libre. Por otra parte, los carbonatos no aparecerán más

que en el momento en que desaparezca el ácido carbónico, es decir, un pH superior a 8,3. Los carbonatos precipitan fácilmente en presencia de iones calcio.

Estos iones contribuyen fundamentalmente a la alcalinidad del agua, que es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos.

Las aguas dulces suelen contener entre 50 y 350 ppm de ión bicarbonato, mientras que el agua de mar tiene unas 100 ppm.



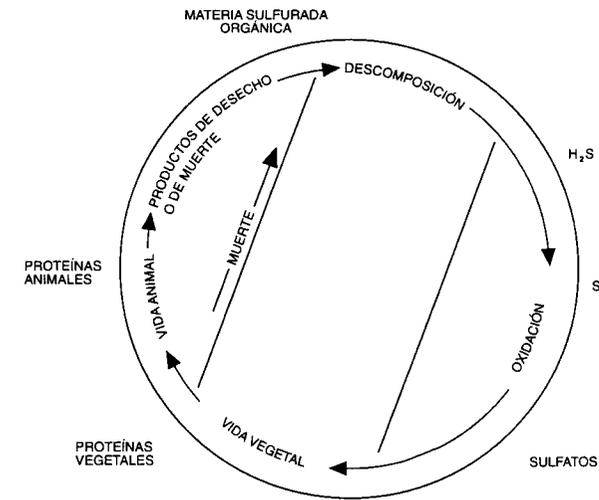
Sistema agua - ácido carbónico - bicarbonato - carbonatos (Catalán, 1981)

2. Compuestos del azufre

Como ocurre con otros elementos de importancia biológica, el azufre presenta un ciclo bioquímico, el llamado ciclo del azufre (véase la figura de la página siguiente). A partir de la materia orgánica descompuesta y oxidándose el azufre contenido en ella, se producen sulfatos, que a su vez son usados por la vida vegetal, de la cual depende, a su vez, la vida animal. Como consecuencia, se elaboran a su costa proteínas azufradas, vegetales y animales. Los productos de desecho y muerte de los seres vivos son degradados, produciéndose hidrógeno sulfurado y azufre, a partir de los cuales se vuelve a formar el ión sulfato, iniciándose así otra vez el ciclo.

2.1. Sulfuros

El hidrógeno sulfurado (H_2S) es un gas muy soluble en el agua, de 3,5 a 7 gr/l en condiciones normales, de olor a huevos podridos y muy venenoso. Las aguas que contengan hidrógeno sulfurado serán muy tóxicas a pH ácidos, incluso para las bacterias. La toxicidad disminuirá extraordinariamente a pH básicos.



Ciclo del azufre (Catalán, 1981)

Proviene de la reducción de los sulfatos, aparte de lo ya comentado en el ciclo.

2.2. Sulfatos

El ión sulfato (SO_4^{2-}) es uno de los iones que contribuyen a la salinidad de las aguas, encontrándose en la mayoría de las aguas naturales. Las aguas dulces contienen de 2 a 150 ppm, y el agua de mar cerca de 3.000 ppm.

El origen de los sulfatos se debe fundamentalmente a la disolución de los yesos, dependiendo su concentración de los terrenos drenados.

Los sulfatos son, después de los bicarbonatos y de los silicatos, los elementos principales de las aguas continentales, siendo muy importante el conocimiento del contenido de este ión para la utilización de las mismas.

El ión sulfato se encuentra disuelto en las aguas debido a su estabilidad y resistencia a la reducción. Aunque en agua pura se satura a unos 1.500 ppm, como SO_4Ca , la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

bacteriana de las materias orgánicas, principalmente de las eliminadas por los animales.

En las aguas superficiales y subterráneas la concentración de nitratos tiende a aumentar hoy día, como consecuencia del incremento del uso de fertilizantes y del aumento de la población.

Desde el punto de vista de la potabilidad, las normas actuales admiten hasta 50 mg/l de nitratos, ya que en concentraciones superiores se cree que son perjudiciales para la salud.

4. Compuestos del fósforo

El fósforo disuelto en el agua puede proceder o bien de ciertas rocas, como el apatito, o del lavado en los suelos, en cuyo caso puede tener su origen en un pozo negro o un estercolero, dependiendo la concentración de fósforo de un agua superficial de la densidad de población, ganadería, uso de abonos, etc.

El fósforo se encuentra en el agua como fósforo orgánico o inorgánico, disuelto o en suspensión.

En la actualidad, todos los científicos están de acuerdo en que el fósforo es un factor limitado en el crecimiento del fitoplancton. Así como para el nitrógeno y el carbono existen mecanismos externos que regulan su concentración en el agua, no ocurre lo mismo con el fósforo, ya que éste no tiene ciclo atmosférico debido a su tensión de vapor, que es muy pequeña. Su ciclo se representa en la figura adjunta.

Uno de los perjuicios producidos por los fosfatos es que favorecen la eutrofización, lo cual trae como consecuencia el aumento en el medio de materias orgánicas, bacterias heterótrofas, que modifican el carácter fisicoquímico del agua, y hacen que disminuya el oxígeno disuelto.

Una acción muy importante de los fosfatos es que ejercen ésta en el transporte y retención, por complejación, de los metales en el agua.

Contaminación inorgánica

Además de los compuestos inorgánicos que intervienen en los ciclos bioquímicos anteriormente expuestos y de los metales pesados que se exponen en el apartado de microcontaminantes, cabe comentar lo siguiente:



Ciclo del fósforo (Catalán, 1981)

1. Oxígeno disuelto

El origen del oxígeno disuelto en el agua es debido a las turbulencias de este medio en la interfase aire-agua, y a la producción fotosintética.

La solubilidad del oxígeno en el agua se debe a varios factores, en particular a la temperatura, a la presión atmosférica y a la salinidad.

Cuando la temperatura se eleva, el contenido de oxígeno disminuye en razón de su pequeña solubilidad, pero también a causa del consumo aumentado por los seres vivos y las bacterias que se multiplican. Estas modificaciones pueden ocasionar gusto y olor desagradables.

En las canalizaciones metálicas, un contenido inferior a 5 mg/l de oxígeno disuelto ocasionará la corrosión de la misma.

2. Cloruros

Los contenidos de cloruros de las aguas son extremadamente variables, y se deben principalmente a la naturaleza de los terrenos drenados.

El gran inconveniente de los cloruros es el sabor desagradable que comunican al agua. También pueden corroer las canalizaciones y depósitos. Además, para el uso agrícola, los contenidos en cloruros del agua pueden limitar ciertos cultivos.

Los cloruros, muy fácilmente solubles, no participan en los procesos biológicos, no desempeñan ningún papel en los fenómenos de descomposición y no sufren, pues, modificaciones.

Cuando se comprueba que hay un incremento del porcentaje de cloruros, hay que pensar que hay contaminación de origen humano.

Contaminación orgánica

Como compuesto orgánico se designa a un amplio sector de compuestos químicos que tienen en común en que su constitución interviene siempre el carbono. Son, pues, los compuestos del carbono, aunque haya que exceptuar el propio carbono en sus distintas formas, sus óxidos, el ácido carbónico y sus sales, los carburos, los cianuros y algunos otros compuestos carbonados que son completamente inorgánicos.

La estructura de los seres vivos está constituida principalmente por estas moléculas. De los múltiples elementos que se pueden hallar en ellas, el carbono, el hidrógeno y el oxígeno son, por este orden, las más importantes, seguidas por el fósforo, el nitrógeno y el azufre.

La contaminación orgánica es la más importante en magnitud, y sus principales fuentes son de origen doméstico, industrial, agrícola y ganadero.

Los principales productos que componen la de origen doméstico son papeles, deyecciones, detergentes, etc. Generalmente, estos compuestos orgánicos se descomponen mediante la acción de microorganismos que viven en el agua, los cuales los utilizan como alimento. Así, en el medio acuático tiene lugar una autodepuración, puesto que en último término las sustancias orgánicas se transforman en agua y CO_2 . Por eso se habla de materia orgánica biodegradable.

La contaminación industrial de origen orgánico puede estar constituida por compuestos similares a los domésticos que van a ser biodegradables, o por otros completamente diferentes que van a ser muy difícilmente degradables por los microorganismos.

Los tres índices más comunes a la hora de medir este tipo de contaminación de forma global son los siguientes:

- La Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).
- Carbono Orgánico Total (COT).

1. Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua, oxidables en unas condiciones determinadas.

Esta medida es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen, orgánico o mineral.

Las aguas no contaminadas tienen valores de DQO de 1 a 5 ppm, o algo superiores. Las aguas residuales domésticas suelen contener entre 250 y 600 ppm, y en las residuales industriales la concentración depende del proceso de fabricación.

2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno es una prueba que mide la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios.

Existen diversas variantes de la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno, entre ellas las que se refieren al período de incubación. La más frecuente es la determinación de DBO a los cinco días (DBO_5).

Las aguas subterráneas suelen contener menos de 1 ppm; contenidos superiores son indicativos de contaminación. En las aguas residuales domésticas se sitúa entre 100 y 350 ppm, y en las industriales depende del proceso de fabricación, pudiendo alcanzar varios miles de ppm.

La relación entre los valores de DBO y DQO es indicativo de la biodegradabilidad de la materia contaminante. En aguas residuales un valor de la relación DBO/DQO menor de 0,2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y orgánico si es mayor de 0,6.

3. Carbono orgánico total (COT)

Este parámetro, como su propio nombre indica, es la medida del contenido total en carbono de los compuestos orgánicos presentes en las aguas.

Se refiere tanto a compuestos orgánicos fijos como volátiles, naturales o sintéticos. Es la expresión más correcta del contenido orgánico total.

4. Interrelación entre estos parámetros

La presencia de carbono orgánico que no responda a las pruebas de DQO o DBO hace que éstas no sean una determinación adecuada para

estimar el contenido total en materia orgánica. El carbono orgánico total es una expresión mucho más conveniente para este fin.

Entre el COT, la DQO y la DBO pueden establecerse relaciones empíricas repetibles de forma independiente tanto para una determinada matriz como para un mismo vertido, o un mismo punto de tratamiento de un proceso, etc. Estas relaciones empíricas establecidas entre dichos parámetros no deben hacerse extensibles fuera del marco de estudio.

En cualquier caso, una de estas determinaciones no supe a las otras.

Microcontaminantes

Se puede definir un microcontaminante como aquella sustancia que se encuentra en pequeña concentración, pero cuyos efectos en el medio son amplios.

1. Microcontaminantes inorgánicos

Los microcontaminantes inorgánicos (metales traza) tienen bien definidas sus características en el medio. Son biorrefractarios, es decir, tienden a persistir en el medio ambiente indefinidamente, por lo que presentan una amenaza más seria que los compuestos orgánicos, que pueden ser más o menos persistentes. Además, aunque la concentración de un metal pesado en el agua suele ser muy pequeña, sin embargo el mayor problema que presenta al medio ambiente en general es la posibilidad de que sufra bioconcentración.

Los mecanismos que regulan la presencia de los metales traza en el agua, además, de los microorganismos que tienden a variar el pH y el potencial redox, es la solubilidad de las sales que se pueden formar de los mismos. Ahora bien, el conocimiento de esta solubilidad es muy relativa, ya que en el agua no se realiza un proceso unitario, sino que son varios los que tienen lugar simultáneamente, por lo que influirán, entre otros muchos factores, su salinidad, el efecto del ión común, fenómenos de coprecipitación, pH, etc.

2. Microcontaminantes orgánicos

Algunas características de los microcontaminantes orgánicos son su complejidad y variedad. Suelen estar ligados a fenómenos de toxicidad,

posibilidad de acumulación, modificación de los caracteres organolépticos de las aguas, y presentan dificultades para su determinación analítica.

Al igual que los metales pesados, entran en la cadena alimentaria produciendo una sucesiva bioconcentración, que en algunos organismos, especialmente los de nivel trófico más alto, ha alcanzado valores de 1.000 y 10.000 veces su concentración en el agua.

La contaminación por estos grupos de compuestos se deriva de actividades domésticas, industriales y agrícolas.

Entre los grupos más característicos de este grupo de contaminantes pueden señalarse los siguientes: hidrocarburos clorados, hidrocarburos aromático-policíclicos, fenoles, pesticidas organoclorados y organofosforados, aceites y grasas, mercaptanos, trihalometanos, detergentes, bifenilos policlorados, sustancias húmicas, etc.

A continuación se comentan someramente algunos de ellos.

2.1. Plaguicidas

Cualitativa y cuantitativamente, los plaguicidas representan, y con diferencia, la más seria amenaza al medio ambiente de los compuestos orgánicos: insecticidas, fungicidas, acaricidas, herbicidas, nematoridas, rodenticidas.

En España, según la Directiva de la CEE del año 1987, está prohibida la utilización de DDT, aldrín, dieldrín, endrín, clordano, HCH que contenga menos del 99 % del isómero gamma (lindano), heptacloro, hexaclorobenceno y toxafeno, salvo en tratamientos muy especiales.

El grado de nocividad de los plaguicidas presentes en el agua es difícil de determinar. No se tienen datos epidemiológicos.

Los principales grupos son: organoclorados, organofosforados, carbamatos, triazinas y fenoxiácidos. Los más resistentes a la biodegradación son los organoclorados, aunque también los más tolerables para los animales superiores, y los más lábiles son los organofosforados. En la mayor parte de los casos se degradan, pero los productos resultantes poseen casi la misma toxicidad.

Resulta muy difícil predecir la inercia química o biológica de un plaguicida, porque pequeñas diferencias en una misma estructura conducen a comportamientos absolutamente diferentes. Se conocen la mayor parte de los metabolitos de los plaguicidas, aunque no tanto los efectos medioambientales de su bioacumulación.

2.2. Detergentes

Los detergentes aniónicos son los más empleados: los primeros fueron los alquilbencenosulfanatos (ABS), muy resistentes a la degradación microbiana y tóxicos para la vida acuática. Este dato fue conocido hacia el año 1960, y a partir de entonces se vienen sustituyendo por los llamados alquilsulfonatos lineales (LAS), aunque parece que lentamente.

Éstos son fácilmente degradables por las bacterias, lo que quiere decir que no poseen bastante toxicidad. Influyen en este proceso el oxígeno disuelto y la dureza, el primero potenciándolo y el segundo atenuándolo, por razones hasta ahora desconocidas. En general, la longitud de la cadena de estas moléculas aumenta la toxicidad, como podría preverse.

2.3. Fenoles

Si exceptuamos las sustancias húmicas, la contribución natural a las aguas es insignificante y bastante biodegradable. Su procedencia es principalmente industrial (industria química, del carbón, celulosa, petroquímica), aunque también hay que mencionar la degradación de algunos plaguicidas.

2.4. Hidrocarburos

En las aguas continentales están presentes por fugas de oleoductos y vertidos industriales. Dan al agua un sabor y olor desagradables, lo que permite detectarlos en cantidades incluso de ppb, que además se intensifica con la cloración. La película superficial impide el intercambio gaseoso agua-aire, con el consiguiente trastorno para la vida acuática.

2.5. Bifenilos Policlorados (PCB's)

Por su fórmula son muy parecidos a los plaguicidas organoclorados: poseen núcleos aromáticos muy sustituidos con cloro. Se emplean desde 1920 en la fabricación de plásticos, papel de envolver, plaguicidas, pinturas epoxy, neumáticos, componentes eléctricos, aislantes dieléctricos (porque retardan eficazmente su combustión debido a su alta resistencia a ella), etc. Esta enorme inercia no es sólo química sino también biológica: son los microcontaminantes orgánicos más persistentes que se conocen, más incluso que el DDT.

2.6. Sustancias húmicas

Este último tipo de sustancias es el menos nocivo para el medio ambiente, de hecho procede de él. Lo constituye un número indeterminado de sustancias, muchas de ellas desconocidas, que resultan de la lixiviación de la capa orgánica del suelo, constituida por los restos más o menos transformados de las plantas (hojas y fracción leñosa, fundamentalmente).

Se han clasificado en tres grupos por su sistemática de extracción: ácidos fúlvicos, húmicos y humina. Sólo los fúlvicos, por su menor peso molecular, están disueltos en el agua. Los húmicos y la humina permanecen en el sedimento, y sólo afectan al agua a través del intercambio de cationes y de materia orgánica con ella.

Contaminantes biológicos

Los microorganismos constituyen la parte biológica de la contaminación del agua, y han sido la causa de las grandes epidemias que se han producido a lo largo de la historia de la humanidad. Como ejemplos se puede citar el tifus, el cólera, la disentería, etc. A pesar de ello no todos los microorganismos son igualmente nocivos (patógenos): algunos son inocuos y otros son de gran utilidad para la autodepuración de los ríos.

El número de bacterias patógenas para el hombre y los animales presentes en el agua es muy reducido y difícil de determinar. Por ello, y dado que la mayoría de dichos gérmenes patógenos viven en el intestino del hombre y de los animales de sangre caliente, en general la detección de una contaminación fecal constituye una excelente señal de alarma.

Los metabolitos de algas y actinomicetos emitidos en el medio hídrico pueden producir olores, sabores y turbidez.

CONTAMINANTES DE LOS SUELOS

Generalidades

Con la aparición de la edafología, el suelo deja de considerarse como un medio inerte que refleja la composición de la roca subyacente. Como ya se ha dicho, el suelo nace y evoluciona bajo la acción de los factores activos del medio, el clima y la vegetación, sobre la matriz mineral origi-

naria. El suelo, pues, atraviesa sucesivas etapas de juventud y madurez hasta alcanzar una situación de equilibrio estable con la vegetación climática.

Entre los múltiples elementos y compuestos que conforman un suelo natural se encuentran sustancias que por sus características pudieran considerarse contaminantes, pero que, salvo excepciones, se encuentran en el suelo en niveles traza. Su presencia no supone un riesgo, sino que, al contrario, muchos de ellos son nutrientes esenciales para la vegetación.

En otras ocasiones la existencia de sustancias en el medio edáfico, ajenas a él, puede conllevar serios problemas para la componente biótica del ecosistema que sustenta, de modo que estas sustancias pueden proyectarse de unos a otros seres vivos, incluso entre los indirectamente relacionados a través de la red trófica.

Se entiende por «suelo contaminado» una porción delimitada de terreno superficial o subterráneo, cuyas cualidades originales han sido modificadas por la acción humana, al incorporarse algún factor que según la clasificación de agentes contaminantes podría ser:

- Contaminación física, con variaciones en parámetros como temperatura y radiactividad.
- Contaminación biológica, al inducir la proliferación de especies o cepas patógenas o ajenas a los microorganismos presentes en el suelo de forma natural.
- Contaminación química, por adición de elementos o compuestos en concentraciones que alteren la composición originaria del suelo. Este tipo de contaminación es la predominante, y sobre ella se centran las consideraciones de este apartado.

El criterio para poder establecer el umbral máximo de concentración o cantidad permitida para cualquiera de los posibles agentes contaminantes de los suelos, debe ser su capacidad para alterar o degradar la calidad del mismo, al perder éste alguna de las características originales implicadas en el desarrollo de sus funciones dentro de los ecosistemas, generándose, por tanto, un riesgo o daño al medio ambiente.

A diferencia de lo que ocurre en los medios hídrico y atmosférico, en el suelo el contaminante es, en principio, poco móvil, con lo que los efectos diluyentes característicos de los anteriores medios en el suelo tan sólo desempeñan un papel marginal.

Hoy en día, la variedad y cantidad de productos potencialmente contaminantes de un suelo es prácticamente inabarcable, por lo que sólo se

recogen aquí los grupos más característicos y peligrosos de contaminantes químicos.

- Metales pesados

La presencia natural de los metales en el suelo es en cantidades traza, como productos de la propia geoquímica de los materiales de los que proceden, siendo muchos de ellos elementos esenciales para la vegetación y la fauna.

El riesgo potencial que su presencia provoca se produce cuando se acumulan en grandes cantidades en el suelo.

- Contaminantes inorgánicos

Los contaminantes inorgánicos presentes en los suelos de forma natural están en concentraciones reguladas por los ciclos biológicos asociados a cada suelo.

La sobresaturación de alguno de ellos hace que se alcancen concentraciones consideradas como contaminantes, alterando los ciclos de regulación.

- Contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos constituyen un grupo formado por un elevadísimo número de sustancias, en su mayoría producidas por el hombre, con gran diversidad estructural y efectos diferentes en el medio, siendo muchas de ellas altamente tóxicas.

Entre otros, pueden destacarse los compuestos aromáticos, hidrocarburos policíclicos, hidrocarburos clorados, pesticidas, etc.

Como ejemplo, en la tabla adjunta se exponen los estándares holandeses de concentración de contaminantes del suelo, debido a que ni en España ni en la mayoría de los países, existen normativas al respecto. En esta tabla se definen tres escalas de referencia en valores crecientes de contaminación, A, B y C, de acuerdo con las siguientes condiciones:

- El nivel A es un valor indicativo, de referencia, considerándose que solamente por encima de él hay una contaminación demostrable.
- El nivel B es un valor de evaluación, de forma que los contaminantes que se presenten con cifras superiores a él deben ser investigados cuidadosamente para determinar las posibilidades de utilización del suelo.
- El nivel C contempla valores por encima de los cuales el suelo debe ser saneado.

	Suelo (mg/Kg mat. seca)		
	A	B	C
METALES			
Cromo	100	250	800
Cobalto	20	50	300
Níquel	50	100	500
Cobre	50	100	500
Zinc	200	500	3.000
Arsénico	20	30	50
Molibdeno	10	40	200
Cadmio	1	5	20
Estaño	20	50	300
Bario	200	400	2.000
Mercurio	0,5	2	10
Plomo	50	150	600
COMPUESTOS INORGÁNICOS			
Amonio	—	—	—
Fluoruros	200	400	2.000
Cianuros (libre)	1	10	100
Cianuros (total)	5	50	500
Sulfuro (total)	2	20	200
Bromuro (total)	20	50	300
Fosfatos	—	—	—
COMPUESTOS AROMÁTICOS			
Benceno	0,05	0,5	5
Etilbenceno	0,05	5	50
Tolueno	0,05	3	30
Xilenos	0,05	5	50
Aromáticos (total)	0,1	7	70
Fenoles	0,05	1	10
HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS			
Naftaleno	0,1	5	50
Antraceno	0,1	10	100
Fenantreno	0,1	10	100
Fluoroanteno	0,1	10	100

	Suelo (mg/Kg mat. seca)		
	A	B	C
HIDROCARBUROS POLICÍCLICOS (Cont.)			
Creseno	—	5	50
Benzo(a)antraceno	—	5	50
Benzo(a)pireno	0,05	1	10
Benzo(k)fluoranteno	—	5	50
Indeno(123 cd)pireno	—	5	50
Benzo(ghi)perileno	—	10	100
PAH (total)	1	20	200
HIDROCARBUROS CLORADOS			
Alifáticos (indiv.)	0,1	5	50
Alifáticos (total)	0,1	7	70
Clorobenzenos (indiv.)	0,05	1	10
Clorobenzenos (total)	0,05	2	20
Clorofenoles (indiv.)	0,01	5	5
Clorofenoles (total)	0,01	1	10
PAH clorados (total)	0,05	1	10
PCB	0,05	1	10
EOX	0,1	8	80
PESTICIDAS			
Comp. org. clorados (ind.)	0,1	0,5	5
Comp. org. clorados (tot.)	0,1	1	10
Pest. no clorados (ind.)	—	1	10
Pest. no clorados (total)	0,1	2	20
OTROS COMPUESTOS			
Tetrahidrofurano	0,1	4	40
Piridina	0,1	2	20
Tetrahidrotiofeno	0,1	5	50
Ciclohexanona	0,1	6	60
Estireno	0,1	5	50
Ftalato	0,1	50	500
Oxid. PAH	1	200	2.000
Aceite mineral	100	1.000	5.000

Los residuos como agentes contaminantes de los suelos

La proximidad física del suelo hace que éste sea el lugar al que con más probabilidad vayan a parar, desechados, una buena parte de los residuos originados por la actividad del ser vivo. Éstos son rápidamente incorporados al suelo a través de procesos degradativos, es decir, son utilizados por otros seres vivos como materias esenciales para la vida, cerrándose así el ciclo natural.

El suelo es, desde siempre, el vertedero por excelencia de una buena parte de los residuos producidos por el hombre, dada su fácil accesibilidad. En un principio, eran fácilmente metabolizados y asimilados por la naturaleza, debido principalmente a que el nivel demográfico no era excesivo, la cantidad de residuos no era alarmante y la peligrosidad de los mismos no era grave, por lo que los problemas no eran demasiado importantes. Pero a medida que la sociedad fue creciendo industrialmente, sobre todo desde los últimos años del siglo pasado, en los que se produjo la revolución industrial, los residuos generados son mayores a la par que más peligrosos.

La época actual está marcada de una forma contundente por la sociedad de consumo, lo que implica la generación de una cantidad mayor de productos sofisticados, debida fundamentalmente a la máxima de «usar y tirar».

Existe, además, otro agravante, la cantidad diaria que en el planeta se genera de todo tipo de residuos. Esto supone que aunque puedan ser degradados de forma natural, el tiempo que para ello se necesitará es tan elevado que son también focos potenciales de contaminación.

Las consecuencias de este aumento de residuos son las siguientes:

- La disminución de las materias primas.
- El abandono incontrolado de los mismos origina serios problemas ambientales, ya que, como cualquier elemento más del suelo, con el concurso de los organismos vivos se incorporan los contaminantes a los procesos físico-químicos naturales.

La conclusión final es que se produce una dispersión de los contaminantes y, por tanto, a la magnificación del problema.

En este momento, se entiende por residuos aquellos productos de desecho, sólidos, líquidos y gaseosos generados en las actividades de producción y consumo que no alcanzan, en el contexto en que son producidas, ningún valor económico, pudiendo ser debido tanto a la falta de

tecnología adecuada para su aprovechamiento como a la inexistencia de un mercado para los posibles productos a recuperar.

Los residuos sólidos y los líquidos industriales especiales corresponden a este apartado, ya que son contaminantes principales de los suelos. El resto de los residuos líquidos y los gaseosos ya se han mencionado en los inmediatamente anteriores.

Los residuos o contaminantes de suelos se pueden clasificar, según sus características, del siguiente modo:

- Residuos inertes.
- Residuos urbanos y asimilables a urbanos:
 - Residuos fermentables.
 - Residuos combustibles.
- Residuos especiales:
 - Residuos tóxicos y peligrosos.
 - Residuos radiactivos.
 - Residuos biosanitarios especiales.

Clasificación de los residuos

1. Residuos inertes

Este tipo de desechos no representa un riesgo para el medio ambiente. Se incluyen en este grupo, aquellos desechos de características abrasivas: cascarilla, chatarra, fangos inertes o refractarios, vidrios, cenizas, polvos, arenas, recortes de chapa, escorias, tierras y en general todas aquellas sustancias que no necesitan de ningún tratamiento previo a su disposición en el medio ambiente.

Por regla general, se forman en grandes cantidades, pudiendo utilizarse como relleno de tierras en determinados casos.

2. Residuos urbanos o asimilables a urbanos

En este apartado se consideran los residuos fermentables (materia orgánica) y combustibles (papel, cartón, plásticos, madera, gomas, cueros, trapos, etc.) obtenidos en las distintas actividades de los núcleos de población, en sus áreas de influencia, así como, en los comedores, servicios

de empaquetación, limpieza, oficinas, etc., de los sectores industriales y de servicios (comercios, centros sanitarios, etc.).

La solución más idónea para estos residuos, con independencia de su origen, es la recogida y el tratamiento como basuras domiciliarias.

3. Residuos especiales

Están incluidos en este grupo los residuos que no pueden ser incluidos en ninguno de los apartados anteriores y que, en general, por sus características, suponen un grave riesgo para la salud humana y el medio ambiente, requiriendo, por lo tanto, un tratamiento particular y específico, así como un mayor control en su transporte y eliminación.

3.1. Residuos tóxicos y peligrosos

Los residuos tóxicos y peligrosos están catalogados como aquellos materiales sólidos, pastosos y líquidos, así como los gaseosos contenidos en recipientes que, siendo el resultado de un proceso de producción, transformación, utilización o consumo, su productor destina al desecho, y contienen en su composición determinadas sustancias o materiales constituyentes en una concentración tal que, en función de la cantidad y forma de presentación del residuo, le pueden dar a éste el carácter de peligroso.

Las distintas normativas, de manera general, siguen un procedimiento común para establecer la peligrosidad de un residuo:

- Que se encuentre catalogado como especial en la lista.
- Que contenga alguna o varias de las sustancias consideradas como tóxicas o peligrosas según la lista.
- Que al ser sometido a distintos tests de toxicidad o peligrosidad se compruebe que no supera alguno de ellos, con lo cual presentaría la característica de peligrosidad correspondiente.

En la normativa española se considera que un residuo es tóxico y peligroso cuando tiene alguno de los constituyentes del punto a), y presenta alguna de las características del b). Estos dos puntos son:

a) Constituyentes que confieren a los residuos el carácter de tóxico y peligroso:

- El berilio, compuestos de berilio.
- Los compuestos de cromo hexavalente.
- Los compuestos solubles de cobre.
- El arsénico y los compuestos de arsénico.
- El selenio y los compuestos de selenio.
- El cadmio y los compuestos de cadmio.
- El antimonio y los compuestos de antimonio.
- El telurio y los compuestos de telurio.
- El mercurio y los compuestos de mercurio.
- El talio y los compuestos de talio.
- El plomo y los compuestos de plomo.
- Los cianuros inorgánicos.
- Las soluciones ácidas y los ácidos en formas sólidas.
- Las soluciones básicas o las bases en forma sólida.
- El amianto.
- Los carbonilos metálicos.
- Los peróxidos.
- Los cloratos.
- Los percloratos.
- Los nitruros.
- Los PCB y/o PCT.
- Los compuestos farmacéuticos o veterinarios.
- Plaguicidas y otros biocidas.
- Los isocianatos.
- Los cianuros orgánicos.
- Los fenoles, compuestos fenólicos.
- Los disolventes halogenados.
- Los disolventes orgánicos no halogenados.
- Los compuestos aromáticos, los compuestos orgánicos policíclicos y heterocíclicos.
 - Los éteres.
 - Todo producto de la familia de los dibenzofuranos policlorados.
 - Todo producto de la familia de las dibenzo-paradioxinas policloradas.
 - Los productos a base de alquitrán procedentes de operaciones de refinado y los residuos alquitranados procedentes de operaciones de destilación.
 - Los aceites usados minerales o sintéticos, incluyendo las mezclas agua-aceite y las emulsiones.
 - Las sustancias químicas de laboratorio no identificables y/o nuevas, cuyos efectos sobre el medio ambiente no sean conocidas.

b) Características de los residuos peligrosos

El conjunto de características siguientes da a los residuos el rasgo de peligroso, en función de los test correspondientes:

— Explosivo

Son aquellas sustancias o preparados que pueden *explosionar* bajo el efecto de una llama o que son más sensibles a los choques o la fricción que el dinitrobenzeno.

— Comburentes

Sustancias y preparados que en contacto con otras sustancias, particularmente con los inflamables, originan una *reacción fuertemente exotérmica*.

— Fácilmente inflamables

Sustancias y preparados líquidos que tengan un punto de inflamación inferior a 21° C (incluidos los líquidos extremadamente inflamables).

Sustancias y preparados que, a la temperatura ambiente, en el aire y sin aporte de energía, puedan calentarse e incluso inflamarse.

Sustancias y preparados que puedan inflamarse fácilmente por la acción breve de una fuente de ignición y que continúen quemándose o consumiéndose después del alejamiento de la misma.

Sustancias y preparados gaseosos que sean inflamables en el aire a presión normal.

Sustancias y preparados que, en contacto con el agua o el aire húmedo, desprendan gases fácilmente inflamables en cantidades peligrosas.

— Inflamables

Sustancias o preparados cuyo *punto de destello* sea *igual* o *superior* a 21° C e *inferior* o *igual* a 55° C. También presentan estas características de inflamabilidad los gases comprimidos inflamables y las sustancias o preparados que sean *fuertes oxidantes*.

— Extremadamente inflamables

En este caso son sustancias y preparados cuyo *punto de destello* esté por debajo de 0° C, y su *punto de ebullición* sea *inferior* o *igual* a 35° C.

— Irritantes

Bajo este apartado se encuentran aquellas sustancias o preparados no corrosivos que, por contacto inmediato, prolongado o repetido con la piel o mucosas, puedan provocar una *reacción inflamatoria*.

— Nocivos

Los comprenden aquellas sustancias y preparados que, por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan entrañar *riesgos de gravedad limitada*.

— Tóxicos

Son tóxicas aquellas sustancias o preparados que, por inhalación, ingestión o penetración cutánea, pueden producir riesgos graves agudos, o crónicos, incluso la muerte.

— Cancerígenos

Comparten esta propiedad aquellas sustancias o preparados que, por inhalación, ingestión o penetración cutánea, pueden *producir o aumentar la frecuencia* de contraer cáncer.

— Corrosivos

Sustancias o preparados que en *contacto* con los *tejidos vivos* pueden ejercer sobre ellos una *acción destructiva*, por exposición, inhalación o contacto.

— Infecciosos

Son materias que contienen microorganismos viables o sus toxinas, de los que se sabe, o existe buenas razones para creerlo, que *causan enfermedades* en los animales o el hombre.

— Teratogénicos

Sustancias o preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan inducir *lesiones en el feto* durante su desarrollo intrauterino.

— Mutagénicos

Lo engloban aquellas sustancias o preparados que, por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan producir alteraciones en el *materia genético de las células*.

— Reactivos

Un residuo es reactivo si reúne las siguientes características:

Es normalmente inestable y experimenta fácilmente cambios violentos sin detonación.

Reacciona violentamente con el agua.

Todos aquellos que contienen cianuro y sulfuros y que, cuando está en medios de pH comprendido entre 2 y 12,5 pueden generar gases tóxicos, vapores o humos.

Los residuos que son susceptibles de detonación o reacción explosiva si se les somete a una fuente energética de iniciación o si son calentados bajo confinamiento o en condiciones normales de presión y temperatura.

— Ecotóxico

Son las sustancias o preparados peligrosos o que presentan riesgos inmediatos o diferidos para el medio ambiente.

Todas estas características miden la peligrosidad de una manera directa, por sometimiento de una muestra del residuo o de su lixiviado a un ensayo determinado, y comparando posteriormente los resultados con unos máximos admisibles de concentraciones para determinados componentes que, en base a estudios contrastados y aceptados, se puedan garantizar que no alcanzan la peligrosidad correspondiente.

Los riesgos para la salud y el medio no están claramente especificados todavía en la legislación comunitaria o española.

3.2. Residuos radiactivos

Los residuos radiactivos son aquellos materiales de desecho que contienen o están contaminados con nucleidos inestables, debido al exceso de energía acumulada en el núcleo (radionucleidos), en cantidades o concentraciones superiores a las establecidas por la ley para los cuales no está previsto ningún uso.

Algunos isótopos de ciertos elementos eliminan este exceso de energía emitiendo radiaciones, en un proceso que se denomina radiactividad.

Esta propiedad, que presentan los núcleos de algunas especies atómicas, comentada ya en el apartado de agentes contaminantes de la atmósfera, consiste en una desintegración espontánea de los mismos, con emisión de partículas y radiaciones electromagnéticas (radiaciones ionizantes).

a) Clasificación de los residuos radiactivos

La clasificación de los residuos radiactivos tiene como fin primordial la disposición homogénea de los mismos en los lugares de almacenamiento más adecuados a la gestión definitiva de cada tipo de residuo.

Los parámetros a considerar en la clasificación de los residuos radiactivos son los siguientes:

— El estado físico

Éste puede ser sólido, líquido o gaseoso.

— El período de semidesintegración

Este factor, como ya se ha descrito en el apartado atmosférico, es de gran importancia con vistas a su almacenamiento definitivo.

En función de este parámetro se clasifican en:

- Residuos de vida larga, aquellos cuyo período de semidesintegración es superior a 30 años, se reducen únicamente en la fase de reprocesado del combustible irradiado.

- Residuos de vida corta, aquellos con un período inferior a 30 años.

— La actividad específica

Este parámetro es el número de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo y de masa del material radiactivo. Viene expresado en curios/gr o bequetelios (Bq)/Kg.

La actividad específica de cada elemento radiactivo presente en una cantidad determinada de residuo tiene establecido un límite máximo, que permite considerar al residuo con una actividad específica alta o baja según cada elemento y por lo tanto, sirve para establecer una clasificación de los residuos en base a su actividad.

— La naturaleza de la radiación

La naturaleza de la radiación emitida es un factor a establecer de carácter esencial, ya que condiciona las barreras de protección, los sistemas de manejo de los residuos y, en general, la exposición a las radiaciones en el lugar de almacenamiento.

— La toxicidad de los residuos radiactivos

La toxicidad de los residuos radiactivos radica en las radiaciones ionizantes que emiten los radionucleidos en ellos contenidos, si bien dicha radiación, a diferencia de los residuos convencionales, disminuye con el tiempo.

— La cantidad de radiactividad contenida en los residuos por unidad de volumen o masa

**CLASIFICACIÓN SEGÚN CANTIDAD DE RADIOACTIVIDAD
POR VOLUMEN O MASA**

Categoría 1	Dosis < 0,2 R/h emisiones β y γ
Categoría 2	Dosis > 0,2 R/h y C2 R/h emisiones β y γ
Categoría 3	Dosis > R/h emisiones de tipo β y γ
Categoría 4	Residuos conteniendo nucleidos radiactivos emisores β y γ que no sobrepasen los límites de criticidad en lo que se refiere a la cantidad de materiales fisionables contenidos.

Las normativas española y comunitaria establecen los siguientes límites para considerar que un material es radiactivo:

**LÍMITES MÍNIMOS LEGALES PARA QUE UN MATERIAL SE CONSIDERE
RADIOACTIVO (LEGISLACIÓN ESPAÑOLA Y DIRECTIVAS CEE)**

TIPO DE MATERIAL	LÍMITE
Nucleidos de radiotoxicidad muy alta *	5-10 ³ Bq totales
Nucleidos de radiotoxicidad alta *	5-10 ⁴ Bq totales
Nucleidos de radiotoxicidad moderada *	5-10 ⁵ Bq totales
Nucleidos de radiotoxicidad baja *	5-10 ⁶ Bq totales
Sustancias radiactivas sólidos naturales	500 Bq g ⁻¹
Sustancias radiactivas que no sean sólidos naturales	100 Bq g ⁻¹
Instrumentos de navegación y relojería con pinturas radioluminiscentes	No aplica
Aparatos con sustancias radiactivas (homologadas y de utilización justificada)	1 μ sv h ⁻¹ (Tasa dosis a 0,1 m)

3.3. Residuos biosanitarios o sanitarios contaminados

Estos residuos están, en general, constituidos por productos con contaminación biológica y por materiales que han contactado con ellos, exceptuando las aguas residuales. Son sólidos y líquidos contenidos en recipientes, y se puede hacer el siguiente desglose de los mismos:

- Residuos de cualquier material proveniente del tratamiento de enfermedades infecciosas.

- Residuos anatómicos de poca entidad provenientes de cirugía o anatomía patológica.
- Vacunas vivas o atenuadas.
- Agujas y todo tipo de material cortante y punzante.

Los residuos anatómicos humanos de entidad, excepto los cadáveres, están regulados por una legislación específica (D 2263/74, de 20 de julio).

6

Orígenes de la contaminación

FUENTES DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA

Este apartado se va a desarrollar del mismo modo que el de agentes contaminantes. Por una parte se comentarán los orígenes de los contaminantes físicos, y por otra los de los químicos.

Contaminantes físicos

Ruido

Ahora nos ocuparemos a dar un repaso a las fuentes de ruido que tienen su origen en las actividades realizadas por el hombre, sin entrar en el análisis de las fuentes naturales, tales como el viento.

Entre las principales fuentes antropogénicas de ruido se encuentran los medios de transporte, la industria y otras fuentes. A continuación se indican las características básicas de cada una de ellas:

1. Ruido producido por el transporte

1.1. Tráfico de automóviles

Básicamente, todos los estudios realizados sitúan al ruido producido por el tráfico como el principal responsable de los altos niveles sonoros ambientales que se producen en las ciudades. Este factor es difícil de reducir si tenemos en cuenta la creciente utilización de vehículos a motor para el transporte de personas y mercancías.

Según fuentes de la OCDE, la circulación de automóviles se ha triplicado entre 1960 y 1985 y el tráfico aéreo se ha multiplicado por diez en el mismo período.

La interacción neumático-firme de la carretera es la fuente dominante de ruido a velocidades elevadas (superiores a 80 km/h), aunque el ruido total es función tanto del firme como del tipo de neumático.

En zonas urbanas, la influencia del ruido de los neumáticos con el firme, frente al total producido por los vehículos, es mucho menor.

1.2. Tráfico aéreo y ferroviario

A diferencia de los ruidos generados por los automóviles, el ruido producido por el tráfico aéreo y ferroviario se encuentra más localizado, afectando en general a las zonas próximas a los aeropuertos y redes viarias y a las zonas de influencia de éstas.

Los aeropuertos suelen estar situados en las proximidades de las ciudades, correspondiendo las zonas de influencia directa a los núcleos de población en la trayectoria de vuelo y próximos a las operaciones de despegues y aterrizajes. En cambio, en el caso de los ferrocarriles, las redes viarias han sido engullidas por las ciudades, correspondiendo en este caso con las zonas de influencia las vías próximas a las ciudades o las que la atraviesan.

Los ruidos de los ferrocarriles se caracterizan por sus bajas frecuencias (menos molestas) y características periódicas (uniones de los raíles) o de impacto (señales acústicas).

Los focos de ruido en ambos casos se pueden clasificar dentro de dos grandes grupos:

- a) Focos propios:
 - Motores de aviones.
 - Vehículos auxiliares y de mantenimiento.
 - Servicios de carga y descarga.

— Otros.

b) Focos reducidos:

- Tráfico general en los viales de acceso (particulares y comerciales).
- Implantación de industrias en las proximidades.
- Otros.

A continuación se recogen algunos valores orientativos del ruido producido por los aviones y por distintos tipos de trenes:

VALORES ORIENTATIVOS DE RUIDO PRODUCIDO POR LOS AVIONES

Tipo de operación	Niveles	
	L_{EPN} en dB	L_{AX} en dBA
Sobrevuelo de avión reactor pesado, en aterrizaje, a 2 km de la pista	115	116
Sobrevuelo de avión reactor de tipo medio, en aterrizaje, a 2 km de la pista	106	97
Sobrevuelo de avión reactor a 300 m de altitud	112	103
Sobrevuelo de avión de hélice a 300 m de altitud	97	88
Despegue de avión de turbohélice a 500 m de la pista	109	100
Despegue de avión reactor a 500 m de la pista	109	100

L_{EPN} : Nivel de ruido percibido efectivo. Parámetro que tiene en cuenta la duración del suceso de ruido según ISO 3891.

L_{AX} : Nivel de exposición sonora de un suceso determinado.

Fuente: Sanz Sá, 1987.

RUIDO PRODUCIDO POR DISTINTOS TIPOS DE TRENES

Tipo de tren	L_{AX} en dBA
TGV-Atlantique	83
Trenes rápidos	88
Trenes de mercancías	89

Fuente: Sanz Sá, 1987.

2. Ruido industrial

En la actualidad el problema del ruido industrial se ha incrementado debido a la enorme expansión urbanística que están sufriendo las ciudades, lo que ha ocasionado el acercamiento de los núcleos de población a zonas industrializadas.

Un gran número de actividades de pequeñas industrias y comercios se mantienen en la actualidad integradas en los cascos urbanos de la mayoría de las ciudades, llegando a ser motivo de molestias por ruido para la población. Entre ellas se encuentran:

- Talleres de reparación de automóviles.
- Máquinas de talleres artesanos.
- Otras.

El origen de los ruidos generados en las diversas actividades industriales está en las máquinas utilizadas en los procesos de producción de una industria, provocando en la mayoría de los casos, además de una molestia ambiental, un problema de higiene industrial para los trabajadores de la misma.

3. Otras fuentes de ruido

Los ruidos que se originan en los edificios suelen ser de dos tipos:

- a) Ruidos aéreos: su transmisión se realiza sobre todo por el aire.
- b) Ruidos de impacto: originados por excitación directa de las paredes o por una fuerza mediante impactos o vibraciones. Suele ser de muy corta duración, y se transmite a través de la estructura del edificio.

Entre los ruidos generados en el interior de las viviendas, también llamado ruido de vecindad, destacan los producidos por los habitantes de las mismas en diversas actividades, tales como ver la televisión, oír la radio, la utilización de electrodomésticos, pequeñas reparaciones, etc.

Asimismo, la proximidad de locales comerciales (bares, *pubs*, discotecas, etc.) y actividades tales como conciertos y fiestas al aire libre, la recogida de basuras, sirenas de policía o ambulancias y alarmas de vehículos o locales constituyen ejemplos de focos de ruido que inciden claramente sobre los habitantes de los edificios.

Radiaciones ionizantes

Una de las hipótesis más cercana a la actual forma de vida en la Tierra se basa en que hace millones de años este planeta estaba sometido a grandes cambios de temperatura y presión, influenciados por un tipo de minerales inestables, que eran capaces de ir transformándose en materiales más estables y más pequeños, a la vez de ir emitiendo un tipo de energía en forma de ondas. Esta energía fue capaz de modificar la estructura física y química de la flora y fauna que en esos momentos existía.

Estos procesos de transformación, en algunos elementos químicos, pueden llegar a durar millones de años, aunque bien es verdad que la cantidad de energía irradiada va disminuyendo con el paso del tiempo, tanto en intensidad como en cantidad. A este tipo de radiaciones se la conoce en la actualidad como energía nuclear natural.

Por extrapolación a lo que estaba sucediendo en la tierra, este tipo de transformaciones, también se estaban produciendo, y de hecho, aún continúan realizándose en el resto del espacio terrestre, conociéndose como rayos cósmicos a las ondas que son capaces de producirse dentro de la atmósfera terrestre.

A la suma de estos dos tipos de radiaciones se la conoce como radiación de fondo, a la cual el hombre está sometido durante toda la vida.

Esta radiación de fondo es distinta en cada una de las zonas del planeta, dependiendo principalmente de la altura sobre el nivel del mar y de la composición geológica de la misma.

Con la evolución del hombre y los avances tecnológicos que éste ha conseguido en todos los campos de la ciencia, ha creado y utiliza una serie de fuentes de radiación que son capaces de aumentar artificialmente los niveles de radiación natural.

Este tipo de fuentes se están aplicando actualmente en la producción de energía eléctrica, en el campo de la medicina, industria e investigación y en determinadas actividades defensivas en los distintos países.

Independientemente de la radiación que se produce en la utilización de las fuentes comentadas anteriormente, otro de los riesgos más importantes son los residuos generados por el empleo de tales procesos, ya que, como se comentó al principio de este apartado, la actividad de estos materiales perdura en el tiempo.

Contaminantes químicos

Las fuentes emisoras de contaminantes químicos a la atmósfera se dividen atendiendo a su origen en dos grandes grupos.

Fuentes naturales

En este caso la presencia de sustancias contaminantes en la atmósfera se debe a causas naturales.

Fuentes antropogénicas

Los contaminantes presentes en la atmósfera tienen su origen en las diversas actividades humanas.

La siguiente tabla muestra la proporción existente entre las emisiones naturales/antropogénicas para los distintos contaminantes:

Contaminante	Focos de emisión	
	Antropogénicos	Naturales
Aerosoles	11,3	88,7
SO _x	42,9	57,1
CO	9,4	90,6
NO _x	11,3	88,7
Hidrocarburos	15,5	84,5

Fuente: Sanz Sá, 1991.

Según los datos reflejados en el cuadro anterior las emisiones debidas a las fuentes naturales, a nivel de emisiones globales, son de gran importancia frente a las debidas a fuentes antropogénicas. Sin embargo, estas últimas, de manera general, se encuentran concentradas en áreas urbanas e industriales, por lo que desde un punto de vista regional, son las principales causantes de los problemas asociados con la contaminación atmosférica.

Los focos antropogénicos de emisión de contaminantes se puede clasificar de la siguiente forma:

- Focos fijos.
 - Industriales: Procesos industriales, instalaciones fijas de combustión.
 - Domésticos: Instalaciones de calefacción.
- Focos móviles.
 - Vehículos automóviles.

- Aeronaves.
- Buques.

- Focos compuestos.
 - Zonas industriales.
 - Áreas urbanas.

Otra forma de clasificación de las principales fuentes de contaminación antropogénica puede realizarse de la siguiente forma:

- Producción de energía.
 - Energía eléctrica: Plantas térmicas y nucleares.
 - Energía mecánica: Transportes.
 - Energía calorífica: Generadores de calor domésticos e industriales.
 - Energía destructora: Incineración.

- Producción de bienes materiales: Muy diversas actividades industriales.

En las páginas siguientes, se establecen los porcentajes de participación de las distintas fuentes de emisión para cada uno de los contaminantes y viceversa.

1. Vehículos

En los últimos años se ha producido el aumento masivo en la utilización de los distintos medios de transporte, contribuyéndose de esta forma al incremento de los problemas medioambientales.

Entre los diferentes medios de transporte, el automóvil es uno de los que presentan una mayor problemática debido a su masificación en las ciudades, produciendo el aumento de la concentración de contaminantes en las zonas urbanas y, por tanto, de los efectos que sobre la población pueden causar dichos contaminantes.

Otro tipo de transportes, como los ferrocarriles y la navegación, suelen estar más alejados de los núcleos urbanos, por lo que sus efectos sobre la población serán menos importantes. En cuanto a la aviación, se ha producido el crecimiento en el tamaño de los aparatos y, por tanto, de la potencia de los motores y del volumen de los gases emitidos, reduciéndose además la distancia existente entre las ciudades y los aeropuertos debido al importante crecimiento de las primeras en los últimos años.

Contaminante	Fuente	% Relativo	% Total
Aerosoles	Industria	40,8	53,8
	Varios	32,4	
	Combustión fija	20,5	
	Residuos sólidos	4,0	
	Transporte	2,3	
SO _x	Combustión fija	73,0	13,3
	Industria	22,5	
	Transporte	3,3	
	Varios	0,6	
	Residuos sólidos	0,6	
CO	Transporte	73,7	12,5
	Varios	12,0	
	Industria	7,9	
	Residuos sólidos	5,2	
	Combustión fija	1,2	
NO _x	Transporte	47,1	11,9
	Combustión fija	42,0	
	Varios	8,4	
	Residuos sólidos	1,7	
	Industria	0,8	
Hidrocarburos	Transporte	53,0	8,5
	Varios	24,6	
	Industria	14,7	
	Residuos sólidos	5,3	
	Combustión fija	2,4	
Fuente	Contaminante	% Relativo	% Total
Transporte	CO	77,2	51,4
	Hidrocarburos	13,6	
	NO _x	7,7	
	Aerosoles	0,8	
	SO _x	0,7	
Combustión fija	SO _x	55,0	15,7
	NO _x	22,6	
	Aerosoles	16,3	
	CO	4,1	
	Hidrocarburos	2,0	

Fuente	Contaminante	% Relativo	% Total
Industria	Aerosoles	36,4	14,1
	CO	30,3	
	SO _x	18,9	
	Hidrocarburos	13,9	
	NO _x	0,5	
Residuos sólidos	CO	66,3	4,2
	Hidrocarburos	16,8	
	Aerosoles	11,8	
	NO _x	3,4	
	SO _x	1,7	
Varios	CO	44,4	14,6
	Aerosoles	27,8	
	Hidrocarburos	22,4	
	NO _x	4,9	
	SO _x	0,5	

La formación y emisión de contaminantes a la atmósfera, para la práctica totalidad de los medios de transporte, tienen su origen en la obtención de energía mediante la combustión de diversos combustibles.

Los principales contaminantes emitidos por los medios de transporte son:

- Monóxidos de carbono.
- Hidrocarburos inquemados.
- Óxidos de nitrógeno.
- Dióxido de azufre.
- Partículas (inquemados y metálicas).
- Compuestos de plomo.

La proporción emitida a la atmósfera de cada uno de estos contaminantes es muy variable, estando en función de diversos factores, como el tipo de vehículo y las condiciones de funcionamiento en las que se encuentra el motor.

En las siguientes tablas se muestra la emisión media de contaminantes por litro de combustible en circuito urbano y la composición de los gases de escape de un automóvil con motor de explosión (gasolina), en función del régimen de funcionamiento del motor y estando éste cargado.

Contaminante	Motor de gasolina (gr.)	Motor diésel (gr.)
CO	360	7
NO _x	15	20
Hidrocarburos	30	40
Partículas	1	14

Fuente: Sanz Sá, 1991.

Contaminante	Con carga		
	Marcha al ralentí	Bajo régimen	Alto régimen
CO	3-10 % vol.	3-8 %	1-5 %
NO _x	0-50 ppm	1.000 ppm	4.000 ppm
Hidrocarburos	3.000-8.000 ppm	200-500 ppm	100-300 ppm
Compuestos de plomo	—	60 mg/m ³	—
3,4-Benzopireno	—	0,001-0,01 mg/m ³	—
H ₂	0,5-4 % vol.	0,2-1 %	0,1-0,2 %
CO ₂	6,5-8 % vol.	7-11 %	12-13 %
H ₂ O	7-10 % vol.	9-11 %	10-11 %

Como puede deducirse de lo expuesto anteriormente, las emisiones debidas a los diferentes tipos de motores se limitan a un reducido número de contaminantes comunes a todos ellos, siendo la proporción emitida de cada uno de estos el elemento diferenciador de dichos motores.

Así, por ejemplo, destaca la gran importancia de las emisiones de monóxido de carbono y compuestos de plomo en los motores de gasolina, mientras que en los diesel la emisión de partículas es muy superior. La emisión de compuestos de plomo en los gases de escape de los motores se debe al aditivo (tetraetilo de plomo) que se añade a las gasolinas para aumentar el octanaje de éstas y, por tanto, el rendimiento del motor.

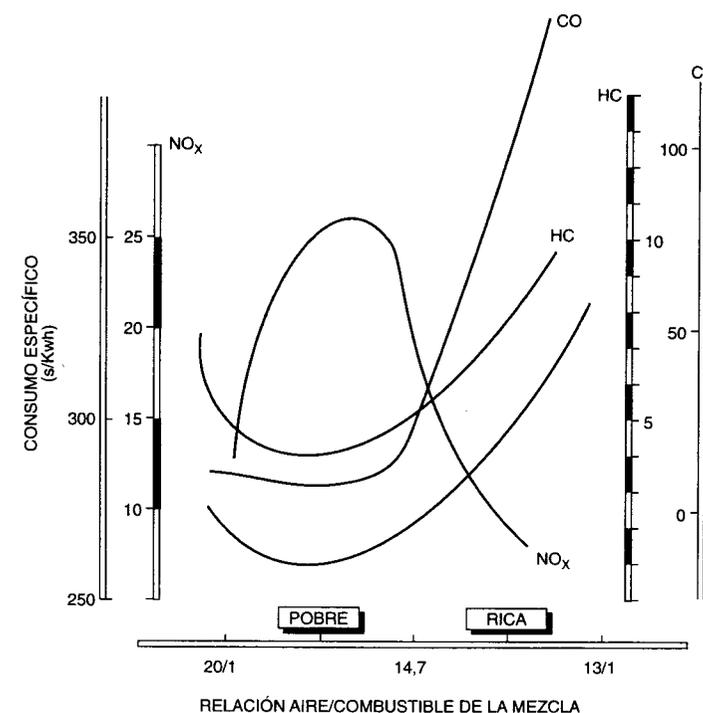
En la actualidad, y con el fin de poder utilizar catalizadores que reduzcan las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, se tiende a eliminar el contenido en plomo de las gasolinas. Para mantener un índice de octanaje elevado en la gasolina sin plomo, se pueden añadir diferentes compuestos oxigenados.

La siguiente figura demuestra que el problema de reducir las emisiones de un determinado compuesto es complejo, pues suele estar acompañado de una mayor emisión en otro de los componentes contaminadores.

De lo expuesto anteriormente se deduce que una mayor relación aire/combustible, con un régimen alto de revoluciones y cargado, favorecen la disminución de CO e hidrocarburos en los gases de escape y producen un aumento de las emisiones de NO_x en los vehículos con motor de gasolina.

En los vehículos con motor diesel en las mismas condiciones, se produce un aumento en las emisiones de SO₂ y NO_x. Como en los motores diesel la combustión se realiza en exceso de aire, la proporción de CO en los gases de escape es mínima.

Una relación pobre en aire (más normal en motores de explosión), poca carga y bajo régimen (o ralentí) favorecen la emisión de productos sin oxidar: CO, hidrocarburos e hidrógeno.



Emisión de contaminantes y consumo de combustible en función de la riqueza de la mezcla aire/combustible (Sanz Sá, 1991)

2. Calefacciones urbanas

Las calefacciones urbanas son uno de los principales focos de combustión fija que contribuyen de forma más importante a la contaminación atmosférica de las grandes ciudades. La contaminación atmosférica se produce preferentemente por la utilización de combustibles, líquidos, sólidos o gaseosos como método de generación de calor. Los combustibles más empleados son carbón, gasóleo y gas.

Los elementos contaminantes producidos estarán en función del combustible empleado. En general, el uso de carbón y gasóleo comporta una gran producción de óxidos de azufre, en función del contenido en azufre que posean, y de partículas, especialmente en el caso del carbón. Por otra parte, la importancia de la producción de CO e hidrocarburos es pequeña y la de óxidos de nitrógeno sólo tiene una importancia relativa.

En cambio, la combustión de gas produce menores cantidades de estos contaminantes, aunque, si la combustión es incompleta, los contenidos de CO e hidrocarburos pueden ser importantes.

Entre las características más importantes de las instalaciones domésticas de calefacción cabe destacar las siguientes:

- Régimen de funcionamiento estacional, coincidiendo, normalmente, con las características meteorológicas más adversas. Dentro de su estacionalidad, suelen tener un período de funcionamiento diurno.
- La potencia es muy variable, dependiendo fundamentalmente del número de viviendas de cada edificio, pudiéndose admitir que en general son de mediana potencia.
- Se caracterizan por el gran número de focos y su enorme dispersión en el terreno. Esta dispersión vendrá dada por el número de edificios, su tamaño y su densidad dentro del área urbana.
- Las alturas de emisión también son muy variables, dependiendo éstas, lógicamente, de la altura de los edificios. En general, no es una altura suficiente como para asegurar la perfecta difusión de los gases, al menos en nuestro país.
- Existe una gran variedad de combustibles, de muy diferentes características cada uno, clasificados en el mercado según su composición y poder calorífico. Según el Real Decreto 3000/1980, de 30 de diciembre, los combustibles deben reunir las siguientes características:

— Gasóleo-auto. Contenido máximo en azufre, 0,6 % en peso. Poder calorífico máximo, 10.500 Kcal/kg.

— Gasóleo pesado. Contenido máximo en azufre, 0,65 % en peso. Poder calorífico máximo, 10.300 Kcal/kg.

— Fuel-oil pesado n.º 1. Contenido máximo de azufre, 2,7 % en peso.

* Si el contenido en azufre no es superior al 1 % en peso, se denominará fuel-oil pesado n.º 1 BIA.

* Si el contenido en azufre no supera el 0,6 % en peso, se denominará fuel-oil pesado n.º 1 BIA Especial.

Poder calorífico del fuel-oil pesado n.º 1: máximo, 10.200 Kcal/kg; mínimo, 9.700 Kcal/kg.

— Asimismo, a efectos legales se han clasificado los carbones para uso doméstico en:

* Calidad n.º 1, utilizables en zonas de atmósfera contaminada. Características: azufre, menor del 1 % (antracita) y cenizas, menor del 12 % (antracita), lo mismo para aglomerados sin humos.

* Calidad n.º 2, utilizable en zonas admisibles. Características: azufre (pirítico), menor del 1,2 % (antracita, hulla baja en volátiles y aglomerados); cenizas, menor del 10 % (antracita) y menor del 15 % para aglomerados y hullas bajas en volátiles.

3. Contaminantes emitidos por la industria

La contaminación industrial presenta, en general, múltiples diferencias con la que proviene de otras fuentes. Cada industria, o mejor dicho, cada tipo de industria debe estudiarse individualmente, puesto que la contaminación industrial se caracteriza por la cantidad y diversidad de contaminantes, dependiendo éstos del tipo de combustible y materias primas empleados, de los procesos y de la tecnología utilizada.

No se puede hablar de lo que emite en sí la industria, ya que se puede considerar que ésta, en su conjunto, produce todo tipo de contaminantes.

Como más importantes, tal y como se cita en el Decreto 833/1975, se encuentran:

- Óxidos de azufre.
- Partículas (sedimentables y en suspensión).
- Óxidos de nitrógeno.
- Hidrocarburos.
- Monóxido de carbono.

Y una serie de productos más específicos clasificados como:

- Derivados del azufre.
- Derivados del nitrógeno.
- Derivados de los halógenos.
- Otros compuestos inorgánicos.
- Compuestos orgánicos: derivados de azufre, cloro, plomo, etc.
- Olores.
- Partículas sólidas metálicas, etc.

Excluyendo las industrias productoras de energía, la aportación de la industria a la contaminación atmosférica global se sitúa alrededor de los siguientes porcentajes:

— CO.....	2,8 %
— SO ₂	37,8 %
— Hidrocarburos	24,7 %
— Partículas	50,0 %
— NO _x	20,0 %

Por otra parte, las plantas de producción de energía, excluyendo las de calefacción doméstica, ofrecen las siguientes cantidades:

— CO.....	0,8 %
— SO ₂	44,3 %
— Hidrocarburos	0,7 %
— Partículas	20,0 %
— NO _x	30,0 %

Sumando ambos porcentajes, el total industrial se puede cifrar en:

— CO.....	3,6 %
— SO ₂	82,1 %
— Hidrocarburos	25,4 %
— Partículas	70,0 %
— NO _x	50,0 %

Este análisis indica que, exceptuando algunos contaminantes específicos potencialmente peligrosos, la lucha contra la contaminación producida por la industria en la atmósfera debe centrarse en la eliminación de SO₂, partículas y NO_x, sin olvidar la gran producción de hidrocarburos.

En comparación con otros sectores, varios estudios realizados en Estados Unidos y aplicables a otros países industrializados muestran los siguientes porcentajes sobre el total de contaminantes emitidos:

— Transporte	60 %
— Industria	18 %
— Generación energía eléctrica.....	13 %
— Calefacciones	6 %
— Incineración residuos	3 %

Los sectores industriales potencialmente contaminadores de la atmósfera más importantes son:

- Industrias energéticas:
 - * Centrales térmicas.
 - * Refino de petróleo.
- Siderurgia:
 - * Siderurgia integral.
 - * Fundiciones de hierro y acero.
 - * Ferroaleaciones.
- Metalúrgica no férrea:
 - * Aluminio.
 - * Cobre.
 - * Plomo y zinc.
- Industria del cemento.
- Química inorgánica:
 - * Ácido sulfúrico.
 - * Ácido nítrico.
- Química orgánica.
- Industria paraquímica:
 - * Abonos complejos.
- Industria del papel.
- Industria alimentaria.

En un estudio realizado por el Ministerio de Industria y Energía para los diferentes sectores industriales de producción más contaminantes, el porcentaje de emisión de SO₂, NO_x y partículas son:

Sectores de actividad industrial	Contaminantes %		
	SO ₂	NO _x	Partículas
Energética	73	68,5	31,7
Cementera	3,2	3,7	27,2
Siderurgia	6,4	2,6	24,3
Química	7	18	6
Alimentaria	3	3	3

Fuente: Sanz Sá, 1991.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Según su procedencia, las aguas residuales se dividen en agrícola-ganaderas, domésticas, pluviales e industriales.

Origen agrícola-ganadero

Son el resultado del riego y de otras labores como las actividades de limpieza ganadera, que pueden aportar al agua grandes cantidades de estiércol y orines, es decir, mucha materia orgánica, nutrientes y microorganismos.

Quizá uno de los mayores problemas que origina la agricultura sea la contaminación difusa, siendo la más importante la provocada por nitratos. Se tratan de actividades extendidas en grandes áreas, por lo que resulta prácticamente imposible su depuración.

Se deben tomar las medidas precisas para atajar y reducir en la medida de lo posible la contaminación por nitratos, tanto en aguas subterráneas, porque su efecto es acumulativo, como en las superficies en las que favorecen el proceso de eutrofización.

Origen doméstico

Las aguas domésticas son las que provienen de núcleos urbanos. Contienen sustancias procedentes de la actividad humana (alimentos, deyecciones, basuras, productos de limpieza, jabones, etc.).

La contaminación de un agua usada urbana se estima en función de su caudal, de su concentración en materias en suspensión y de su demanda biológica.

Se admite que un habitante de una comunidad concreta, en un país o región determinados, y según las condiciones de abastecimiento de agua, nivel de vida y sistemas de alcantarillado disponibles, vierte una cantidad media de contaminación fija, bien determinada, base del equivalente-habitante. En general, se ha fijado un valor de 60 g/día de DBO y 70 g/día de sólidos en suspensión por habitante-equivalente.

La dotación de agua se sitúa en torno a los 100-300 l/hb/día. Se incrementa en las grandes ciudades por su uso en jardines y limpieza pública viaria. El caudal de aguas residuales domésticas presenta una variación diaria de tipo sinusoidal. El máximo se presenta al mediodía, los valores medios a las 9 de la mañana y a las 7 de la tarde y el valor mínimo hacia las 6 de la mañana.

Físicamente presentan color gris y diversas materias flotantes. Químicamente contienen gran cantidad de materia orgánica. Biológicamente contienen gran cantidad de microorganismos, algunos de los cuales pueden transmitir enfermedades.

Una de las características principales de un agua residual urbana es su biodegradabilidad, es decir, la posibilidad de depuración mediante tratamientos biológicos, siempre que pueda darse una alimentación equilibrada de las bacterias en nitrógeno y fósforo.

Es conveniente que las aguas residuales lleguen a la estación de tratamiento en un estado suficientemente fresco, ya que un agua nauseabunda es tóxica para el tratamiento, por lo que, si se quisiera conseguir una buena depuración, habría de someterse a una preaeración o a una precloración antes de la decantación.

Origen pluvial

Al llover, el agua arrastra toda la suciedad que encuentra a su paso, presentándose más turbia que la que se deriva del consumo doméstico.

En las ciudades estas aguas arrastran aceites, materia orgánica y diferentes contaminantes de la atmósfera, y en el campo arrastran pesticidas, abonos, etc.

En la industria las aguas pluviales arrastran las sustancias que se han caído sobre el terreno, pudiendo presentar un gran problema si son sustancias tóxicas. Además, si existe acumulación de residuos en zonas no pre-

paradas para ello, los lixiviados de los residuos serán arrastrados. Es conveniente tener una red de pluviales, aunque según la composición que tenga, se decidirá su unión al colector que desemboca en la depuradora o se realizará una desviación vertiendo directamente a las aguas superficiales.

Origen industrial

Los procesos industriales generan una gran variedad de aguas residuales, que pueden tener orígenes muy distintos, en función de los usos más frecuentes a los que se destine:

- Producción de energía por vaporización, en centrales clásicas o nucleares.
- Transporte de calorías para condensación de vapor, refrigeración de fluidos o de aparatos.
- Transporte de materias primas o de desechos como en la industria conservera, carbón en los lavaderos, fibras en papeleras, etc.
- Fabricación de productos en papeleras, industrias textiles y alimentarias.
- Transporte de iones en galvanoplastia.
- Aclarado de piezas o lavado de productos en tratamientos de superficies, semiconductores, industrias agrícolas, etc.
- Lavado de gases utilizado en la industria metalúrgica y en las industrias químicas.
- Preparación de baños en electrofóresis, aceites solubles, etc.

Por lo tanto, los tipos de aguas residuales obtenidas serán las utilizadas como medio de transporte de sustancias y calor en el lavado y enjuague, en las transformaciones químicas, como disolvente y subproducto de procesos físicos de filtración o destilación, etc.

Con independencia del posible contenido de sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden aparecer elementos propios de cada actividad industrial, entre los que cabe citar: tóxicos, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, etc.

Los residuos orgánicos de algunas industrias, por ejemplo las de pasta de papel, pueden ser iguales o más importantes que los de una comunidad media de habitantes.

Los contaminantes pueden encontrarse en forma disuelta o en suspensión, y ser orgánicos e inorgánicos por su naturaleza química. En la tabla adjunta se detallan los contaminantes más comunes en diferentes tipos de industrias.

Sustancias contaminantes detectadas con frecuencia en diversos tipos de industria

Industria	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
	Temperatura	Zinc Sulfito Sólidos disueltos totales
Asbestos	DBO ₅ DQO pH Sólidos en suspensión (SS)	Cromatos Fosfatos Sulfito Sulfito Sólidos disueltos totales (SDT)
Molienda de granos	DBO ₅ SS Temperatura	DQO pH SDT
Química inorgánica cloro-sosa	Acidez-alcalinidad Sólidos totales Sólidos en suspensión Sólidos disueltos totales Cloruros Sulfatos	DBO ₅ DQO Carbono orgánico total Aromáticos polinucleares Fenoles Fluoruros Silicatos Fósforo Cianuros Mercurio Cromo Plomo Titanio Hierro Aluminio Boro Arsénico Temperatura
Industria química orgánica	DBO ₅ DQO pH Sólidos en suspensión totales Sólidos disueltos totales Aceites flotantes	Carbono orgánico total Cloruros orgánicos Fósforo total Metales pesados Cianuros Nitrógeno total Otros contaminantes específicos de cada producción

**Sustancias contaminantes detectadas con frecuencia
en diversos tipos de industria
(continuación)**

Industria	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Refinerías de petróleo	Amoníaco DBO ₅ DQO Aceites pH Fenoles Sulfuros Sólidos en suspensión Sólidos disueltos totales Temperatura Cromo	Cloruros Color Cobre Cianuros Hierro Plomo Mercaptanos Nitrógeno Olores Fósforo Sulfatos Carbono orgánico total Toxicidad Turbidez Sólidos en suspensión volátiles Zinc
Conservas vegetales	DBO ₅ DQO pH Sólidos en suspensión	Color Coliformes fecales Fósforo Temperatura Carbono orgánico total Sólidos disueltos
Industrias lácteas	DBO ₅ DQO pH Sólidos en suspensión	Cloruros Color Nitrógeno Fósforo Temperatura Carbono orgánico total Toxicidad Turbidez
Productos cárnicos	DBO ₅ pH Sólidos en suspensión Sólidos precipitables Aceites y grasas Coliformes totales Sustancias tóxicas	Amoníaco Turbidez Sólidos disueltos totales Fosfatos Color

**Sustancias contaminantes detectadas con frecuencia
en diversos tipos de industria
(continuación)**

Industria	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Producción de fertilizantes nitrogenados	Amoníaco Cloruros Cromo total Sólidos disueltos Nitrate Sulfato Sólidos en suspensión Urea y otros compuestos orgánicos nitrogenados Zinc	Calcio DQO Sustancias químicas procedentes de la depuración del gas Hierro Aceites y grasas pH Fosfato Sodio Temperatura
Fertilizantes fosfatados	Calcio Sólidos disueltos Fluoruros pH Fósforo Sólidos en suspensión Temperatura	Acidez Aluminio Arsénico Hierro Mercurio Nitrógeno Sulfato Uranio
Vidrio plano	DQO pH Fósforo Sulfato Sólidos en suspensión	DBO ₅ Cromatos Zinc Cobre Cromo Hierro Estaño Plata Nitratos Resinas sintéticas Sólidos disueltos totales Sustancias químicas orgánicas e inorgánicas

**Sustancias contaminantes detectadas con frecuencia
en diversos tipos de industria
(continuación)**

Industria	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Cemento, hormigón, cales y yeso	DQO pH Sólidos en suspensión	Alcalinidad Cromatos Fosfatos
Materiales plásticos y fibras sintéticas	DBO ₅ DQO pH Aceites y grasas Fenoles Sólidos en suspensión	Sólidos disueltos totales Sulfatos Fósforo Nitrato Nitrógeno orgánico Amoníaco Cianuros Aditivos y sustancias tóxicas Aromáticos polinucleares Zinc Mercaptanos
Celulosa y papel	DBO ₅ DQO Carbono orgánico total pH Sólidos en suspensión Coliformes fecales y totales Color Metales pesados Sustancias tóxicas Turbidez Amoníaco Aceites y grasas Fenoles Sulfito	Nutrientes (nitrógeno y fósforo) Sólidos disueltos totales
Curtido y acabado de pieles y cueros	DBO ₅ DQO Cromo total Grasas pH Sólidos en suspensión Sólidos totales	Alcalinidad Color Dureza Nitrógeno Cloruro sódico Temperatura Toxicidad

**Sustancias contaminantes detectadas con frecuencia
en diversos tipos de industria
(continuación)**

Industria	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Acabado de superficies metálicas	DQO Aceites y grasas Metales pesados Sólidos en suspensión Cianuros	
Industria del acero	Aceites y grasas pH Cloruros Sulfato Amoníaco Cianuros Fenoles Sólidos en suspensión Hierro Estaño Temperatura Cromo Zinc	
Industria textil	DBO ₅ DQO pH Sólidos en suspensión Cromo Compuestos fenólicos Sulfuros Alcalinidad	Metales pesados Color Aceites y grasas Sólidos disueltos totales Sulfuros Temperatura Sustancias tóxicas
Generación de vapor y centrales térmicas	DBO ₅ Cloruros Cromatos Aceites pH Fosfato Sólidos en suspensión Temperatura	Boro Cobre Hierro Zinc Sólidos disueltos totales Compuestos orgánicos no degradables

**Sustancias contaminantes detectadas con frecuencia
en diversos tipos de industria
(continuación)**

Industria	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Aluminio	SS Cloruros Fluoruros Fósforo Aceites y grasas pH	SDT Fenoles Aluminio
Automóvil	SS Aceites y grasas DBO ₅ Cromo Fósforo Cianuros Cobre Níquel Hierro Zinc Fenoles	DQO Cloruros Nitratos Amoníaco Sulfatos Estaño Plomo Cadmio SDT
Azucareras	DBO ₅ pH SS Sólidos sedimentables Coliformes totales Aceites y grasas Sustancias tóxicas	Alcalinidad Nitrógeno total Temperatura SDT Color Turbidez Espumas
Bebidas	DBO ₅ pH SS Sólidos sedimentables Coliformes totales Aceites y grasas Sustancias tóxicas	Nitrógeno Fósforo Temperatura Color SDT Turbidez Espumas
Granjas de ganado	DBO ₅ DQO Sólidos totales pH	Coliformes fecales Nitrógeno Fosfatos Carbono orgánico total

FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

El abandono o depósito de todo tipo de contaminantes en el suelo ha sido durante décadas una solución efectiva y barata para deshacerse de estos residuos. En los años sesenta y setenta se evidencia el error de estas prácticas en países como Holanda y Estados Unidos, al producirse notables casos de intoxicación en la población por los residuos enterrados durante años.

En España, hasta hace poco tiempo no han existido instalaciones adecuadas para el tratamiento y eliminación de residuos industriales tóxicos y peligrosos, y actualmente la capacidad de las existentes es muy inferior a las necesidades reales.

A diferencia de los otros dos medios, la consideración del suelo como un recurso importante a conservar no ha encontrado el eco social necesario, ni las medidas administrativas precisas para favorecer una rápida protección y mejora del mismo.

Clasificación de la contaminación de los suelos

Las formas de contaminación de un suelo, con origen antropogénico común, se pueden clasificar de diferentes modos, no excluyentes entre sí.

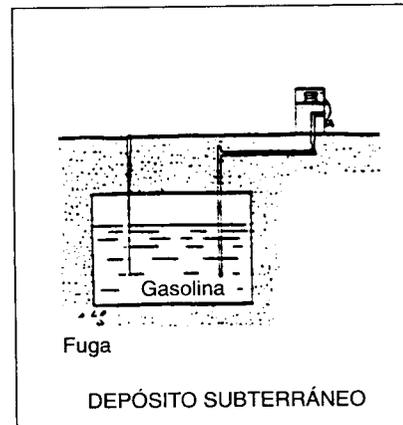
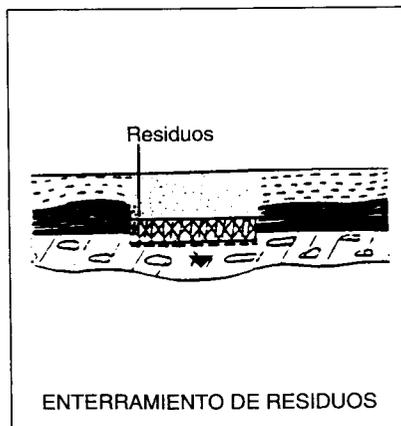
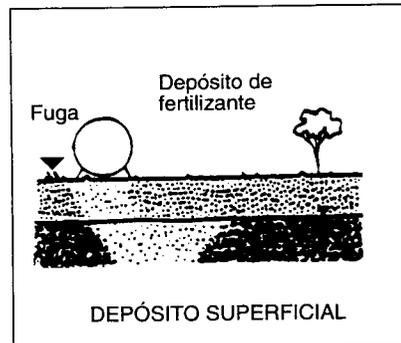
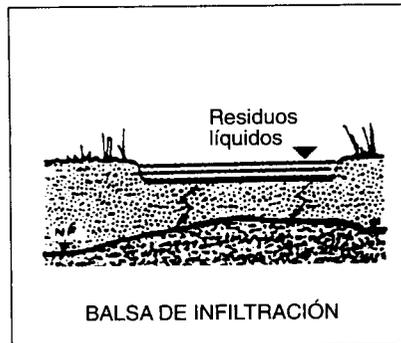
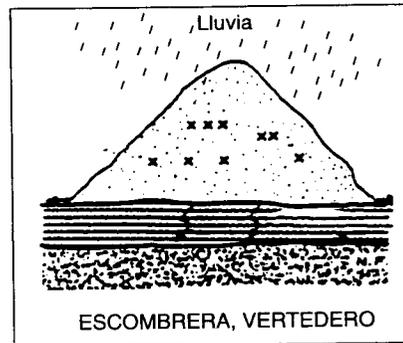
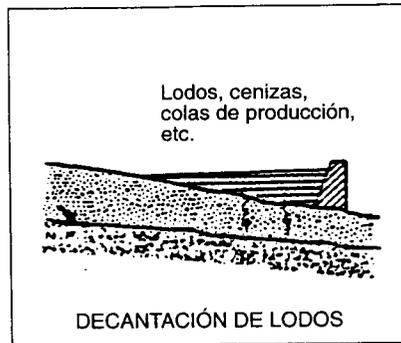
Superficial

Deriva de una acumulación de residuos sólidos o líquidos, vertidos accidental o voluntariamente en el terreno.

Se genera una infiltración de los contaminantes lixiviados a las capas interiores del suelo o un arrastre por las aguas de escorrentía.

Subterránea

Se corresponde con el caso típico de enterramiento de residuos, generalmente aprovechando escombreras, zanjas, canteras abandonadas, etc. Su localización es realmente compleja, teniendo como único indicio aparente el cambio en la textura superficial del terreno.



Contaminación producida por diferentes fuentes, superficiales y subterráneas (López Vera, 1993)

Vertido alevoso

Es a menudo coincidente con los subterráneos, derivados de la ilegalidad de dicho vertido y que constituye una de las formas de contaminación más peligrosa dada la presencia de sustancias tóxicas y peligrosas, y el desconocimiento de la existencia del foco contaminante.

Vertido no alevoso

Son aquellos en los que el origen de la contaminación es fortuito o por negligencias en la gestión de los contaminantes. Son los casos de fugas de depósitos, ya sean superficiales o subterráneos, accidentes en los que se produce la liberación al medio de sustancias tóxicas, etc.

Contaminación difusa

En la que no existe un foco concreto de contaminación del suelo, sino que se manifiesta de forma extensiva. Normalmente se trata de contaminaciones de escasa concentración pero de grandes volúmenes absolutos.

Hay numerosos ejemplos: márgenes de las carreteras, áreas agrarias con utilización intensiva de fertilizantes y productos fitosanitarios, la deposición de contaminantes emitidos por núcleos industriales, etc.

Contaminación puntual

La originada a partir de un espacio concreto. Es una contaminación focalizada, con un núcleo emisor desde el que, a través de diferentes vías, pueden movilizarse los contaminantes a otros elementos del medio (atmósfera, aguas superficiales y subterráneas).

Orígenes de la contaminación de los suelos por los residuos

La clasificación de los residuos en función de su procedencia, es quizá la forma más fácil y extendida de clasificar un residuo:

CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS

1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
 - domiciliarios
 - voluminosos
 - comerciales
 - de construcciones y demolición
 - asimilables a urbanos
 - sanitarios generales y biosanitarios asimilables a urbanos
2. RESIDUOS INDUSTRIALES
 - inertes
 - asimilables a urbanos
 - residuos tóxicos y peligrosos (RTP)
3. RESIDUOS HOSPITALARIOS
4. RESIDUOS DE ACTIVIDADES MINERAS
5. RESIDUOS FORESTALES
6. RESIDUOS AGRÍCOLAS
7. RESIDUOS GANADEROS
8. RESIDUOS RADIACTIVOS

Residuos sólidos urbanos

La implantación de la sociedad del bienestar y la concentración de la población en grandes núcleos urbanos ha traído consigo la generación de más cantidad y diversidad de embalajes y envases sin retorno, así como una mayor utilización de bienes de rápido envejecimiento.

Los residuos sólidos urbanos son los generados por cualquier actividad en los núcleos de población o en sus zonas de influencia. Esto implica que son algo más que los residuos generados a nivel doméstico, ya que han de contemplar el conjunto de otras actividades generadoras del ámbito urbano. Por este motivo los RSU abarcan un amplio contexto, y se hace necesario ofrecer una clasificación que puede ser más o menos amplia.

De este modo se definen como residuos sólidos urbanos los siguientes:

- Domiciliarios.
- Comerciales y de servicios.

- Sanitarios, en hospitales, clínicas y ambulatorios.
- Limpieza diaria de zonas verdes y recreativas.
- Abandono de animales muertos, muebles, enseres y vehículos.
- Procedentes de la industria o la agricultura, que sean inertes o asimilables a urbanos.
 - De construcción y obras menores, de reparación y obras domiciliarias.
 - En general, todos aquellos residuos cuya recogida, transporte y almacenamiento o eliminación corresponda a los ayuntamientos de acuerdo con lo establecido en la Ley de Régimen Local y demás disposiciones vigentes.

En este sentido se puede tomar como ejemplo a los Estados Unidos, donde, adheridos a la eliminación de los residuos urbanos, se tiran anualmente más de 12 millones de toneladas de metales férreos, más de 1 millón de toneladas de metales no férreos y más de 15 millones de toneladas de vidrio.

De la misma manera, la producción de residuos minerales supera la cantidad de 90 millones de toneladas al año, existiendo acumulaciones antiguas que totalizan unos 25.000 millones de toneladas de tal recurso potencial.

1. Características de los residuos sólidos urbanos

Las clasificaciones de residuos, incluso en los países que disponen de estadísticas fiables, son necesariamente confusas, pues inevitablemente suelen mezclar varios criterios de clasificación. Para poder establecer decisiones en el futuro tratamiento más adecuado de este tipo de residuos se hace necesario considerar los siguientes parámetros de caracterización de los distintos tipos de residuos.

1.1. Composición física

Los distintos componentes se engloban en tres grupos: *inertes* (metales, vidrio, restos de reparaciones domiciliarias, escorias y cenizas), *fermentables* (restos de alimentos) y *combustibles* (papel, cartón, plásticos, madera, gomas, cueros, textiles y varios).

1.2. Densidad

Es obvio que debido al carácter tan heterogéneo de los distintos componentes de las basuras, la densidad de las mismas puede oscilar entre los 110 y 200 kg/m³.

El estudio de los distintos componentes de los residuos domiciliarios en grandes ciudades ha demostrado que la densidad es siempre menor en los distritos céntricos, donde se agrupan oficinas, comercios y viviendas, que en zonas periféricas, donde predominan las viviendas.

Otro factor que hace variar la densidad de este tipo de residuos es el nivel de vida de la población. Se ha demostrado que por regla general la densidad es inversamente proporcional al nivel de vida. La causa de este fenómeno hay que buscarla en que cada día se utilizan más los envases sin retorno, ligeros y relativamente voluminosos, y descienden los combustibles sólidos utilizados como calefacción.

Este parámetro tiene una gran influencia en las capacidades de los medios de recogida y almacenamiento de las basuras. Sólo tiene sentido si se definen las condiciones en las que se determina, ya que las basuras son comprimibles.

1.3. El grado de humedad

La cantidad de agua contenida en las basuras es el parámetro que determina el poder calorífico útil de las mismas, así como la capacidad de transformación biológica de las sustancias fermentables.

Los factores que inciden en la cantidad de agua presente en un residuo sólido urbano están determinados por:

- La procedencia del residuo.
- El contenido en materiales orgánicos.
- La forma en que se presenta este residuo.
- Climatología propia de la zona.

Los distintos estudios analíticos sobre muestras de residuos domiciliarios sin compactar, en determinados puntos de España, establecen unos resultados que oscilan entre el 40 y 60 % de humedad en peso.

Estos mismos estudios establecen que los residuos que contienen sustancias orgánicas fermentables y oscilan entre un 70 y un 80 % en humedad proceden de lugares como mataderos, frente al 10-20 % de aquellos residuos recogidos en zonas comerciales.

1.4. La granulometría

En cuanto a la granulometría, sólo hay que reseñar la gran dispersión de tamaños de partículas que pueden presentarse en los residuos urbanos.

1.5. El Poder Calorífico Inferior (PCI)

Esta característica es de gran utilidad para seleccionar aquellos residuos que con mayor idoneidad pueden eliminarse a través de la incineración.

Se define como la cantidad de calor que desprende un combustible en base húmeda, considerando el necesario para vaporizar el agua que se forma durante la combustión.

Los valores medios obtenidos en los RSU españoles, oscilan entre 800 y 1.600 Kcal/kg.

1.6. La composición química

A partir de esta propiedad se suelen determinar las materias volátiles, las cenizas, los lípidos, el carbono y el nitrógeno, las proteínas, el fósforo, el potasio, el pH y el azufre.

1.7. La fermentación de las basuras

Las basuras domiciliarias encierran varios niveles de millones de microorganismos termófilos por gramo. Cuando son abandonadas, entran rápidamente en fermentación. La temperatura sube y se mantiene entre los 60 y 70° C, lo que tiene por efecto la destrucción de los gérmenes patógenos.

En esta operación fermentativa se producen dos fenómenos contrarios:

— En primer lugar hay una mineralización de la materia orgánica, que se descompone en gas carbónico y amoníaco, con producción final de ácido nítrico y nitratos.

— En segundo lugar, la formación por los microorganismos de complejos coloidales compuestos de macromoléculas orgánicas que constituyen el humus.

1.8. La relación carbono/nitrógeno

Es un índice de gran importancia en los procesos de compostaje, e indica la capacidad mineralizadora anual del nitrógeno.

El intervalo óptimo para los procesos de transformación biológica se estima entre los 20 y 35, pues, para valores inferiores, la pérdida del nitrógeno en forma de amoníaco gaseoso es tan elevada que el compostaje de esta materia orgánica carece de interés.

Este dato es el que se considera como criterio de calidad del tratamiento de las basuras por fermentación controlada.

2. Cantidad generada de residuos sólidos urbanos

La cantidad de residuos domiciliarios producidos por habitante es variable. Para cuantificar la generación producida de este tipo de deshechos se deben considerar varios largos períodos de tiempo, teniendo en cuenta, además, una serie de parámetros entre los que cabe destacar:

- Modo de vida de la población, resaltando la migración diaria entre el centro de la ciudad y la periferia.
- Movimiento de la población en períodos vacacionales, fines de semana o días de fiesta.
- Época del año.
- Clima: el aumento de cenizas en invierno cuando se utiliza como combustible madera o carbón.
- Utilización de envases o embalajes voluminosos y sin retorno.
- Calidad de vida de la población. Crece tanto en la composición de los residuos como en la cantidad generada.

Las cantidades de basura domiciliaria pueden expresarse en peso o volumen. Sin embargo, por el hecho de la comprensibilidad de las basuras, sólo el peso constituye un dato preciso y mensurable con facilidad.

Esta operación se efectúa en las zonas de deposición de los residuos, o en las estaciones de transferencia. De los datos existentes en España, se desprenden los siguientes resultados:

- Zonas rurales equivalente a 190 a 300 kg/hab año
- Zonas urbanas equivalente a 0,550 a 0,820 kg/hab día
- Media nacional equivalente a 295 a 400 kg/hab año
- Media nacional equivalente a 0,800 a 1.100 kg/hab día
- Media nacional equivalente a 313 kg/hab año
- Media nacional equivalente a 0,860 kg/hab día

Se tiene que tener en cuenta que la cantidad de residuos recogidos diariamente varía a lo largo de la semana, debido al modo de vida de la población y a la frecuencia de recogida de los residuos.

A nivel de variación mensual, en los mismos datos se establece que la temporada estival es en la que menos residuos se recogen, excepto en aquellos lugares que son destino del descanso vacacional.

La Dirección General de Política Ambiental está llevando a cabo una serie de informes para determinar la generación, composición y características de los residuos domésticos en territorio nacional. Hasta el momento se han finalizado los informes correspondientes a las comunidades autónomas de Valencia, Baleares, Andalucía, Castilla-La Mancha y Murcia.

De los mencionados informes se recoge que en España se generan actualmente 12.821.450 toneladas de residuos domésticos al año, cuya distribución territorial por comunidades autónomas se representa a continuación.

Comunidad autónoma	kg/hab día	kg/hab año	Población de hecho	T/año	%
Andalucía	0,850	306	6.875.628	2.103.942	16,4
Aragón	0,661	238	1.214.729	289.106	2,3
Asturias	0,850	306	1.114.115	340.919	2,7
Baleares	1,520	547	754.777	412.863	3,2
Canarias	1,078	388	1.614.882	626.574	4,9
Cantabria	0,840	302	524.670	158.450	1,2
Castilla-La Mancha	0,98	353	1.665.029	587.755	4,6
Castilla-León	0,706	254	2.600.330	660.484	5,2
Cataluña	1,100	396	5.971.525	2.364.732	18,4
Valencia	0,88	317	3.772.002	1.195.725	9,3
Extremadura	0,809	291	1.088.543	316.766	2,5
Galicia	0,750	270	2.785.394	752.056	5,9
Madrid	1,000	360	4.854.616	1.747.662	13,6
Murcia	1,020	367	1.014.285	372.243	2,9
Navarra	0,767	276	512.676	141.449	1,1
País Vasco	0,820	295	2.133.002	629.236	4,9
La Rioja	0,810	292	262.611	76.682	0,6
Ceuta	0,903	325	71.403	23.206	0,2
Melilla	1,078	388	55.613	21.600	0,7
ESPAÑA	0,917	330	38.885.580	12.821.450	100

3. Contenido de los residuos sólidos urbanos

A la hora de elegir un sistema de tratamiento se tienen que conocer, entre otros datos, las características y la composición de los residuos.

Varios son los factores que influyen en el contenido de los residuos urbanos, entre los que se destacan:

- Las características propias de la población: zonas rurales, residenciales, industriales, de servicios, etc.
- El clima y la estación del año. Se da la circunstancia de que los residuos recogidos en verano presentan mayor contenido en materia orgánica, mientras que los residuos producidos en invierno contienen más cenizas y escorias de combustibles fósiles o vegetales.
- Nivel de vida de la población. El consumo de productos precocinados, hace que, por una parte, aumenten los envases de plástico, aluminio, vidrio, cartón, etc., y por otra, que disminuyan aquellos residuos con alto contenido en restos vegetales y grasas.

A partir de la información recopilada procedente de diversos ayuntamientos y de empresas dedicadas a la gestión de los residuos sólidos urbanos, se ha establecido la composición media de los mismos en España, mostrándose en el cuadro adjunto:

COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN ESPAÑA

Residuos sólidos urbanos	%
Papel y cartón	13,0
Plásticos	5,0
Maderas, gomas y cueros	3,0
Textiles	2,0
Finos	6,0
Fermentables	52,0
Metales	2,5
Vidrio	7,0
Inertes	4,0
Varios	5,5
TOTAL	100,0

Por el tipo y procedencia de estos residuos hay que señalar que el contenido de los mismos puede llegar a ser muy heterogéneo, incluso dentro de los núcleos de una misma población. Por esta razón se plantea la necesidad de reagrupar a los distintos componentes de los residuos en categorías con algún grado de homogeneidad.

Es frecuente encontrar a los residuos englobados de la siguiente forma:

3.1. Residuos domiciliarios

Se presentan en dimensiones manejables y generalmente en recipientes más o menos normalizados previstos al efecto (bolsas, contenedores, etc.). Comprenden:

a) Residuos procedentes de las viviendas.

Suponen la parte más importante de los domiciliarios, y son en general los que más se asocian con la idea de los residuos sólidos urbanos.

Pueden clasificarse a su vez por zonas de procedencia como: residencial, comercial, industrial, mercados, etc., y por el nivel social y económico de quien los genera.

b) Residuos procedentes de limpieza viaria.

Su recogida suele ser independiente de la de los domiciliarios y realizada con equipos distintos.

3.2. Residuos voluminosos

Son materiales de origen doméstico que por su forma, tamaño, volumen o peso son difíciles de ser recogidos y/o transportados por los servicios de recogida convencionales.

Tal es el caso de muebles, colchones, electrodomésticos, etc. Suelen ir asociados a su abandono discriminado. Es un fenómeno reciente pero de acusado incremento, debido al aumento en la utilización de aparatos electrodomésticos y a la disminución de la duración de este tipo de enseres y mobiliario.

En una gran ciudad como Madrid se pueden recoger al año 35.000 Tm de estos residuos, cuya densidad es inferior a 0,2 Tm/m³. Exceptuando los que son inertes, la mayoría tienen gran importancia por su contenido energético.

3.3. Residuos comerciales

Están constituidos por los residuos producidos en la actividad de los diferentes circuitos de distribución de los bienes de consumo.

Son esencialmente envases y excedentes sin valor económico actual (residuos orgánicos de mercados y de actividades comerciales al por menor).

Ha de considerarse que las nuevas formas de distribución de bienes de consumo (hipermercados, centros comerciales, etc.) y las nuevas técnicas de acondicionamiento y manipulación dan una nueva dimensión a los problemas de los desechos comerciales.

Cada vez es más frecuente en este grupo la aparición de productos tóxicos y peligrosos que provienen de sobrantes o excedentes de partidas, que por razones técnicas o comerciales no se venden.

3.4. Residuos de construcciones y demolición

Proceden de obras, reparaciones y otros trabajos de poca importancia, pero bastante frecuentes. Principalmente están compuestos por ladrillos, madera, cerámica sanitaria, etc.

3.5. Residuos industriales asimilables a urbanos

Son aquellos generados por pequeñas industrias y talleres que por su mínima cuantía, el ámbito urbano de su lugar de producción y su baja toxicidad, se asimilan y gestionan junto con los urbanos.

3.6. Residuos sanitarios generales y biosanitarios asimilables a urbanos

Los residuos sanitarios generales no tienen ningún tipo de contaminación específica al no generarse en la actividad sanitaria propiamente dicha y no estar en contacto directo con el enfermo: despachos, comedores, cafetería, salas de espera, etc.

No necesitan ni contenedores especiales ni cuidados específicos para su recogida, transporte y eliminación.

Los biosanitarios asimilables a urbanos son aquellos sanitarios no contaminados, por lo que no presentan peligro de transmisión de enfermedades infecciosas ni de contaminación posterior.

Se incluyen en este tipo yesos, materiales de un solo uso, vendas sin restos de sangre ni otros fluidos corporales que provengan de pacientes infecciosos.

Residuos industriales

Los residuos industriales son los materiales inertes, asimilables a urbanos y tóxicos y peligrosos, resultantes de un proceso de fabricación, de transformación, utilización, consumo o limpieza cuyo productor o poseedor los destina al desecho. Quedarán excluidos de este apartado, por haberse tratado con anterioridad, los siguientes:

- Los efluentes gaseosos emitidos a la atmósfera.
- Las aguas residuales, con excepción de los residuos en estado líquido.

Por lo general, la contaminación puntual de un determinado suelo está en relación con la actividad industrial que lo circunda, a excepción de los casos de exportación interregional o internacional de residuos, por lo que el inventario del sector secundario implantado en la zona industrial servirá de referencia en una primera aproximación al estudio del foco contaminante.

Los residuos industriales inertes y asimilables a los urbanos no se diferencian de los originados en los centros de población o en cualquier otro sector de actividad diferentes del industrial. Por este motivo sólo merecen especial atención los residuos tóxicos y peligrosos.

Los residuos radiactivos de origen industrial se comentarán a continuación, junto con los de otras procedencias.

En la siguiente tabla se enumeran las siguientes actividades industriales y los contaminantes potenciales de los suelos.

Relación actividad industrial-contaminantes potenciales

Actividad industrial y/o comercial	Posible contaminación de suelos
Industria de batería y pilas	Metales pesados (Cd, Pb, Cr, Cu, Mg)
Minería	Cd, Pb, Cr, Cu, Mg, Zn, As, Ni, Se Cianuros
Industria del vidrio	Flúor, plomo
Industrias gráficas e impresión	Hidrocarburos clorados Hidrocarburos aromáticos Sustancias orgánicas fuertemente desintegradas
Pinturas, barnices y tintas	Hidrocarburos Metales (Pb, Cd, Ba, Cr) Alcoholes Residuos plásticos
Industria de protección de la madera	Hidrocarburos, Metales (Cu, Cr, As)
Industria textil	Hidrocarburos. Hidrocarburos aromáticos Metales Ácidos/álcalis Sales Residuos plásticos de tintes
Lavanderías químicas	Tetracloroetileno
Industria insecticida	Hidrocarburos halogenados Fenoles Mercurio y arsénico
Empresas del gas	Hidrocarburos aromáticos Hidrocarburos aromáticos policíclicos Cianuros
Industria petroquímica	Hidrocarburos aromáticos Hidrocarburos aromáticos policíclicos Metales (Pb, Zn, Cu, Ni, Cd) Alifáticos (aceite, fuel)
Refinerías	Hidrocarburos Ácidos/álcalis Asbestos
Industria metalúrgica/galvánica	Hidrocarburos aromáticos Metales pesados Cianuros

Relación actividad industrial-contaminantes potenciales (cont.)

Actividad industrial y/o comercial	Posible contaminación de suelos
Metales férricos y acerías	Metales (Cu, Ni, Pb) Ácidos/disolventes Hidroc. alifáticos (aceites minerales) Lodos de electrofiltros
Talleres	Hidrocarburos Ácidos de baterías. Plomo
Curtidos y tenerías	Hidrocarburos Ácidos Metales (Cu III) Sales Disolventes Cianuros Residuos de colorantes
Plásticos	Hidrocarburos aromáticos Metales (Co, Cd, Mg) Cianuros Aminas Monómeros reactivos
Goma y caucho	Hidrocarburos aromáticos Metales (Zn, Pb) Ácidos Compuestos de azufre Monómeros reactivos
Industria de transformación	Hidrocarburos Metales pesados Ácidos de baterías
Astilleros e industria naval	Hidrocarburos halogenados Fenoles Metales pesados Disolventes
Microelectrónica	Hidrocarburos simples Hidrocarburos clorados Hidrocarburos aromáticos Metales (Cu, Ni) Met. semiconductores (As, Cd, Zn, Sb) Ácidos

Relación actividad industrial-contaminantes potenciales (cont.)

Actividad industrial y/o comercial	Posible contaminación de suelos
Papeleras	Sustancias orgánicas fuertemente desintegradas Mercurio
Tabacos	Cadmio
Industria Vinícola	Cianuros Fenoles
Vertederos de residuos sólidos urbanos	Lixiviados Compuestos orgánicos e inorgánicos Metales
Laboratorios fotográficos y de film	Compuestos orgánicos Plata

Residuos hospitalarios

Se entiende por sanitarios todos los residuos generados en cualquier establecimiento o servicio en el que se desarrollen actividades de atención a la salud humana:

- Asistencia sanitaria al paciente.
- Análisis, investigación y docencia.
- Obtención o manipulación de productos biológicos humanos.
- Medicina preventiva.

Los centros potencialmente productores de residuos sanitarios son los siguientes:

- Hospitales.
- Clínicas privadas.
- Laboratorios de análisis clínicos.
- Ambulatorios.
- Centros de salud.
- Consultorios.
- Centros de salud mental.
- Centros de planificación familiar.
- Consultas privadas.

Es evidente que no todos los residuos que se produzcan en un centro sanitario tienen la misma capacidad contaminadora, ya que, dependiendo de su lugar de producción, existirán residuos con mayor o menor peligrosidad.

Este criterio de separación permite dar a cada grupo de residuos un tratamiento diferenciado.

La clasificación básica de los residuos sanitarios es la siguiente:

- Residuos sanitarios generales.
- Residuos sanitarios contaminados o biosanitarios asimilables a urbanos.
- Residuos anatómicos humanos de entidad.
- Residuos sanitarios contaminados o biosanitarios especiales.
- Residuos tóxicos y peligrosos.
- Residuos radiactivos.

La generación de los distintos tipos de residuos sanitarios varía enormemente. Por ejemplo, si se considera que la totalidad de los residuos biosanitarios son especiales, tal y como abogan algunas teorías, la generación habitual es de 1,5 kg/cama; si se tiene en cuenta las actividades de atención a la salud, se consideraría que sólo una parte de estos residuos son especiales y, por lo tanto, la generación en este caso disminuiría a 200 g/cama.

Residuos de actividades mineras

Son aquellos materiales no aprovechables que se forman en las extracciones mineras o de canteras. Su volumen suele ser elevado, y el grado de toxicidad o peligrosidad estará determinado por el tipo de material extraído y por la cantidad del mismo contenida en los residuos.

Residuos forestales

Están catalogados como tales los restos de madera procedentes de poda y entresaca que hay que retirar de las explotaciones forestales, con el fin de evitar riesgos de incendios y plagas de insectos que habitan en la madera.

A su vez, también se producen residuos considerados como tóxicos y peligrosos en las campañas de lucha contra estas plagas forestales.

Residuos agrícolas

Las raíces, las hojas y los frutos se descomponen en el suelo y mejoran sus propiedades agronómicas. Otros residuos, como tallos, y en general la parte aérea de la planta, se aprovechan en ganadería e industria. Por último, existen unos residuos no aprovechables en la zona en que son generados, y se producen en los siguientes cultivos:

- Cultivos de cereal grano: al ser cosechados producen residuos de naturaleza fibrosa, como pajas o cañotes.
- Cultivos denominados «industriales»: como fibras textiles y semillas oleaginosas, que producen como residuos los tallos de naturaleza lignocelulósica.
- Cultivos forestales y de viñedo: la poda anual es una exigencia para su cultivo y, por otra parte, constituye una fuente de material combustible de elevado poder calorífico.

Como consecuencia de las actividades agrícolas intensivas, se puede provocar la contaminación del suelo por las diversas sustancias utilizadas en la fertilización del mismo, así como en la lucha contra las plagas, tanto animales como vegetales (productos fitosanitarios-plaguicidas, herbicidas).

Residuos ganaderos

Estos tipos de residuos se obtienen principalmente en las siguientes actividades industriales:

- Cría de ganado:

Los residuos asociados a esta actividad, pueden presentarse en forma sólida o líquida.

Los primeros, denominados estiércol, están constituidos por una mezcla de defecaciones sólidas y líquidas junto con la cama del ganado. Esta masa se estabiliza, tras sufrir un proceso espontáneo de fermentación aerobia.

Los residuos líquidos están formados por la mezcla de defecaciones sólidas, líquidas y las aguas de lavado de los recintos de la explotación ganadera. Normalmente son recogidos en fosas.

Las cantidades generadas de ambos tipos de residuos estarán en función del censo ganadero. Su utilización preferente es como abono para explotaciones agrícolas.

- Mataderos industriales:

Son restos de órganos de despiece, así como líquidos procedentes de animales sacrificados. La parte sólida se suele utilizar en la preparación del alimento para animales de compañía, y la líquida se elimina a través de las aguas residuales.

Residuos radiactivos

El origen de los residuos radiactivos es muy variado. Se producen debido al manejo de los compuestos radiactivos, utilizados en las siguientes actividades:

- Labores de extracción del uranio en minas subterráneas o canteras y el tratamiento de los minerales radiactivos por medio de labores de concentración hasta obtener un precipitado (uranatos).
 - Estériles y residuos líquidos de explotación no apreciables.
 - Residuos del proceso de concentración constituidos por restos del mineral triturado y no disuelto con radionucleidos naturales.
 - Maquinaria y materiales contaminados.

En general, este tipo de residuos son más importantes en volumen que por su actividad, no produciéndose nuevos elementos radiactivos, si no que los mismos elementos concentrados quedan dispersados y expuestos a fenómenos atmosféricos.

- La fabricación y enriquecimiento del combustible nuclear.

En los procesos de purificación y transformación del concentrado procedente de la extracción, lleva consigo la producción de residuos sólidos de variada naturaleza, cuyos volúmenes y actividad son relativamente bajas.

- La explotación de reactores nucleares y la clausura de los mismos.

El proceso nuclear da lugar a productos de activación y fisión que pasan disueltos a distintos circuitos, así como también se considera residuo al uranio combustible que no sea sometido a un reproceso.

Así pues, en los reactores se producen residuos de baja, media y alta actividad.

- El tratamiento de combustibles irradiados.
- Trabajos de investigación científico-técnica.

Los residuos producidos son fuentes encapsuladas y elementos trazadores, así como material diverso que resulta contaminado de los ensayos que realizan.

- Proyectos con fines militares.
- Utilizaciones específicas en procesos industriales.

Se consideran residuos radiactivos a las fuentes radiactivas que dejan de tener utilidad para el fin previsto, y a los materiales contaminados durante el uso de dichas fuentes.

- Diagnósticos médicos y tratamientos terapéuticos.

Éstos pueden ser: jeringuillas, agujas, viales contenedores de líquidos radiactivos, guantes, papel, tejidos y material médico diverso.

En los ensayos de ciertos fármacos con animales, que dan lugar a cadáveres y órganos contaminados radiactivamente que también es necesario tratar como cualquier otro material.

- Actividades puntuales en el sector servicios.

7

Transporte y dispersión de los contaminantes

TRANSPORTE Y DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

La calidad del aire en una zona, y como consecuencia los efectos inducidos sobre la misma, son función directa de la cuantía de la emisión y de los fenómenos de transporte y dispersión que tengan lugar en la atmósfera sobre los penachos que conforman los gases y las partículas emitidas por un foco contaminante.

Aspectos de la atmósfera a considerar en los fenómenos de transporte y difusión de contaminantes

Temperatura y presión

Como se ha comentado, una de las propiedades físicas que presenta la capa baja de la atmósfera (troposfera) es la disminución prácticamente constante de la temperatura con la altura.

La capa de aire de aproximadamente un metro y medio a partir de la superficie sufre una fuerte influencia energética del suelo inmediato, y al ser la turbulencia en esta zona muy pequeña, es fácil encontrar diferencias muy acusadas de temperatura en puntos próximos entre sí. A partir de esta capa el decremento medio de la temperatura es mucho más regular.

De esta forma se puede definir la temperatura junto al suelo como la temperatura de aire obtenida al nivel más bajo, a partir del cual es una magnitud definida sin ambigüedad. Por esta razón se ha convenido fijar la altura del termómetro a un metro y medio sobre el suelo natural.

Cuando se habla de la temperatura del aire hay que tener en cuenta que su verdadero concepto se alcanza con la teoría molecular, según la cual esta magnitud mide la energía cinética media de las moléculas del mismo. Es, por tanto, una medida de la intensidad de la energía interna de las moléculas. La temperatura del aire no es la temperatura que tomaría un cuerpo expuesto a la radiación solar y sumergido en el aire, ya que el poder de absorber las radiaciones y, en consecuencia, de aumentar su temperatura, es una propiedad que los cuerpos poseen en distinto grado. Por esta razón hace tiempo que se ha desechado la llamada temperatura al sol, de tal forma que la temperatura a la sombra es realmente la temperatura del aire.

El aire es casi transparente a las radiaciones solares; los dos componentes relativamente importantes que absorben radiaciones son el agua y el dióxido de carbono, de tal manera que puede decirse que el aire sólo se calienta por absorción de las radiaciones procedentes del suelo y sólo se enfría por emisión. Aunque la radiación del suelo es muy desigual si la superficie de éste es heterogénea, la mezcla por turbulencia produce casi una uniformidad térmica en el sentido horizontal, siendo la vertical mucho menos eficaz.

Por otra parte, la presión atmosférica viene determinada por la temperatura del aire y por la fuerza de la gravedad que actúa sobre las moléculas. La presión atmosférica disminuye rápidamente con la altura debido a que el 80 % de la masa total de la atmósfera se encuentra confinada dentro de los 12 primeros kilómetros.

Debido al distinto calentamiento por parte de la radiación solar y a la desigual distribución de la masa atmosférica, se crean altas y bajas presiones en la troposfera. Ello genera los vientos como consecuencia de diferencias de presión. Sin embargo, éstos no soplan directamente desde las altas a las bajas presiones, debido al movimiento de rotación de la Tierra.

Los vientos con dirección contraria al movimiento de las agujas del reloj, alrededor de un sistema de baja presión, soplan hacia el centro de la misma. Esto obliga al aire a efectuar una expansión cuando llega al centro de baja presión, con el consiguiente enfriamiento, produciéndose el típico clima nuboso de los sistemas de baja presión.

La velocidad del viento aumenta continuamente con la altura por encima de la superficie terrestre, ya que hay menor esfuerzo cortante, has-

ta la llamada región de corriente en chorro. Esta es una zona que circunda la Tierra, a una altura de aproximadamente 12 km. La altura de la corriente en chorro aumenta en verano, cuando la luz solar calienta la atmósfera inferior y expande el aire.

Constituyentes

En el apartado correspondiente a la estructura de la atmósfera, se han descrito los principales contaminantes, concentraciones normales en el aire seco, sus orígenes y mecanismos de eliminación.

Un compuesto siempre presente en la atmósfera que ya se ha descrito, si bien no está considerado como contaminante, es el vapor de agua. Su presencia influye determinantemente en los fenómenos meteorológicos y, consecuentemente, en los procesos de dispersión de contaminantes.

Se han definido una serie de índices que nos proporcionan información sobre el contenido de vapor de agua en el aire. Son los siguientes:

- *Humedad absoluta*: es la densidad del vapor en g/m³.
- *Tensión de vapor*: es la presión parcial del agua en el aire (mb). Depende de la humedad absoluta y de la temperatura.
- *Humedad relativa*: es la relación existente entre la presión de vapor del aire y la presión de saturación a la misma temperatura (%). De la humedad relativa dependen la mayor parte de los efectos meteorológicos.

Otro constituyente normal del aire, también anteriormente descrito, es el polvo atmosférico, cuyo origen es muy variado, generalmente procedente de fenómenos naturales.

El polvo influye sobre el clima por dos mecanismos:

- Impide y absorbe la llegada de radiación solar directa.
- Provoca fenómenos de condensación, dependiendo de la naturaleza de las partículas.

Estabilidad vertical de la atmósfera

Elevación adiabática del aire

La variación de la temperatura del aire en función de la altura es un fenómeno determinante en los mecanismos de dispersión atmosférica y del ascenso de los penachos de los focos de emisión.

Cuando una pequeña porción de aire asciende desde una cota determinada a otra de mayor altura, experimenta una dilatación al pasar a una zona de menor presión. Al dilatarse su temperatura disminuye, es decir, se enfría al ascender, suponiendo que no existe intercambio de calor con el medio que le rodea.

El gradiente adiabático térmico del aire seco en función de la altura es de $-0,98^\circ \text{C}/100 \text{ m}$.

No obstante, el aire existente en la atmósfera no está seco, y debe tenerse en cuenta también el vapor de agua que lleva en su interior la porción de aire teóricamente diferenciada, pues sus cambios de estado absorben o liberan energía. En el mismo supuesto, si la citada porción de aire asciende, al condensarse el vapor que contiene se libera calor, lo que atenúa el enfriamiento adiabático del aire seco. El gradiente promedio de temperatura del aire húmedo es del orden de $-0,65^\circ \text{C}/100 \text{ m}$.

Si se compara el perfil real de temperaturas del ambiente que rodea la porción de aire con el perfil adiabático de éste en sus movimientos verticales, podemos determinar la estabilidad de los mismos. Cuando la variación de la temperatura con la altura es positiva, es decir, cuando la temperatura aumenta con la altura, se dice que hay inversión.

La presencia de una inversión térmica significa que existe una masa de aire frío y pesado por debajo de una masa de aire caliente y ligero. Habrá poca capacidad de mezcla, por lo que la inversión contribuye a dificultar la dispersión de los contaminantes.

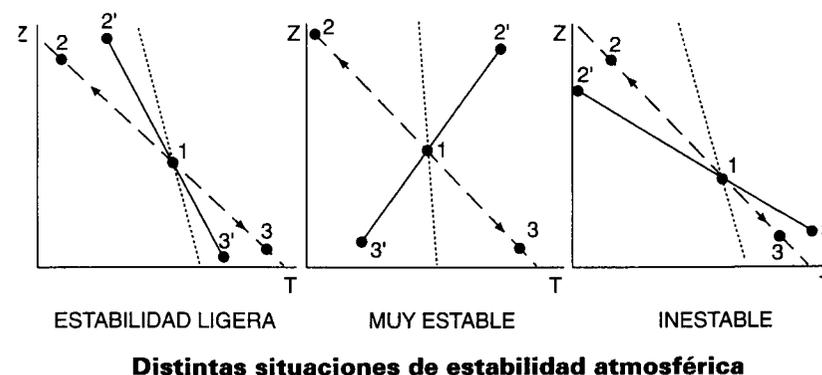
Estabilidad de la atmósfera

Se dice que una atmósfera es:

- Estable, cuando impide los movimientos verticales del aire.
- Inestable, cuando los favorece.
- Indiferente, cuando no los afecta.

En las figuras siguientes, las líneas continuas representan el perfil real de temperaturas en la atmósfera tal como podría ser medido, y las líneas discontinuas el perfil de temperatura, sin intercambio de calor con el entorno que le rodea, que correspondería a una porción de aire que se desplazase verticalmente, partiendo desde un punto fijo 1.

En la figura de la izquierda, si la burbuja de aire asciende al punto 2, su temperatura es inferior que la del aire a la misma altura 2'. Tendrá, por tanto, mayor densidad, con lo que tenderá a volver a su punto de partida.



Si la burbuja desciende hasta el punto 3, su temperatura será superior que la del aire que le rodea 3'. Será menos densa que éste, e igualmente regresará al punto de partida por flotación. Este proceso es propio de una estabilidad atmosférica ligera.

En la figura de la derecha, siguiendo el mismo razonamiento, encontramos que cualquier movimiento vertical de la porción de aire queda amplificado al encontrarse más ligero (si se desplaza hacia arriba) o más denso (si lo hace hacia abajo) que el aire que la rodea. Esto da lugar a inestabilidad, y el aire tiende a subir o a bajar de forma continuada.

Por último, la figura central representa un perfil correspondiente a una inversión de temperaturas, con gran estabilidad y poca capacidad de mezcla vertical.

Perfiles de temperatura de la porción de aire:

- Perfil adiabático seco.
- Perfil adiabático húmedo (más real).
- Temperatura real de la atmósfera.
- Z: Altura.
- T: Temperatura.

Inversiones de temperatura

Los fenómenos de inversión de temperatura pueden deberse a diversas causas, entre ellas:

1. Inversión por radiación, de superficie o nocturna

Se origina durante la noche, especialmente con cielos despejados y con los vientos en calma.

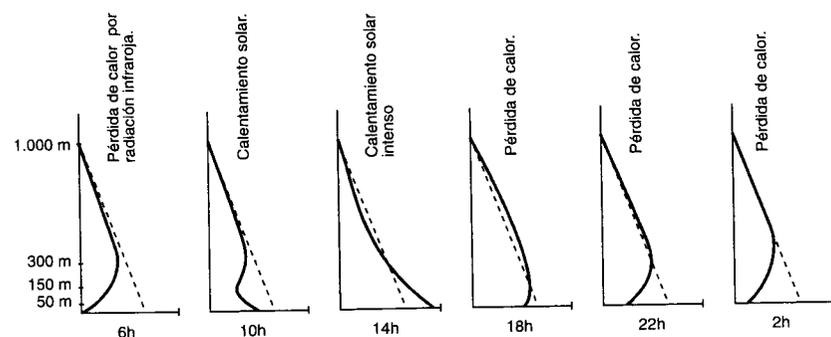
Su formación se debe al enfriamiento de las capas de aire más próximas al suelo durante la noche, que a su vez enfrían a las capas vecinas más altas. Cuando vuelve a salir el sol el enfriamiento habrá alcanzado una altura a partir de la cual la temperatura no se habrá modificado.

La intensidad y profundidad (altura) de este tipo de inversión depende fundamentalmente de las características térmicas del tipo del suelo.

La ruptura de la capa de inversión se produce por un proceso similar de radiación. El sol, por la mañana, calienta el suelo, que a su vez calienta las capas de aire más próximas y éstas a las adyacentes, hasta que se alcanza la altura límite de enfriamiento de la noche anterior, momento en el cual se rompe la inversión.

2. Inversión por advenimiento o transporte

Se trata también de una inversión de tipo superficial, y se forma cuando el aire caliente sopla sobre una superficie más fría.



Valoración típica del perfil de temperaturas en un día soleado (Millán, 1991)

3. Inversión por subsidencia o hundimiento

Viene asociada al hundimiento a poca velocidad del aire en las masas anticiclónicas, que se calienta al descender.

Se forma a unos miles de metros de altura, y se intensifica mientras duran las altas presiones, pudiendo llegar a descender su base hasta casi unirse a la inversión de radiación.

4. Inversión frontal

Se origina debajo de los frentes cálidos y fríos en donde el aire caliente sube por encima de otro más frío cerca de la superficie.

Estratificaciones térmicas particulares

Efectos urbanos

Las condiciones meteorológicas en zonas fuertemente urbanizadas y generalmente industrializadas presentan notables diferencias con relación a las adyacentes.

Las razones fundamentales de las peculiaridades térmicas del núcleo urbano son:

- Existencia de fuentes de calor (vehículos, calefacciones) muy concentradas.
- Radiación nocturna del calor absorbido durante el día por las estructuras urbanas (las inversiones desaparecen o se retrasan).
- Existencia de una capa de contaminación sobre la ciudad (humo, partículas, CO_2) que actúa como foco emisor o receptor de la radiación infrarroja, volviéndola a radiar hacia arriba o hacia abajo, con lo cual se enfría ella misma por la parte superior, a la vez que calienta la ciudad por la inferior, produciendo un efecto de inversión a la altura de esta capa.

Todos estos efectos tienen como resultado la formación de la denominada «isla de calor», creándose corrientes de aire ascendentes desde el centro de la ciudad, que hacen descender otras masas de aire sobre la periferia. El aire de estas zonas circula nuevamente de forma radial hacia el centro de la ciudad, con lo que se cierra el circuito. En general, en las zonas limítrofes de estos grandes núcleos urbanos es donde se encuentran