

## La contaminación en Galicia

PILAR BERMEJO BARRERA

Universidade de Santiago de Compostela

### RESUMEN

Se describen los fundamentos teóricos de los principales procesos de contaminación partiendo del análisis de los ciclos naturales más representativos, como son el ciclo del agua, del carbono y del nitrógeno. A continuación se estudia la contaminación de la atmósfera, diferenciando en este caso los problemas globales, tales como los relacionados con el ozono, el efecto invernadero y la lluvia ácida, y los problemas propios de la contaminación atmosférica en Galicia. Posteriormente se analiza la contaminación de las aguas oceánicas y continentales (subterráneas y superficiales), y la contaminación del suelo, en especial en lo que se refiere a los efectos de los agentes químicos contaminantes de mayor implicación, como los pesticidas y los fertilizantes o los residuos agrícolas, domésticos e industriales.

**Palabras clave:** Galicia, contaminación, medio ambiente

### ABSTRACT

Theoretical foundations of main polluting processes are herein described. Firstly, natural cycles, such as water, carbon and nitrogen are described. From then on, atmosphere pollution is revised in a twofold fashion: Differentiation is made between, on the one hand global issues such as those affecting ozone, greenhouse effect and acid rain, and on the other hand specific problems affecting Galicia's atmospheric health. In a different section of this work oceanic and continental waters pollution is studied, with a particular emphasis on the most damaging chemical polluting agents such as pesticides, fertilizers; and agricultural, household and industrial wastes.

**Key words:** Galicia, pollution, environment.

## INTRODUCCIÓN

“Cuando allá por el año de 1960 se comenzó a considerar el problema de la Contaminación, nadie podía suponer que en pocos años se pudiera crear con este motivo una conciencia de alarma y repudio por la tecnología contemporánea. Si por un lado el ambiente es un tesoro natural de valor incalculable que pertenece a la humanidad y que ha de conservarse en condiciones que permita su uso y disfrute a todos los hombres presentes y futuros; por otra parte la conservación del Medio significa también la protección de esta finita despensa de que disponemos (“La Tierra”) haciendo que sus existencias se utilicen en ciclos cerrados mediante el uso de energías limpias, evitando así en gran parte su agotamiento irreversible. El cruce de los intereses tecnológicos, sociales, y políticos ha hecho que el tema sea de actualidad, pero también es la causa de su enfoque desde distintos puntos de vista no siempre bien elegidos o coordinados”.

Con estas palabras comenzaba el Profesor Don Francisco Bermejo Martínez el discurso inaugural de apertura de curso académico en la Universidad de Santiago de Compostela en octubre de 1982 (1), 20 años más tarde siguen teniendo plena validez.

Aunque el interés por los problemas de contaminación ambiental es relativamente reciente, unos 50 años, el deterioro del ambiente no es proceso que se haya producido recientemente. La contaminación del ambiente es incluso anterior al comienzo del uso de los recursos naturales por el hombre. Los grandes incendios forestales provocados por rayos y los volcanes de épocas geológicas provocaron grandes catástrofes mundiales. Sin embargo lo que ha sucedido a lo largo de la historia es que el crecimiento de la población así como su concentración en ciudades cada vez mayores produjeron cantidades cada vez mayores de residuos humanos, de animales y basuras a eliminar. Las plagas de cólera, tifus y peste bubónica del siglo XIII se debieron a la falta de medios adecuados para la evacuación de residuos. Sin embargo el problema de la contaminación tuvo poca significación hasta después de la Primera Guerra Mundial y se ha vuelto muy importante en algunos países después de la Segunda.

A lo hora de escribir este capítulo en el que se pretende dar una visión de la evolución global de la contaminación ambiental en Galicia se presentan una serie de problemas y limitaciones. En primer lugar la amplitud del tema es tan grande que es difícil en unas pocas páginas dar una visión general completa del mismo. En segundo lugar se plantean bastantes problemas a la hora de buscar datos reales que nos permitan hacer una evaluación de como ha ido variando la contaminación, ya que por un lado la mayoría de los datos son recientes, y no se dispone de datos anteriores y por otra parte muchos de esos datos son datos de informes realizados por las diferentes Administraciones encargadas en la actualidad de estudiar este tipo de problemas, y no son siempre de fácil acceso al público en general.

Otro problema que se plantea es como escribir los procesos contaminantes de manera que puedan ser comprendidos por cualquier persona sin que tenga necesariamente formación científica. Con el fin de disminuir este problema se introduce antes de hablar de

cada contaminantes una sencilla explicación del mismo. Por ello en una primera parte del capítulo se estudian los ciclos naturales mas representativos, estos son los ciclos del agua, del carbono y del nitrógeno, ya que la mayoría de los contaminantes van a participar en los mismos. A continuación se estudia la contaminación de la atmósfera, diferenciando en este caso los problemas globales, tales como el problema del agujero del ozono, el efecto invernadero y la lluvia ácida y a continuación los problemas propios de la contaminación atmosférica en Galicia. Posteriormente pasamos al estudio de la contaminación de las aguas dividiéndose este en la contaminación de las rías gallegas, la contaminación de las aguas subterráneas y por último la contaminación de las aguas superficiales. El último apartado se dedica al estudio de la contaminación del suelo, estudiándose por un lado los efectos de agentes químicos contaminantes de mayor implicación, como son los pesticidas y los fertilizantes. Por otra parte se estudian los problemas causados por los residuos de todo tipo, residuos agrícolas, residuos domésticos y residuos industriales.

No se han tratado temas tales como los efectos de la contaminación por radón en los edificios de piedra, las alteraciones sobre nuestro patrimonio cultural producidas por la contaminación atmosférica, las posibles alteraciones producidas por las nuevas formas de generar energía, como los generadores eólicos de gran difusión en este momento, las alteraciones ocasionadas por los incendios forestales, o la contaminación producida por las ondas de la telefonía móvil etc.

A pesar de las dificultades ya comentadas espero que el lector pueda adquirir una idea general de la evolución y del estado actual de la contaminación en Galicia al finalizar la lectura de este capítulo.

## LOS CICLOS NATURALES

El *ambiente del hombre*, o en su sentido mas amplio *la biosfera* abarca la corteza terrestre, la baja atmósfera que la envuelve así como las diferentes formas de vida que existen en ellas. Dada la amplitud de la biosfera suele dividirse para su estudio en unidades más pequeñas denominadas ecosistemas, concebidos como el conjunto de seres vivos que viven en una zona con su suelo, aire y agua correspondiente.

Las relaciones dinámicas que existen entre los seres vivos y su ambiente se pueden representar como **ciclos naturales** en los que circulan de manera continua los constituyentes esenciales necesarios para la vida. En ambientes no deteriorados estos ciclos transcurren principalmente de manera equilibrada con mínimas variaciones. Este funcionamiento equilibrado de los ciclos contribuye a la estabilidad de la biosfera, lo cual es fundamental para la existencia y desarrollo de la vida sobre la tierra. La actividad del hombre puede alterar los ecosistemas, y los cambios producidos no siempre resultan favorables al ambiente.

A pesar de la gran importancia de esta zona para la vida en el planeta, hay que indicar que muchos de los procesos químicos que ocurren en ella dependen de otros que se producen en las capas más altas de la atmósfera, ya que a pesar de la existencia de dis-

tintas capas de la atmósfera perfectamente diferenciadas con características físicas y químicas específicas, no debemos olvidar que toda la atmósfera forma una unidad y que entre sus diferentes capas existe un intercambio de materia y energía que en principio se mantiene en equilibrio.

Para poder comprender los efectos inmediatos y a largo plazo de las acciones humanas sobre los ecosistemas se hace necesario conocer el funcionamiento de los ciclos naturales de las sustancias que como el agua, el nitrógeno, el carbono, fósforo, azufre, oxígeno, metales etc condicionan los ciclos naturales.

## El ciclo del agua

El **ciclo hidrológico** es el proceso natural continuo mediante el cual el agua es intercambiada entre la atmósfera, el suelo, el mar, las plantas, los animales y todas las actividades humanas (Figura 1). El agua de las nubes se precipita sobre la superficie terrestre y marina. Parte del agua que corre sobre el suelo penetra bajo el mismo circulando en corrientes subterráneas y manteniéndose a cierto nivel sobre capas de arcilla y estratos rocosos. Una porción del agua subterránea asciende por capilaridad a los niveles superficiales del suelo, sobre todo en tiempos de sequía, y otra parte es extraída por las raíces de los vegetales, y otras porciones del agua subterránea salen al exterior dando lugar a las fuentes, ríos y lagos ó son extraídas perforando pozos.

El agua superficial en forma de ríos, lagos y embalses junto con el agua subterránea es la principal fuente de suministro para el hombre. La evaporación producida con la ayuda de la energía solar y la transpiración vegetal de las diferentes formas del agua superficial cierran el ciclo volviendo el agua a la atmósfera. La cantidad de agua evaporada de los océanos suele exceder en un 9% a la lluvia caída sobre los mismos. Este exceso se traslada en forma de vapor sobre la superficie terrestre equilibrando así el ciclo. El agua subterránea y la superficial tienen características diferentes; la subterránea puede disolver sustancias minerales de las formaciones geológicas que atraviesa a la vez que gradualmente son retenidos por el terreno la mayoría de los microorganismos originalmente presentes en ella. A veces la concentración de sales disueltas es alta y esto puede hacerla inutilizable para usos domésticos ó industriales. Sin embargo normalmente el agua subterránea es de mejor calidad que el agua superficial para su uso como agua potable.

El agua superficial puede disolver o arrastrar en suspensión sustancias hasta llevarlas al mar. Si el contenido de sales nutritivas es alto pueden aparecer problemas de uso debido al crecimiento de algas. Además si el agua contiene mucha materia orgánica biodegradable puede soportar un crecimiento grande de bacterias.

El ciclo hidrológico consiste en un proceso continuo y equilibrado de evaporación, transpiración, precipitación, escorrentía y circulación del agua subterránea. El tiempo medio que necesita el agua para cubrir todo el recorrido desde el océano a la atmósfera pasar por la tierra y volver al mar es por término medio de unos 10 días, aunque puede tardar sólo unas pocas horas en las zonas costeras del trópico y hasta 10.000 años en las regiones polares.

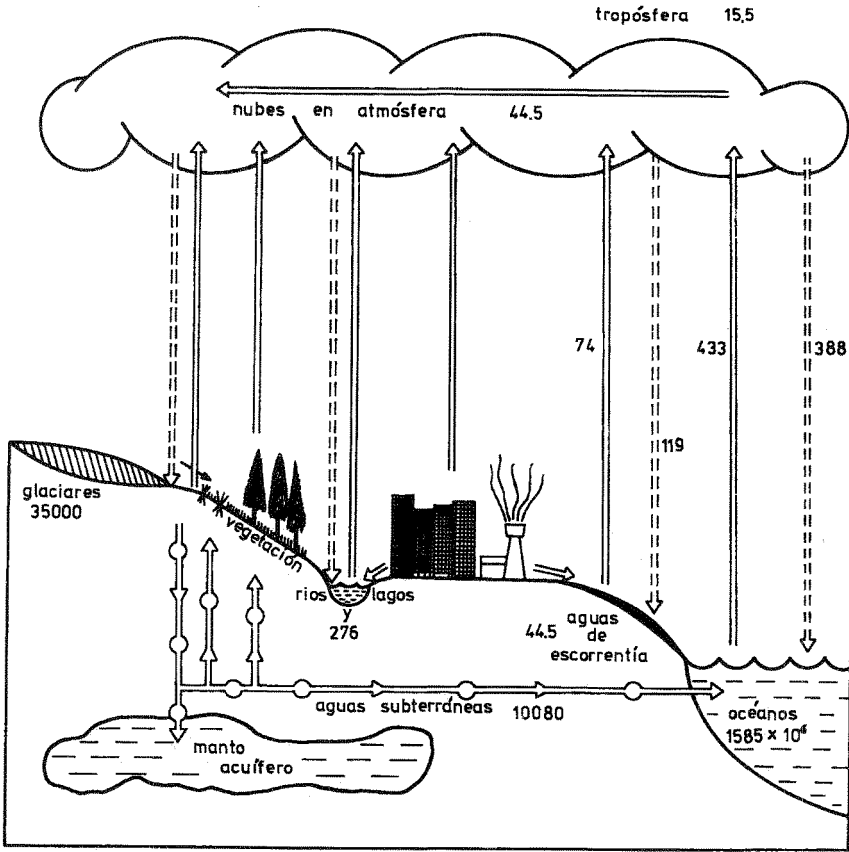


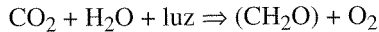
Figura 1. Ciclo hidrológico, las cifras expresan  $10^{12}m^3$

En el mundo se estima que existen unos 1.600 millones de  $Km^3$  de agua, el 97% de ellos están en los océanos, unos 35 millones en los hielos polares, unos 10 millones bajo el suelo,  $50.000 Km^3$  en forma de nubes y vapor de agua en la tropósfera y solo  $400 Km^3$  contenidos en los seres vivos para los cuales es fundamental para su mantenimiento (1).

### El ciclo del carbono

El ciclo del carbono mantiene vivo nuestro planeta en términos tanto biológicos como geológicos, el reciclaje del carbono en la biosfera convierte a la tierra en un caso único. La gran cantidad de oxígeno presente en la atmósfera puede permanecer gracias al ciclo del carbono ya que sin el todo este oxígeno habría sido enterrado en la columna geológica. Las plantas reponen el oxígeno al utilizar el dióxido de carbono, que es una fuente primaria de carbono para la fotosíntesis. El carbono es capaz de formar con unos cuantos elementos tales como el hidrógeno, el azufre y el nitrógeno una gran cantidad de compuestos distintos que llamamos materia orgánica.

En la atmósfera, la especie predominante del carbono, es el dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ . Se estima que la cantidad total de carbono presente en esta forma es de 700.000 millones de toneladas. De esta cantidad aproximadamente un 20% se transforma cada año en materia orgánica gracias a las plantas verdes y determinados microorganismos, fundamentalmente a través de la fotosíntesis. En este proceso el  $\text{CO}_2$  junto con moléculas de agua y por acción de la luz se convierte en materia orgánica, ( $\text{CH}_2\text{O}$ , representa la forma más simple de materia orgánica) y se produce la liberación de oxígeno molecular



En realidad la fotosíntesis es solo uno de los procesos en que interviene el  $\text{CO}_2$ . En la figura 2 se representa el ciclo del carbono, y en ella se observa el papel central del  $\text{CO}_2$ . El  $\text{CO}_2$  consumido por las plantas en la fotosíntesis es devuelto a la atmósfera en procesos de respiración (animal y vegetal), así como también gracias a la respiración del suelo (1).

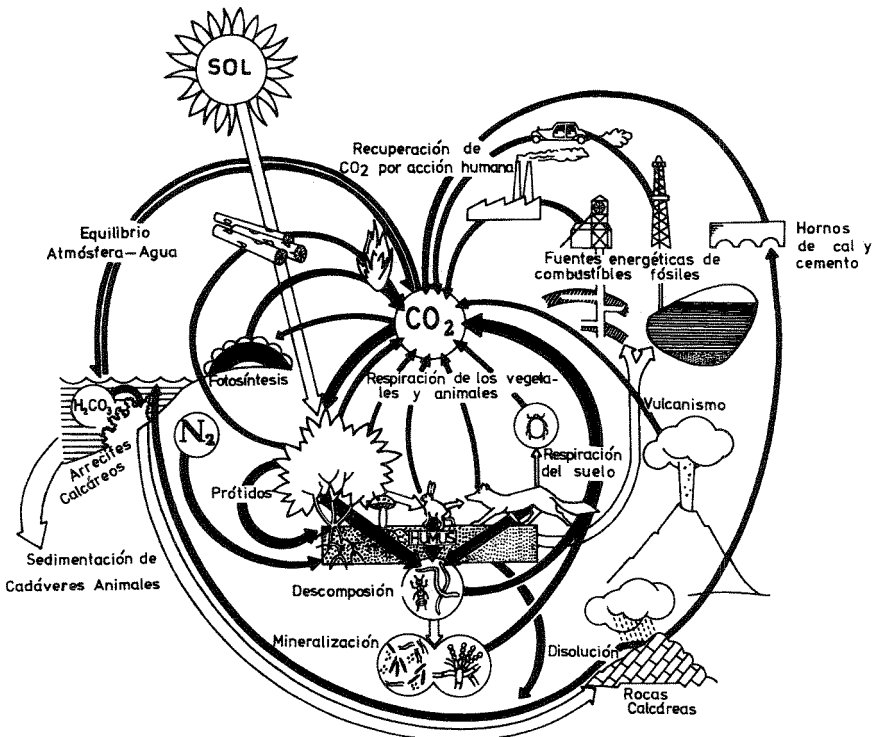


Figura 2. Ciclo del carbono. Las flechas blancas corresponden al carbono que se fija en formas fósiles.

Pero la fotosíntesis es solo uno de los procesos en los que interviene el  $\text{CO}_2$ . Procedente de las rocas y de los volcanes llegan a la atmósfera  $10^{16}$  toneladas de carbono al año, y las combustiones de carbón, petróleo y gas natural son otras  $10^{13}$  toneladas en el mismo período. En ciertas condiciones se produjo un retardo en el ciclo del carbono al acumularse cadáveres de animales y restos vegetales en humus, turbas, lignitos, carbones y petróleos. Este carbono está retornando ahora a la atmósfera al quemar los com-

bustibles fósiles. Este equilibrio es muy frágil y puede romperse por distintas causas. Las erupciones volcánicas, la quema de biomasa y sobre todo la combustión de carburantes fósiles pueden añadir importantes cantidades de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera y desequilibrar el ciclo. El hombre interviene en el ciclo del carbono de forma poco adecuada liberando grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  debido a la combustión de combustibles fósiles que no son más que una mezcla de hidrocarburos formados por sedimentación de residuos orgánicos sometidos a elevadas condiciones de presión y temperatura durante miles de años.

Otra actividad que puede alterar de forma significativa los niveles de  $\text{CO}_2$  atmosférico es la creciente deforestación que tiene lugar principalmente en las zonas tropicales. Aunque los bosques tropicales ocupan solo el 13% de la superficie continental terrestre representan la mitad de la masa forestal del planeta. La cantidad total de carbono en la vegetación y en el suelo tropical representa la mitad del carbono que contiene la atmósfera terrestre en forma de  $\text{CO}_2$ . Los cambios en los bosques tropicales pueden alterar grandemente la concentración del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera ya que cada año estos bosques consumen un 3% del  $\text{CO}_2$  atmosférico a través de la fotosíntesis convirtiéndolo en materia orgánica. Por ejemplo en 1980 la relación de superficie deforestada/ reforestada fue de 10/1 lo cual produjo una emisión de  $\text{CO}_2$  a causa de la combustión de arboles y vegetación asociada a la tala ó bien a su lenta descomposición, que se estima fue de un 40% de la cantidad emitida por la combustión de carburantes en todo el mundo. Pero no solamente la quema de biomasa o su lenta descomposición da lugar a la generación del  $\text{CO}_2$ , sino que también el carbono almacenado en el suelo se altera tras la tala masiva de árboles dependiendo la cantidad perdida de la actividad que se vaya a desarrollar en el terreno deforestado. En resumen en la actualidad la estimación de la emisión a la atmósfera de carbono en forma de  $\text{CO}_2$  a causa de la deforestación tropical representa aproximadamente un 30% de las emisiones totales.

En los océanos es el plancton el que realiza la fotosíntesis asimilando el  $\text{CO}_2$  disuelto en la parte superficial de los océanos y liberando oxígeno que permanece disuelto en el agua. Por el contrario los peces consumen el plancton y el oxígeno para respirar. Igual que sucede en tierra se produce la sedimentación en el fondo de los océanos por acumulación de cadáveres. En las aguas el ciclo del carbono puede desviarse al acumularse en diversas formas de carbonato cálcico en cora-

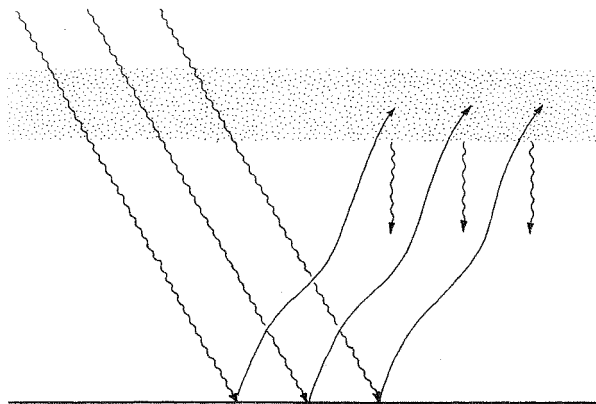


Figura 3. El principio del efecto invernadero. La energía solar que llega a la tierra se convierte en radiación infrarroja que es absorbida por los gases invernadero y la rebota de vuelta al suelo (2)

les, calizas, etc. El carbono de estas formaciones puede volver a circular cuando las lluvias, líquenes o algunas plantas atacan a las materias o rocas calizas ó por la actividad humana por la fabricación de la cal. El  $\text{CO}_2$  es uno de los gases invernadero más importantes ya que retiene el calor solar que sino se escaparía al espacio, por ello grandes cambios en el ciclo del carbono afectan profundamente al clima (Figura 3).

El  $\text{CO}_2$  juega un papel vital en la regulación de la temperatura de la tierra actuando como un termostato, si el ciclo del carbono eliminara una cantidad excesiva de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera la tierra se enfriaría. Por el contrario si el ciclo del carbono produjera demasiado  $\text{CO}_2$  la tierra se calentaría. Por tanto pequeñas alteraciones del ciclo del carbono pueden afectar al clima y en último término a la vida.

Los océanos juegan un papel primordial en la regulación del nivel de dióxido de carbono atmosférico ya que en las capas superiores del océano la concentración de gases esta en equilibrio con la atmósfera. La capa mezcla del océano, los 75 metros superiores, contienen tanto  $\text{CO}_2$  como toda la atmósfera. El gas se disuelve en las aguas debido a la acción de las olas y se transforma en bicarbonatos que son utilizados por los organismos marinos para generar sus esqueletos carbonatados y otras estructuras de soporte. Cuando los organismos mueren sus esqueletos caen al fondo donde se disuelven y se convierten en la mayor reserva de  $\text{CO}_2$ . El océano contiene 60 veces más carbono que la atmósfera principalmente en forma de bicarbonatos disueltos.

### El ciclo del nitrógeno

El nitrógeno constituye el 80% de la atmósfera y es uno de los elementos principales para la vida. El carbono, nitrógeno e hidrógeno son elementos esenciales para la producción de proteínas y de otras moléculas biológicas. Sin embargo el nitrógeno es un gas casi inerte y necesita que se produzcan diferentes reacciones químicas para transformarse en especies útiles en la naturaleza. Además del nitrógeno gaseoso presente en la atmósfera, el nitrógeno puede aparecer como nitrato, ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), óxidos varios ( $\text{NO}_x$ ) y proteínas. En la figura 4 se representa el ciclo del nitrógeno y en ella podemos ver la existencia de las diferentes formas (1).

El nitrógeno atmosférico proviene de las primeras erupciones volcánicas y de la rotura de la molécula de amoníaco que era uno de los principales componentes de la atmósfera primitiva. El nitrógeno se transforma con facilidad en nitratos y se disuelve en el océano. Una vez allí las bacterias desnitrificadoras devuelven el nitrógeno-nitrato a su estado gaseoso. Si esto no ocurriera todo el nitrógeno atmosférico habría desaparecido hace tiempo y la presión atmosférica de la tierra sería tan solo una fracción de la actual. La lluvia aporta al suelo unos 25 millones de toneladas/año fijado en parte por ionización o descargas eléctricas. Las plantas absorben nitrato del suelo para producir proteínas y muchos animales comen plantas para obtener sus proteínas. Los cadáveres y excretas de los organismos contribuyen con sus residuos orgánicos al contenido de proteínas del suelo. En este existen microorganismos que utilizan compuestos de nitrógeno para su



óxidos de nitrógeno principalmente NO y NO<sub>2</sub> que posteriormente se transforman en ácido nítrico y contribuyen al fenómeno de la lluvia ácida. Por otra parte el uso abusivo de fertilizantes nitrogenados y pesticidas en la moderna agricultura añade anualmente a los suelos cultivados gran cantidad de nitrógeno principalmente en forma de nitrato, que además de acumularse en el suelo por la escorrentía superficial pasan a las aguas y al océano.

## LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA

A la hora de hablar de la contaminación de la atmósfera vamos a diferenciar entre la contaminación que origina problemas globales ya que no es posible poner fronteras a los contaminantes atmosféricos y la contaminación local o regional ya centrada sobre Galicia. En la primera parte incluimos los problemas relacionados con el ozono, el efecto invernadero y la lluvia ácida.

### A) PROBLEMAS GLOBALES

#### 1. El problema del ozono

##### *1.1. El ozono en la Estratosfera: el agujero de ozono*

Todos los procesos que tienen lugar sobre la tierra, excepto los radiactivos y los geotérmicos, dependen de la energía solar. El desigual calentamiento, especialmente en la zona de los trópicos, provoca diferencias de temperatura entre los polos y el ecuador generando corrientes marinas y aéreas para compensar estas desigualdades. En este intercambio de calor y de agua la atmósfera juega un papel fundamental, además es una cubierta protectora que mantiene la vida y la protege de un ambiente hostil exterior.

La parte más interesante de la atmósfera para el hombre es la troposfera ó atmósfera en contacto con la superficie de la tierra de 8 km de espesor en los polos y 16 km en el ecuador (Figura 5). Sin embargo también tiene gran importancia para el hombre la capa de la estratosfera que se extiende hasta los 50 km de altura. Aunque a primera vista pudiera parecer de poco interés para la vida debido a su baja concentración de oxígeno y escaso contenido de aquel (de solo 3 ppm en comparación con el 1 al 4% que contiene la baja atmósfera), es de vital importancia por su mayor contenido en ozono, O<sub>3</sub>, cuya finalidad es la absorción de suficiente cantidad de radiación UV del sol para impedir la destrucción de los seres vivos.

La contaminación química, térmica, acústica y visual de la atmósfera se produce fundamentalmente en la troposfera que principalmente esta compuesta por un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y pequeñas cantidades de gases nobles. La composición del aire debería ser uniforme y permanente en todos los puntos de la troposfera, pero en realidad aumenta el contenido en dióxido de carbono y la contaminación provoca diferencias notables donde su incidencia es mayor (3).

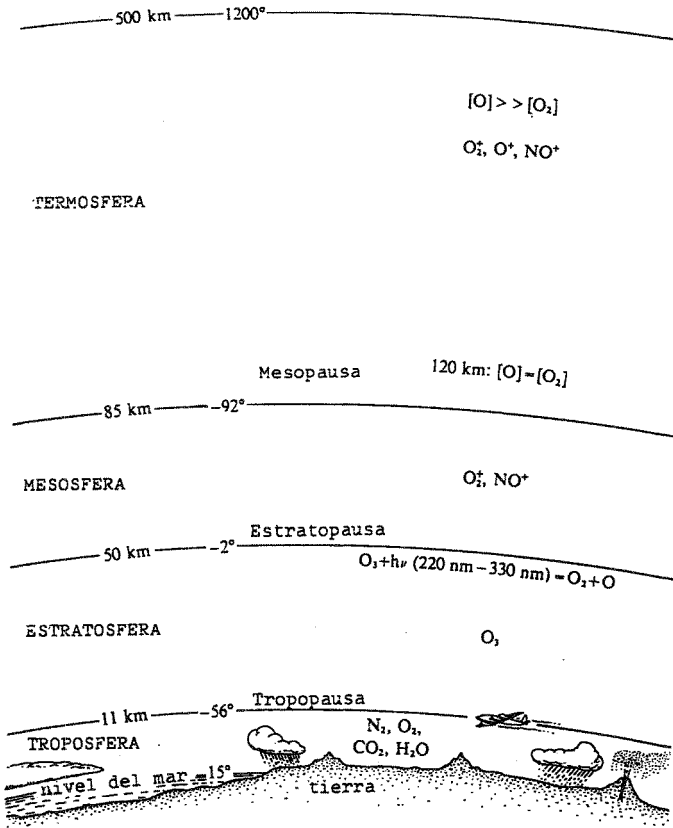


Figura 5. Principales regiones de la atmósfera (no a escala)

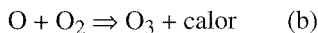
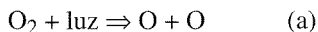
Las fuentes de contaminación atmosférica se pueden resumir de la siguiente manera:

- la quema de combustibles para producir energía a nivel industrial, comercial y doméstico
- los tubos de escape de los vehículos de todo tipo
- los gases residuales, polvo y calor de instalaciones industriales

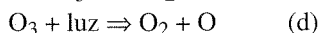
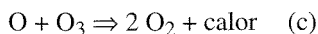
La mayoría de los contaminantes emitidos están en forma oxidada lo que permite su disolución en el agua de lluvia. Por esta razón la mayoría de ellos difícilmente alcanzan alturas elevadas antes de volver a la superficie terrestre. Los contaminantes que no son solubles en agua pueden tener mayores tiempos de residencia en la atmósfera y por tanto mayor probabilidad de ascender. Sin embargo, existe una **barrera química** en la troposfera que impide que estos contaminantes permanezcan mucho tiempo en ella. Esta barrera son los radicales hidroxilo (OH) muy abundantes en la troposfera, estos radicales son muy reactivos y provocan la degradación de la mayoría de los contaminantes orgánicos e inorgánicos emitidos desde la superficie. Por otra parte, existe otra barrera que dificulta la ascensión de los contaminantes más allá de la troposfera, esta es una **barrera tér-**

**mica** ó tropopausa, zona de separación entre la estratosfera y la troposfera. Como se puede ver en la figura 5 mientras que en la troposfera la temperatura disminuye con la altura, en la estratosfera sucede lo contrario, la temperatura aumenta con la altura. Esto da lugar a que en el límite entre ambas regiones se forma una capa de inversión la cual impide el ascenso vertical de las masas de aire y en consecuencia la ascensión de los contaminantes (1).

Aunque desde el punto de vista meteorológico la estratosfera es una zona muy tranquila, no lo es desde el punto de vista químico, ya que en ella se producen reacciones químicas que tienen una gran trascendencia para la vida en la tierra. En la estratosfera es donde se genera el ozono, cuyo papel es absorber parte de la radiación ultravioleta emitida por el sol. El ozono es una forma alotrópica del oxígeno y está constituido por 3 átomos de oxígeno; se genera en la estratosfera por la fotodisociación del oxígeno molecular (a) seguida de la recombinación del átomo de oxígeno con otra molécula de oxígeno (b)

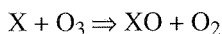


Para lograr la fotodisociación del  $\text{O}_2$  se necesita una gran cantidad de energía solar. Por otra parte el ozono se puede combinar con oxígeno atómico para dar oxígeno molecular y liberar energía (c), así como también se puede fotodisociar (d) dando una molécula y un átomo de oxígeno



Las reacciones c y d son más lentas que la a y b produciéndose por ello una acumulación del ozono. Por otra parte, el calor liberado en los procesos b y c se disipa en la atmósfera y es una consecuencia del aumento de temperatura de la estratosfera. La velocidad máxima de producción del ozono tiene lugar sobre el ecuador ya que es donde la radiación solar es máxima; posteriormente este se desplaza hacia los polos siguiendo los movimientos de las masas de aire estratosférico y se origina una "capa de ozono" que envuelve a todo el planeta. La concentración de ozono no es la misma a lo largo de toda la capa, puesto que varía con la latitud, y tiene además una fuerte dependencia estacional como se puede observar en la figura 6.

Los mayores niveles de ozono se encuentran cerca de los polos, alcanzando valores máximos en el polo norte durante los meses de marzo y abril, y en noviembre en el polo sur. Las concentraciones de ozono en el ecuador son en cualquier época del año alrededor del 50% menores que las correspondientes a los polos. Los procesos anteriores no son los únicos en los que interviene el ozono, en los años 60 se descubrió que otros procesos con otras especies químicas también intervienen en la destrucción del ozono. Existen diferentes especies atómicas o moleculares, designadas en general como X, que reaccionan de forma eficiente con el ozono arrancándole un átomo de oxígeno



en esta región de la estratosfera donde la concentración de ozono atmosférico es apreciable las moléculas XO reaccionan después con átomos de oxígeno para producir de nuevo

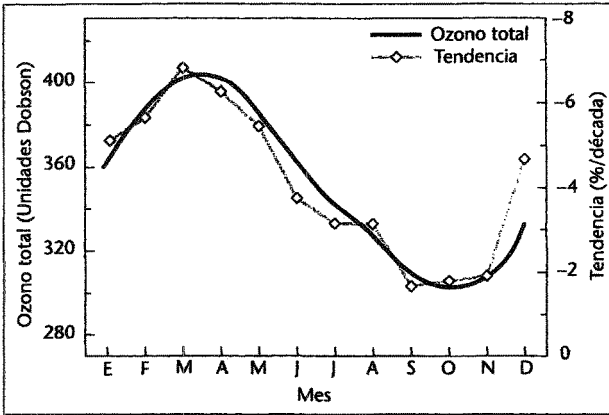
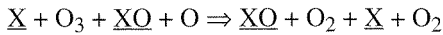
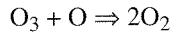


Figura 6. Dependencia estacional del ozono total atmosférico (curva negra) y de las disminuciones mensuales de enero a marzo de 1979 a marzo de 1994 (4)

oxígeno molecular y liberar de nuevo la especie X. La reacción global que se obtiene sumando las dos anteriores sería:



las moléculas comunes a ambos lados de la reacción se cancelan y queda la reacción global:



Las especies X son catalizadores para la destrucción del ozono ya que aumentan la velocidad de la reacción de descomposición del mismo y además al final permanecen intactos. En este proceso cíclico X puede representar a distintas especies, tales como hidrógeno (H), bromo (Br), cloro (Cl) atómicos, el radical OH, el óxido nítrico (NO) ó el monóxido de carbono (CO), cada una de las cuales produce la descomposición del ozono con distinta velocidad. Así a igualdad de condiciones, las especies NO, Cl, Br dan lugar al 60% de destrucción del  $O_3$  formado, mientras que H y OH producen el 15% y el CO el 5% restante. Estos procesos catalíticos no son las únicas reacciones químicas que tienen lugar en la estratosfera, de hecho la química estratosférica es mucho más compleja distinguiéndose diversos procesos cíclicos en los que interviene como ejes principales el NO, el radical OH y el átomo de cloro.

En el año 1957 Joe Farman y sus colaboradores de la estación British Antarctic Survey descubren la reducción de los niveles de ozono en la Antártida y desde entonces han ido registrando datos hasta la actualidad. Los datos indican que las cantidades totales de ozono han ido disminuyendo gradualmente cada mes de octubre con un descenso mucho más acusado a partir de la década de los 70, esto puede observarse claramente en la figura 7 en la que se representa la variación anual de la cantidad mínima diaria alcanzada en los meses de septiembre a octubre en la bahía Halley en la Antártida.

El período comprendido entre septiembre y noviembre corresponde a la primavera en el Polo Sur, la cual viene después de un período muy frío, con noches de 24 horas, típico de los inviernos polares. A mediados de los 80, la pérdida de ozono en primavera en ciertas altitudes sobre la Antártida fue completa, dando lugar a una pérdida de más de un

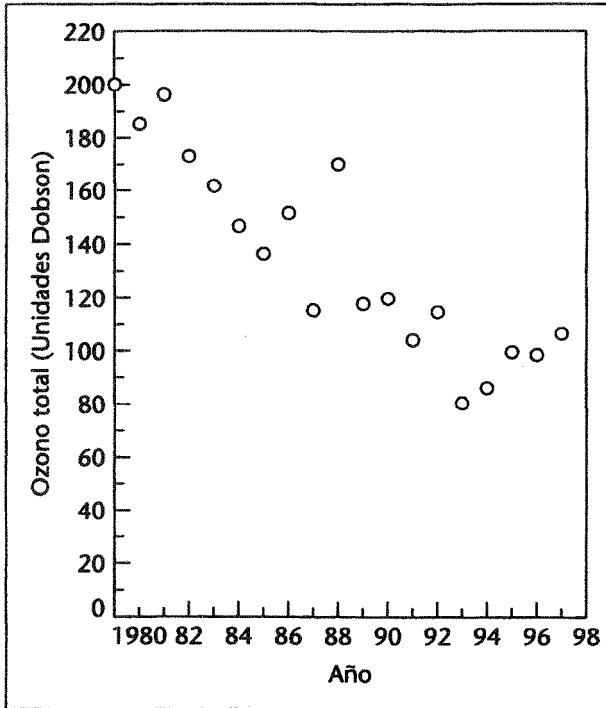


Figura 7. Concentración mínima de ozono total atmosférico sobre la bahía de Halley, Antártida en los meses de septiembre-octubre (5)

50% de la cantidad total de ozono. Por lo tanto se introdujo el término “**el agujero de la capa de ozono**” que aparece cada primavera sobre la Antártida y que dura varios meses. El área promedio cubierta por el agujero de ozono ha aumentado de forma substancial desde que se origino hasta la actualidad siendo hoy en día su tamaño comparable al continente norteamericano (6).

Durante varios años después de su descubrimiento no estaba claro si el agujero era debido a fenómenos naturales relacionados con fuerzas meteorológicas ó bien debido a algún mecanismo químico que implicaba contaminantes atmosféricos. En 1986 Dra Susan Solomon de la Administración Oceánica y Atmosférica de Boulder, Colorado organizó una expedición a la Antártida con el fin de descubrir la causa del agujero de ozono y llegaron a la conclusión de que la causa era la contaminación por cloro. Además predijeron que el agujero seguirá reapareciendo cada primavera en las siguientes décadas y que aparecería sobre la región Artica.

Hoy sabemos que el ozono no solo esta disminuyendo en el aire por encima de la Antártida sino que lo hace por todo el mundo. La extensión de esta disminución se ve en la figura 8 que muestra los cambios que han ocurrido en las concentraciones de ozono total desde 1979 a 1994 para las regiones no polares.

La siguiente cuestión es **¿que compuestos químicos son verdaderamente responsables del agujero de ozono?**. La respuesta a esta pregunta pone de manifiesto alguno de los errores que ha cometido la Técnica actual al servicio del hombre. En 1928 la General Motors sintetizó el CFC-12 (ó diclorodifluorometano) y hasta 1973 se han fabricado en el mundo entre 1000 y 1200 millones de toneladas de este compuesto y otros compuestos similares. Estos CFCs se caracterizan por su gran estabilidad y por ello encontraron numerosas aplicaciones como propelentes inofensivos en los aerosoles, en refrigerantes, en espumas flexibles y rígidas etc. Pero precisamente la gran estabilidad y

persistencia en la atmósfera de estos productos que fue lo que motivo sus aplicaciones, es lo que ahora hace que sean considerados como sustancias nocivas, ya que debido a que son estables en la baja atmósfera por acción de la luz solar y reacción con otras sustancias liberan **cloro** en la estratosfera, y ese cloro es el responsable de la destrucción de la capa de ozono. Un solo átomo de cloro puede destruir 100.000 moléculas de ozono ya que como vimos antes el cloro (representado por X) se recupera después de producir la ruptura de la molécula de ozono.

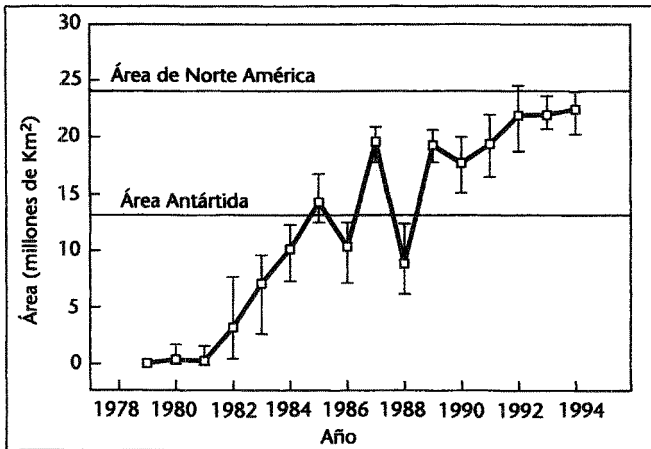


Figura 8. Variación anual del tamaño del agujero de ozono en la Antártida., medida a partir del área promedio en el interior de la línea de contorno correspondiente a 220 UD, entre el 15 de septiembre y el 15 de octubre (Fuente:NASA)

Los sustitutos temporales de los CFCs empleados en la década de los 90 han sido los **hidrofluoroclorocarbonos HCFCs**, empleados en neveras, congeladores, acondicionadores de aire, etc. Debido a la presencia del átomo de hidrógeno el compuesto es eliminado y no llega a la estratosfera, su potencial de reducción del ozono a largo plazo es pequeño, solo un 5% del correspondiente a un CFSs, sin embargo la presencia del hidrógeno en estos compuestos le comunica un carácter inflamable no deseado.

Los **hidrofluorocarbonos, HFCs**, son los principales sustitutos a largo plazo de los CFCs, todos ellos reaccionan para formar HF y esta molécula no se rompe para liberar F que podría destruir el ozono. Desgraciadamente existe una vía de degradación atmosférica para estos compuestos que producen ácido trifluoroacético TFA, el cual representa un peligro ambiental para las zonas húmedas ya que se acumula en las plantas acuáticas pudiendo inhibir su crecimiento.

Los **halones**, compuestos químicos que no contienen hidrógeno, **CF<sub>3</sub>Br** y **CF<sub>2</sub>BrCl** ascienden también a la estratosfera y se descomponen por acción de la luz liberando Br y Cl, sustancias ambas capaces de catalizar la descomposición del ozono. Puesto que los halones no son tóxicos y no dejan residuos se utilizan para combatir incendios en espacios cerrados.

En la figura 9 se puede ver la contribución de cada uno de estos compuestos al agujero de ozono, así como su variación con el tiempo (6).

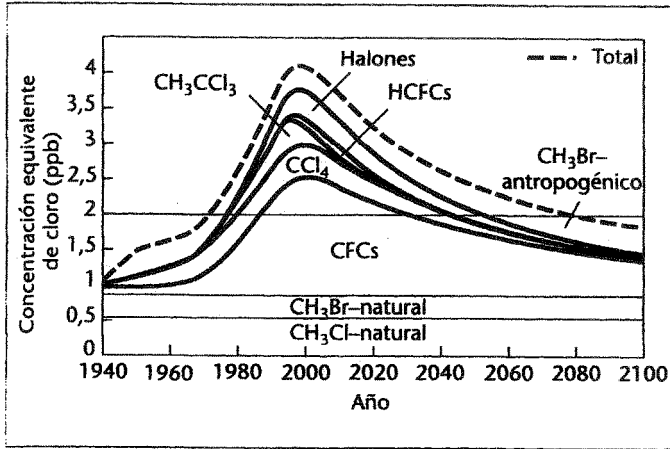


Figura 9. Concentraciones de cloro (equivalente) estratosférico, actual y proyectado, respecto al tiempo indicando las contribuciones de varios gases

A partir de los informes realizados en la década de los 70, la EPA prohíbe los CFCs en 1976, y posteriormente se han alcanzado diferentes acuerdos internacionales que dieron lugar al **protocolo de Montreal** en 1997. Como resultado de este acuerdo todos los compuestos destructores del ozono deben prohibirse en todas las naciones. Toda producción legal de CFCs en los países desarrollados finalizó en 1995. A los países en vías de desarrollo se les ha permitido esperar hasta el 2010 para cumplir este acuerdo. Similarmente también ha sido prohibida la producción de tetracloruro de carbono y de metil cloroformo. Los países desarrollados han acordado finalizar la producción de HCFCs hacia el año 2030, mientras que los países en vías de desarrollo lo harán en el 2040. La producción del halón fue interrumpida en 1994, pero debido a las grandes cantidades existentes almacenadas su uso continúa. El bromuro de metilo se ha añadido a la lista de sustancias que disminuyen el ozono y que serán prohibidas en 2005 y en los países en vías de desarrollo en el 2015. Como consecuencia directa de todos estos acuerdos la concentración troposférica de cloro alcanzó un máximo en 1994 y a partir de aquí se empieza a producir un ligero descenso (Figura 9).

La lentitud de dicha disminución es debida a:

- el elevado tiempo que toman las moléculas para ascender a la media ó alta atmósfera y absorber un fotón para disociarse a cloro atómico
- a la lentitud de la eliminación de cloro y bromo en la estratosfera
- a la continua entrada de cloro y bromo a la atmósfera.

Debido a que el ozono se forma (y se destruye) a través de procesos naturales rápidos, su nivel responde muy rápidamente al cambio de la concentración de cloro estratos-

férico. Así pues el agujero del Antártico desaparecerá a mediados del siglo XXI, es decir una vez que la concentración de cloro se reduzca a la mitad.

La teoría de que los CFCs causan la mayor parte del agujero de ozono fue cuestionada por algunos divulgadores basándose en que las fuentes naturales, especialmente el agua de mar y los volcanes, arrojan mucho más cloro a la atmósfera que los CFCs, concluyendo que la disminución del ozono era producida por un fenómeno natural. Sin embargo, lo que invalida este argumento es el hecho de que las fuentes naturales emiten cloro a la troposfera en lugar de a la estratosfera. El cloruro sódico emitido por el agua de mar y el cloruro de hidrógeno emitido por los volcanes son lavados por el agua de lluvia antes de que puedan ascender a la estratosfera. Otra evidencia científica que confirma que son los CFCs la fuente de cloro estratosférico es el hallazgo de que las concentraciones de HF que es un compuesto químico que no tiene fuentes naturales en la estratosfera, son las mismas que las esperadas solamente como resultado de la descomposición de CFCs.

#### *Efectos del agujero de ozono*

La disminución del agujero de ozono aumenta los riesgos de padecer cáncer de piel y de cataratas, produciendo además importantes daños en las cosechas y en general en todo el ecosistema. Sólo en los Estados Unidos la Agencia de Protección Ambiental estima que, de continuar así, en los próximos 50 años pueden morir de cáncer de piel unas 200.000 personas más (3, 7).

En la actualidad se puede disponer de datos diarios de los niveles de ozono en las distintas zonas, datos que son tomados por satélites espaciales, así el satélite NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) proporciona imágenes de cinco bandas del espectro electromagnético midiendo la radiación solar reflejada por el suelo, lo que permite obtener datos de temperaturas, de los niveles de ozono, así como el seguimiento de los niveles de la vegetación. Así el laboratorio de Teledetección de la Universi-

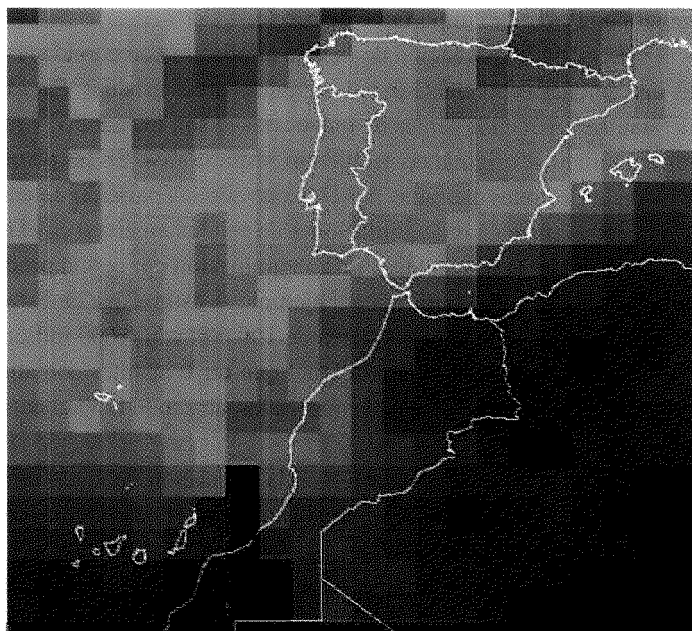


Figura 10. Imagen de la capa de ozono en España en noviembre de 2001

dad de Valladolid tiene una página web en la que es posible obtener valores diarios de estos niveles por ejemplo en la región gallega (8). En la figura 10 se puede ver la imagen de la capa de ozono de España del día 5 de noviembre del 2001.

### *1.2. El ozono en la tropósfera*

El ozono se sintetiza en nuestra atmósfera a través de una serie compleja de reacciones químicas que producen del orden de 1.850 millones de toneladas al año. Cerca de la superficie el ozono es producido por las descargas eléctricas de los rayos y relámpagos sobre el oxígeno del aire (todos conocemos el olor especial que se percibe después de una tormenta y que es debido al ozono). También se produce en forma artificial en los conductores eléctricos, en las calefacciones, industrias, fotocopiadoras, quema de biomasa etc. Su concentración varía a lo largo del día, siendo máxima al mediodía ya que el efecto de la luz solar es clave para que tenga lugar su formación.

Las quemaduras masivas de biomasa por ejemplo en las plantaciones de la caña de azúcar en Brasil, en los inmensos campos de arroz de Oriente después de las cosechas y en las sabanas africanas esta produciendo mayores contaminaciones por ozono que las existentes en grandes zonas industrializadas. Dichas combustiones generan a su vez lluvias ácidas, que por ejemplo caen sobre el Congo con una acidez 10 veces superior a la normal (3).

El ozono es un contaminante secundario ya que para producirse se necesitan tres componentes: el oxígeno del aire, un precursor gaseoso, normalmente un hidrocarburo y un óxido de nitrógeno, y la luz del sol. La mayor fuente de los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno son los humos de los automóviles, por ello son las ciudades lugares donde se genera una cantidad importante de ozono.

Pero la contaminación de la baja atmósfera con cantidades crecientes de ozono no es una amenaza solamente para las grandes áreas urbanas. Estudios recientes han puesto de manifiesto que las gentes de mayor riesgo son los adultos y niños que realizan ejercicios al aire libre originando problemas respiratorios. En las plantas, los efectos mas visibles de las lesiones causadas por el ozono son la aparición de manchas blancas, o claras, o punteadas (pequeñas acumulaciones de células muertas) en el haz de las hojas; además el ozono inhibe la fotosíntesis. La contaminación por ozono produce daños tremendamente costosos a la agricultura, así por ejemplo se estima que en Estados Unidos se producen pérdidas en la agricultura del orden de 100.000 y 500.000 millones de dólares.

Por otra parte, el ozono al igual que otros agentes contaminantes produce importantes efectos de degradación de materiales, atacando fundamentalmente a productos textiles y caucho.

El ozono interviene también en la formación de ácido nítrico y ácido sulfúrico, a partir de gases atmosféricos, y que disueltos en el agua caen en forma de lluvia ácida, de la que hablaremos mas adelante.

En principio se podría pensar que el aumento de la concentración del ozono en la tropósfera podría compensar la disminución del ozono estratosférico, sin embargo esto es

totalmente falso, ya que los contenidos de las dos reservas de ozono son demasiado desproporcionadas, y un aumento del 10% en el ozono troposférico no corresponde sino a menos de un 1% del estratosférico, y su distribución espacial no coincide necesariamente. Además la breve vida del ozono en la troposfera impide cualquier traslado hacia la capa de ozono estratosférica, ya que estos intercambios verticales requieren de 7 a 10 años.

La contribución del ozono a los problemas ambientales tiene por lo tanto diferentes causas:

1. En primer lugar la disminución del ozono estratosférico produce un aumento en la radiación UV que alcanza la superficie de la tierra, suponiendo graves riesgos para la salud entre otros problemas.
2. El aumento de las concentraciones del ozono troposférico puede producir enfermedades en el hombre y las plantas, alteraciones importantes sobre materiales y además contribuir a la formación de la lluvia ácida.

## 2. EL EFECTO INVERNADERO

Hoy en día todo el mundo conoce lo que se entiende por “**efecto invernadero**”, significa que las temperaturas globales promedio aumentarán varios grados como consecuencia del aumento del dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$  y de otros gases invernadero presentes en la atmósfera. Realmente todos vivimos en un gran invernadero, el aire, las nubes, el suelo, la vegetación y las estructuras que nos rodean reflejan, absorben y remiten la energía radiante que llega del sol. La tercera parte de la energía solar es reflejada directamente al espacio, y la energía restante aumenta la temperatura de gases, líquidos y sólidos absorbentes. Los cuerpos absorbentes devuelven al espacio parte de la energía que han recibido en forma de radiación infrarroja, o sea calor. Pero como se sabe desde hace un siglo, trazas de gases que existen en la atmósfera, tales como el dióxido de carbono, absorben fuertemente la radiación infrarroja y, de esta manera retienen una parte mayor de la energía del sol, consecuentemente se eleva la temperatura de la tierra.

Este efecto invernadero ha existido siempre desde que se consolidó la atmósfera, de hecho de no existir este efecto la tierra estaría demasiado fría para mantener la vida. Hemos estado alterando nuestro ambiente durante miles de años, y continuamos haciéndolo pero ahora cada vez más deprisa. Hasta la revolución industrial los cambios usualmente fueron locales o a lo más regionales, sin embargo ahora los cambios son **globales**, estamos empezando a comprender lo complejo que son y como están interconectados con la vida sobre la tierra.

El fenómeno del calentamiento global rápido es considerado, en general, como uno de nuestros problemas ambientales más cruciales en todo el mundo. A diferencia del agotamiento del ozono estratosférico, que se ha manifestado en la forma del agujero de ozono, el fenómeno del calentamiento global a causa del efecto invernadero, aún no se ha

observado de forma suficientemente convincente. Nadie está seguro de la extensión, ni de la sucesión temporal de los futuros aumentos de temperatura, ni de las predicciones fiables de los sucesos previstos para regiones concretas. Sin embargo, si los modelos actuales de la atmósfera son correctos, se predice que ocurrirá un calentamiento global significativo en las próximas décadas; esto nadie lo duda, lo que se discute es que cambios de clima se pueden esperar, cuando tendrán lugar y donde serán más evidentes (3,9).

De los datos registrados sobre temperaturas globales promedio desde 1860 al 2000 (Figura 11) puede observarse un aumento significativo destacando que la década 1980-90 ha sido la más caliente y que desde 1958 las temperaturas globales se han elevado  $0.08^{\circ}\text{C}$  por cada década. La mayoría de los estudiosos del clima predicen que de continuar este aumento, en este siglo se darán cambios de temperatura global entre  $2$  y  $6^{\circ}\text{C}$ , y aunque estos puedan parecer pequeños nunca ha existido en la era de la civilización humana cambios mayores de  $2^{\circ}\text{C}$ .

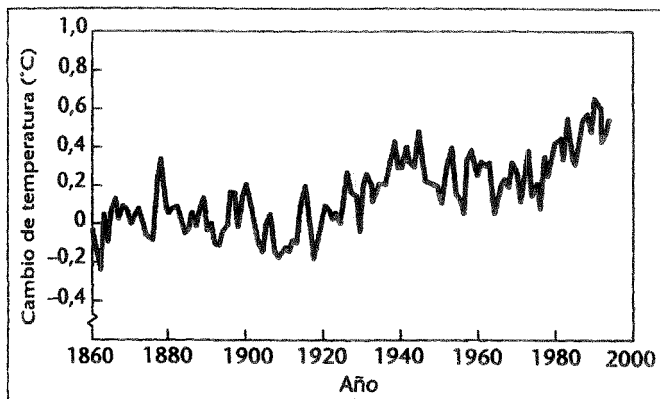


Figura 11. Temperaturas globales promedio desde 1860 (10)

La superficie y la atmósfera de la tierra se mantienen calientes gracias a la energía del sol. De esta energía un poco más de la mitad es radiación infrarroja, IR, y la mayor parte del resto es luz visible, VIS; la radiación ultravioleta, UV, se filtra en la estratosfera calentando el aire de esta zona en lugar de calentar la superficie terrestre. Del total de luz que entra a la superficie terrestre un 50% es absorbida por ella, un 20% es absorbida por gases (el UV por el ozono estratosférico y el oxígeno y el IR restante por  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ), el 30% restante se refleja en las nubes, hielo o nieve, arena y otros cuerpos reflejantes, sin ser absorbida y regresa al espacio.

Parte del aumento de la temperatura del aire producido en los últimos 100 años puede ser debido al aumento de energía emitida por el sol (aproximadamente un 0,24%), sobre todo energía UV que podría haber dado lugar a cambios en los niveles de  $\text{O}_3$  estratosférico; esto podría explicar hasta una tercera parte del aumento de temperatura experimentado desde 1970.

Por otra parte la tierra también emite energía, de hecho la cantidad de energía absorbida y emitida debería ser la misma cuando la temperatura se mantuviese constante. La energía emitida es IR y algunos gases del aire pueden de forma temporal absorber esa luz IR emitida por la tierra para ser reemitida en todas las direcciones del espacio. Así pues la luz IR térmica es redirigida de regreso hacia la superficie de la tierra y es reabsorbida calentando la superficie y el aire, este fenómeno se muestra en la figura 12.

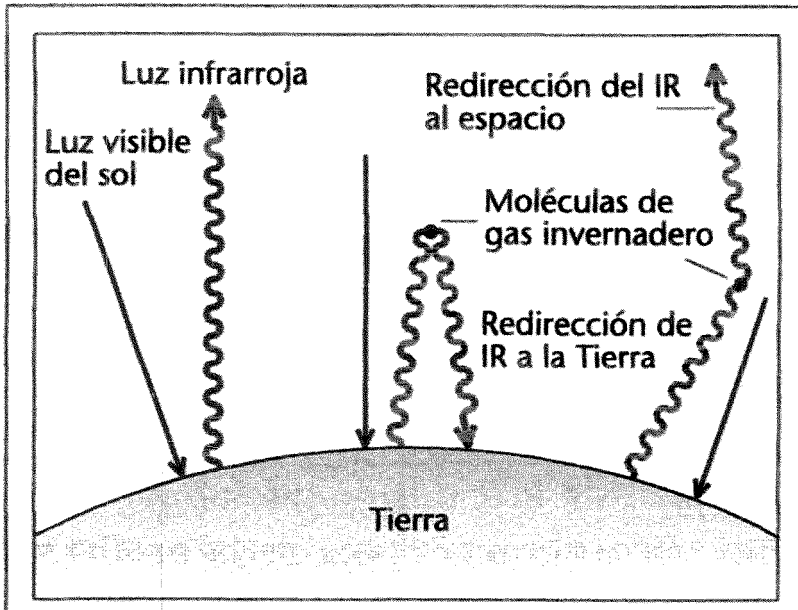


Figura 12. Esquema del funcionamiento del efecto invernadero en la troposfera terrestre.

Se denomina efecto invernadero y es el responsable de que la temperatura media de la superficie de la tierra sea de más  $15^{\circ}\text{C}$  en lugar de menos que es la que le correspondería en ausencia de gases atmosféricos. La superficie de la tierra está más caliente por este mecanismo que no por la energía solar que recibe directamente; es decir la atmósfera actúa de la misma forma que una manta reteniendo en la región más próxima parte del calor liberado por la tierra.

El problema del aumento del efecto invernadero es que si se produce un aumento importante de las concentraciones de los gases traza en el aire que tiene capacidad para absorber la radiación IR podría enviar más energía IR de nuevo a la superficie de la tierra y por tanto aumentar la temperatura media más de  $15^{\circ}\text{C}$ . A este efecto se le conoce con el nombre de **efecto invernadero intensificado** para distinguirlo del fenómeno que ha ido operando de forma natural durante milenios, aunque en términos coloquiales hablamos solo de efecto invernadero.

Los principales constituyentes de la atmósfera,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  y Ar no son capaces de absorber luz IR. Los gases que en el pasado produjeron la mayor parte del calentamiento inver-

nadero, son el agua, responsable de alrededor de los dos tercios del efecto, y el dióxido de carbono, responsable de alrededor de una cuarta parte. Además de estos gases en la actualidad hay que añadir los clorofluorocarbonos, el metano, el ozono, etc. ¿Por qué estos gases y no otros son capaces de absorber la radiación IR?. Una molécula absorberá radiación IR cuando la frecuencia de la radiación coincida con la frecuencia de algún movimiento interno de la molécula, normalmente un movimiento de vibración o de rotación de los átomos en la molécula. A continuación comentamos brevemente los principales gases invernadero.

### El dióxido de carbono

El dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , es el gas invernadero por excelencia, ya que esta molécula tiene la capacidad de absorber energía IR de diferentes frecuencias coincidentes con las frecuencias emitidas desde la superficie de la tierra.

Las medidas de aire atrapado en muestras de hielo de la Antártida o de Groelandia indican que la concentración atmosférica de  $\text{CO}_2$  en la era preindustrial, antes de 1750, era de unos 280 partes por millon, ppm; la concentración ha aumentado en un 30 %, pasando a ser de 365 ppm en 1998. En la actualidad esta creciendo a un ritmo anual medio de un 0,4 % o 1,5 ppm, casi el doble que el que corresponde a los años 60 aunque existen fluctuaciones año tras año. En la figura 13 se representa el incremento de la concentración anual atmosférica de  $\text{CO}_2$  desde 1960.

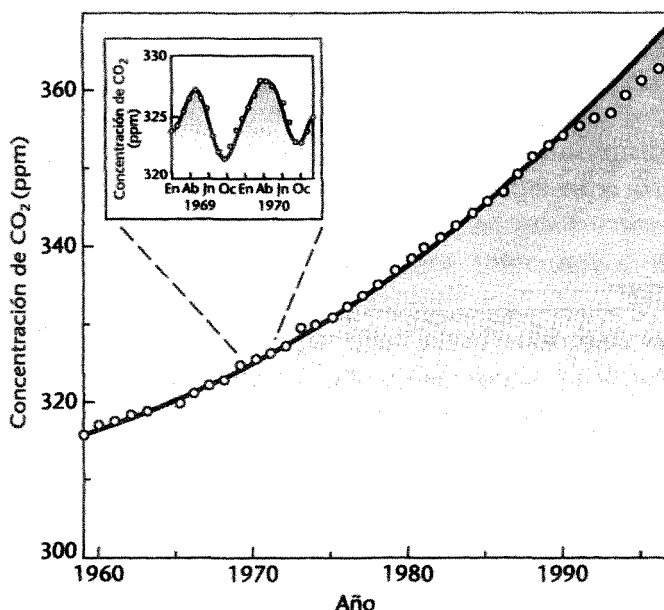
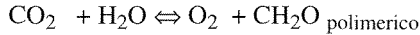


Figura 13. Tendencia anual de la concentración de  $\text{CO}_2$  en años recientes (6)

La curva continua muestra el mejor ajuste cuadrático para este periodo. Las fluctuaciones estacionales que se observan en el recuadro son debidas al crecimiento de la vegetación en primavera y verano, que elimina  $\text{CO}_2$  del aire, mientras que la descomposición de esta en otoño e invierno lo aumenta. Debido al proceso de fotosíntesis las plantas extraen grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  del aire cada primavera y verano



El  $\text{CO}_2$  capturado por este proceso no esta libre como para actuar como gas invernadero mientras este empaquetado en la forma polimérica, este carbono se le denomina carbono fijado. Sin embargo cuando se produce la descomposición biológica de las plantas, proceso contrario al anterior, que ocurre sobre todo en el otoño e invierno reemplaza el  $\text{CO}_2$  extraído antes de la atmósfera.

Una gran parte, las tres cuartas partes, de la contribución antropogénica del  $\text{CO}_2$  en el aire es debida a la quema de **combustibles fósiles**, principalmente carbón, petróleo y gas natural. Dichos combustibles se formaron hace millones de años cuando la materia de las plantas y los animales se cubrió de depósitos geológicos antes de que se pudiese fragmentar a causa de la oxidación del aire. Se estima que por termino medio cada persona que vive en países desarrollados es responsable de la emisión de 5 toneladas de  $\text{CO}_2$  procedente de los combustibles fósiles utilizados en las calefacciones domesticas y en las gasolinas. La otra cuarta parte de las emisiones de  $\text{CO}_2$  es debida a la **masiva deforestación**. Se produce una aportación significativa cuando se clarean los bosques para transformarlos en zonas agrícolas. Este tipo de actividad se produjo a escala masiva en zonas de clima templado en los siglos pasados, Estados Unidos y Canada, y ahora tiene lugar mayoritariamnete en los trópicos. La mayor cantidad de deforestación ocurre en la actualidad en Brasil, aunque también se produce en el sudeste de Asia y en América Central. Sin embargo gracias a las operaciones de silvicultura y a las nuevas plantaciones, la cantidad de carbono contenido en los bosques del hemisferio norte, incluyendo el que esta contenido en los suelos, esta aumentando, y en la década de los 80 el incremento anual aproximadamente igual las disminuciones producidas en Asia, América Central y América del Sur. En la Figura 14 se representan las emisiones anuales totales en términos de la masa de carbono procedente de la quema de combustibles fósiles y de la fabricación del cemento. Las emisiones aumentaron casi linealmente desde 1885 hasta el final de la segunda guerra mundial aunque con disminuciones transitorias supuestamente debidas a la Gran Depresión y las Guerras Mundiales. Desde 1950 la velocidad de emisión creció mas rápidamente con el tiempo con una pendiente de aproximadamente 5 veces a la correspondiente al periodo anterior con una cierta disminución a comienzo de los 80 y de los 90.

La vida media de una molécula de  $\text{CO}_2$  emitida a la atmósfera es muy grande ya que a diferencia de otras moléculas no se descomponen ni química ni fotoquímicamente. En promedio a los 5 años de su emisión se disuelve en el agua de mar o será absorbida por una planta que este creciendo. Sin embargo, muchas moléculas son reemitidas de nuevo de tal manera que el balance de emisión es siempre positivo. El único sumidero perma-

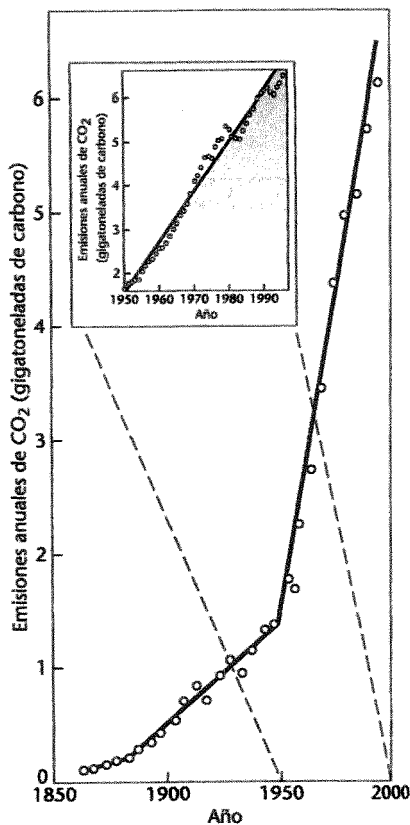


Figura 14. Emisiones globales anuales de CO<sub>2</sub> antropogénico expresado en masa de carbono procedente de la quema de combustibles fósiles y de la fabricación del cemento (6)

mente para este gas son las aguas profundas del océano y/o precipitación en este lugar en forma de carbonato cálcico soluble. Sin embargo debido al mezclado de las aguas superficiales con las aguas profundas, el CO<sub>2</sub> que se disuelve en las aguas superficiales necesita cientos de años para alcanzar las aguas profundas. Por ello, aunque los océanos disuelvan fácilmente buena parte del CO<sub>2</sub> en el aire, la escala temporal asociada con este sumidero permanente es muy grande, y a corto o medio plazo el gas continua acumulándose en la atmósfera. Se estima que el 56% de las emisiones de la década recientes aún permanecen en el aire. Por otra parte, la capacidad de disolución del CO<sub>2</sub> en el agua de mar disminuye a medida que aumenta la temperatura del océano, ya que la solubilidad del CO<sub>2</sub> en agua disminuye al aumentar la temperatura, lo que

hace que el efecto de depósito de los océanos se vea disminuido. El aumento de la velocidad de crecimiento de algunos tipos de árboles debido al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire se denomina **fertilización por CO<sub>2</sub>**. Algunos autores estiman que la velocidad de fotosíntesis esta aumentando debido al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> y de la temperatura del aire y que la formación de grandes cantidades de carbono fijado representa un importante sumidero para este gas. De hecho al aumento de la biomasa de los bosques templados del hemisferio norte es el sumidero mas probable para explicar las pérdidas anuales de CO<sub>2</sub> atmosférico.

### Vapor de agua

Las moléculas de agua, muy abundantes en la atmósfera, absorben radiación IR térmico. El agua es el gas invernadero más importante de la atmósfera terrestre, en el sentido de que produce mas calentamiento invernadero que cualquier otro gas, aunque molécula a molécula es menos eficiente en absorber radiación que el CO<sub>2</sub>. La concentración de vapor de agua en el aire aumenta con la temperatura, por lo tanto la cantidad de energía redirigida por el vapor de agua aumentará como resultado del calentamiento global

inducido por otros gases amplificando el aumento de la temperatura. Sin embargo, las gotas de agua de las nubes también reflejan algo de la luz solar incidente reemitiéndola al espacio. Las nubes bajas reflejan más luz de la que absorben enfriando el planeta, mientras que las nubes altas presentan el comportamiento opuesto y ejercen un efecto de calentamiento global. Por lo tanto no está muy claro si la cubierta de nubes adicional producida por el incremento del contenido de agua atmosférica tiene una contribución negativa o positiva al calentamiento global. Se sabe que las nubes en las regiones tropicales tienen un efecto nulo mientras que las de las latitudes septentrionales producen un enfriamiento neto. Sin embargo no se puede predecir que tipo de nubes se formarán y por lo tanto el efecto neto de las nubes en el calentamiento global está sujeto a una cierta incertidumbre.

## El metano

Después del  $\text{CO}_2$  y del  $\text{H}_2\text{O}$  el metano,  $\text{CH}_4$ , es el siguiente gas invernadero en importancia. El aumento del metano en el aire origina 21 veces más efecto invernadero que la adición de  $\text{CO}_2$ , ya que las moléculas de metano absorben más energía IR térmica. Sin embargo, considerando que el aumento actual de las moléculas de  $\text{CO}_2$  es 80 veces mayor, significa que en la actualidad el metano es mucho menos importante en relación al calentamiento global, estimándose que el metano produce una tercera parte del efecto invernadero originado por el  $\text{CO}_2$ .

En la figura 15 se representa la variación de la concentración de metano atmosférico con el tiempo, y podemos observar como ha aumentado más del doble en comparación con su valor preindustrial. Hasta 1750 la concentración de metano fue prácticamente constante y desde entonces ha aumentado de forma continua. En los años 70 el ritmo de aumento fue el doble que en los años 80, y en los 90 fue transitoriamente cero. No se conoce exactamente el porque de esta disminución aunque algunos científicos la relacionan con la disminución de temperatura producido por la explosión del Monte Pinatubo (11).

El aumento del nivel del metano atmosférico se relaciona con el aumento en la producción de alimentos, la utilización de combustibles fósiles y la deforestación. El metano se produce biológicamente por la descomposición anaerobia de residuos de plantas. Estos procesos ocurren a gran escala cuando la degradación de las plantas tiene lugar en condiciones de saturación de agua, por ejemplo en pantanos naturales, tales como ciénagas, marismas y arrozales. También debe tenerse en cuenta la expansión de zonas húmedas que tienen lugar por inundación de terrenos para producir energía hidroeléctrica. Por otra parte, los animales rumiantes vacas, ovejas y ciertos animales salvajes producen en sus estómagos grandes cantidades de metano como subproducto cuando digieren la celulosa de su comida. La descomposición anaeróbica (es decir en condiciones de falta de oxígeno) de la materia orgánica en los residuos de los vertederos, es otra fuente importante de metano en el aire. Se ha demostrado que los residuos de alimentos producen la

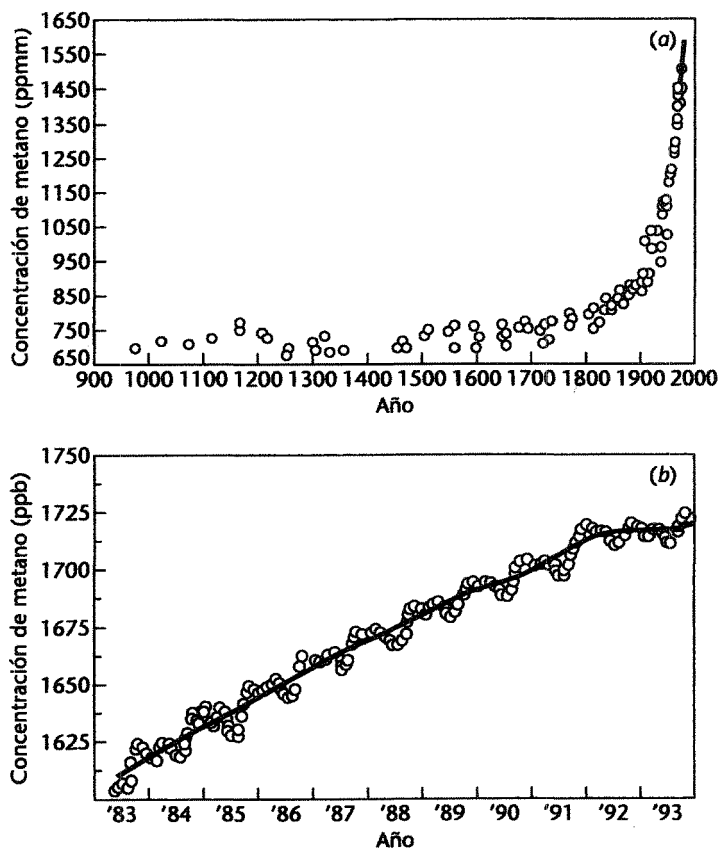


Figura 15. Crecimiento de la concentración de metano atmosférico a) en los últimos 1000 años utilizando datos de varios trozos de hielo, b) en años recientes

mayor cantidad de metano, seguido del papel y por último los residuos de las granjas. Por otra parte, la quema de biomasa, como la que se produce en bosques y praderas de zonas tropicales libera también metano como consecuencia de la combustión incompleta. En resumen son 6 las fuentes de emisión del metano en el aire: zonas húmedas naturales, combustibles fósiles, vertederos, animales rumiantes, arrozales y quema de biomasa, aunque en la actualidad no se puede predecir con exactitud la contribución de cada una de ellas (6).

### El óxido nítrico

El óxido nítrico,  $N_2O$ , es otro gas traza invernadero. Por molécula el  $N_2O$  es 206 veces más efectiva que el  $CO_2$  en originar un aumento inmediato del calentamiento global. Igual que para el metano su concentración se mantuvo constante hasta hace unos 300 años; desde entonces se ha producido un aumento del 13% con un crecimiento medio de

alrededor del 0,25%, una velocidad que parece bastante baja pero que originará un mayor incremento del nivel de  $N_2O$  en los próximos 50 años.

El  $N_2O$  de origen natural proviene de la emisión por los océanos y la mayor parte del resto es debido a procesos que ocurren en los suelos de las regiones tropicales. Es también un subproducto de los procesos de desnitrificación biológica en ambientes aerobios (ricos en oxígeno) y de los procesos de nitrificación biológicos en ambientes anaeróbios (deficientes en oxígeno). Recientemente se ha establecido que la nitrificación es más importante que la desnitrificación como fuente global de  $N_2O$ . El  $N_2O$  emitido por las praderas es particularmente significativo en los años que siguen a la quema del bosque. Parte de los fertilizantes usados en la agricultura, con base nitrato y amonio se convierten en  $N_2O$  que es emitido al aire. Los bosques tropicales de las zonas húmedas son una fuente importante de este gas. La quema de combustibles fósiles solo produce  $N_2O$  cuando el combustible contiene nitrógeno, por ejemplo la quema de carbón o de biomasa, pero no lo producen la quema de la gasolina o del gas natural. Globalmente la causa de la mayoría de las emisiones antropogénicas del  $N_2O$  es el aumento de fertilizantes para aplicaciones agrícolas (6).

### Los clorofluorocarbonos y sus sustitutos

Los clorofluorocarbonos, CFCs ( $CFCl_3$ ,  $CF_2Cl_2$ , etc) de los que ya hablamos al estudiar el agujero de ozono, que son compuestos en los que los átomos de carbono están enlazados a átomos de flúor y/o cloro tienen quizás el mayor potencial entre todos los gases traza de inducir calentamiento global, ya que por una parte son muy persistentes y por otra absorben la radiación IR térmica. Debido a estas dos características cada molécula de CFC tiene un potencial de originar una cantidad de calentamiento global equivalente a como lo hacen miles de moléculas de  $CO_2$ . Sin embargo, el efecto neto de los CFCs sobre la temperatura global es pequeño, ya que el efecto calorífico que producen los CFCs por medio de la redirección del IR térmico queda cancelado parcialmente por un efecto separado, el enfriamiento que inducen en la estratosfera debido a la destrucción del ozono.

La disminución del ozono estratosférico permite que llegue más luz UV a la atmósfera baja y a la superficie, y sea absorbida allí. Sin embargo, los efectos del enfriamiento y del calentamiento producidos por los CFCs ocurren a muy distintas altitudes, de manera que su efecto neto sobre el clima puede ser significativo.

Por otra parte, el uso de los CFCs como aislantes en los congeladores, neveras y acondicionadores de aire, ha reducido las necesidades energéticas de estos equipos, de manera que han disminuido las emisiones de  $CO_2$  resultantes de la producción de electricidad.

La influencia de los CFCs sobre el clima en el futuro se reducirá debido a los requerimientos de los protocolos de Montreal ya comentados. La mayor parte de sus sustitutos tienen vidas medias atmosféricas cortas y absorben menos IR, y por lo tanto manifiestan

una menor amenaza sobre el efecto invernadero. Sin embargo, si sus niveles de producción y emisión aumentan debido a la expansión de la población mundial o al aumento de la opulencia si pueden llegar a ser una contribución importante al calentamiento global.

### Ozono troposférico

El ozono troposférico es un gas invernadero natural pero que tiene un tiempo de residencia troposférico corto. Como ya comentamos antes este ozono se forma en la troposfera como consecuencia de la contaminación generada por las centrales de energía, motores de vehículos, incendios forestales y procesos naturales. Este ozono probablemente sea la causa del 10 por cien del aumento del potencial de calentamiento global.

### Aerosoles

Se entiende por aerosol una mezcla de sólido o gas, o bien líquido o gas. El efecto de la existencia de los aerosoles en la atmósfera sobre los principales problemas ambientales tales como el agujero de ozono y el efecto invernadero fue en principio olvidado por los científicos al hacer sus estimaciones y ello le ha llevado en varias ocasiones a realizar predicciones erróneas. Hoy sin embargo sabemos que el efecto de los aerosoles no debe ser despreciado.

La materia particulada de mayor importancia en este contexto es la que emiten las poderosas erupciones volcánicas a la alta atmósfera, y la que se produce en procesos industriales y que se inyectan en la baja troposfera. Para comprender como afectan los aerosoles al calentamiento global es necesario comprender como interaccionan con la luz. Las partículas sólidas o líquidas presentes en un aerosol presentan una cierta habilidad para reflejar la luz, haciendo que algo de la luz que reflejan se dirija de nuevo al espacio y por lo tanto no sea disponible para su absorción en la superficie, figura 16.

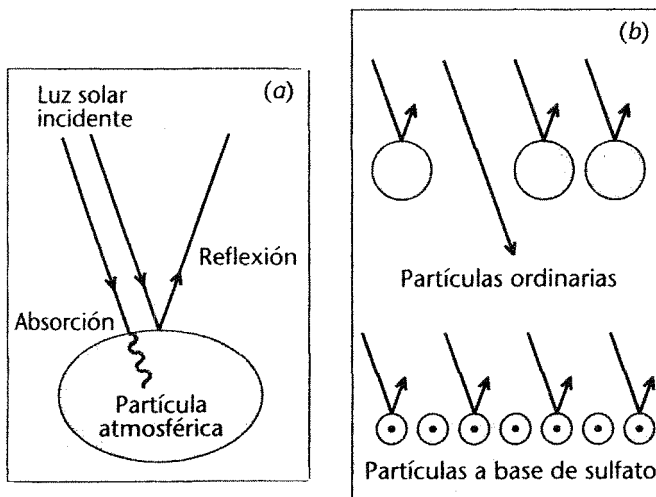


Figura 16. Interacción de la luz solar con las partículas atmosféricas en suspensión a) modos de interacción, b) esquema del proceso indirecto de un aumento de la reflexión por parte de pequeñas gotas de agua condensadas sobre sulfato

Además pueden reflejar también la luz infrarroja saliente, haciendo que algo se dirija otra vez hacia la superficie de la tierra. La redirección de la luz por una partícula se denomina a veces **dispersión**, mientras que la reflexión hacia atrás se denomina retrodispersión. En general la fracción de luz solar reflejada sobre la superficie se denomina **albedo**.

Algunos tipos de partículas, principalmente partículas oscuras o coloreadas, principalmente las constituidas por hollín o por partículas de los volcanes, pueden absorber luz de ciertas longitudes de onda, y esa energía absorbida se emite en forma de calor que se transmite a las moléculas del aire de los alrededores produciendo un calentamiento. Un ejemplo de este comportamiento se produjo en 1991 a partir de la erupción del volcán Monte Pinatubo en Filipinas que lanzó a la atmósfera gran cantidad de partículas capaces de reflejar y absorber luz. Inicialmente, la baja estratosfera se calentó debido al efecto dominante de las partículas grandes de ceniza que absorbieron parte de la luz solar incidente que fue convertido en calor y por el reflejo de la luz IR emitida desde la superficie. Pero debido a su tamaño las partículas no permanecen mucho tiempo en la atmósfera y acabaron depositándose. Sin embargo, a largo plazo se produjo una disminución significativa de la temperatura del aire a nivel del suelo. El aerosol que permaneció suspendido en la estratosfera al cabo de unos pocos meses se formó por la oxidación de los 30 millones de toneladas de  $\text{SO}_2$  que lanzó el volcán a esta región, el aerosol se mantuvo varios años durante los cuales reflejó la luz solar de vuelta hacia el espacio produciendo una caída de la temperatura media global de  $0,2^\circ\text{C}$  en los años 1992 y 1993 debido a este “enfriamiento volcánico”.

En cuanto a los aerosoles antropogénicos no es hasta 1991 cuando se empiezan a tener en cuenta sus efectos sobre el cambio climático. Los aerosoles troposféricos ricos en sulfato producidos diariamente a través de la contaminación del aire, sobre todo en las áreas urbanas del hemisferio norte, reflejan la luz solar hacia el espacio de forma más eficiente que la luz que absorben, con lo que hay menos luz solar disponible para ser absorbida por las superficies y por la baja atmósfera y convertirla en calor; siendo el efecto neto de los aerosoles el enfriar el aire cerca del nivel del suelo y por tanto compensar algo los efectos del calentamiento global producido por los gases invernadero. Según algunos estudios este efecto producido por los aerosoles contrarresta el calentamiento debido a los gases invernaderos en algunas regiones del este de Estados Unidos, de Europa del sur y centro y del este de China. Según algunos autores este *efecto directo* de los aerosoles de sulfato con relación a la reflexión de la luz solar se produce además un *efecto indirecto* significativo debido a las partículas de sulfato que actúan como núcleos para la formación de gotas pequeñas de agua, las cuales son más efectivas para retrodispersar la luz que las partículas más grandes con lo que su formación produce una reflexión adicional de la luz solar incidente enfriando la superficie de la tierra, figura 15 b. El aerosol de sulfato tiene una vida media corta, sin embargo debido a que se producen constantemente aportaciones del mismo debidas a la contaminación por  $\text{SO}_2$ , existe una cantidad estacionaria de aerosol en la troposfera que contrarresta en parte el calentamiento global producido por los gases invernadero.

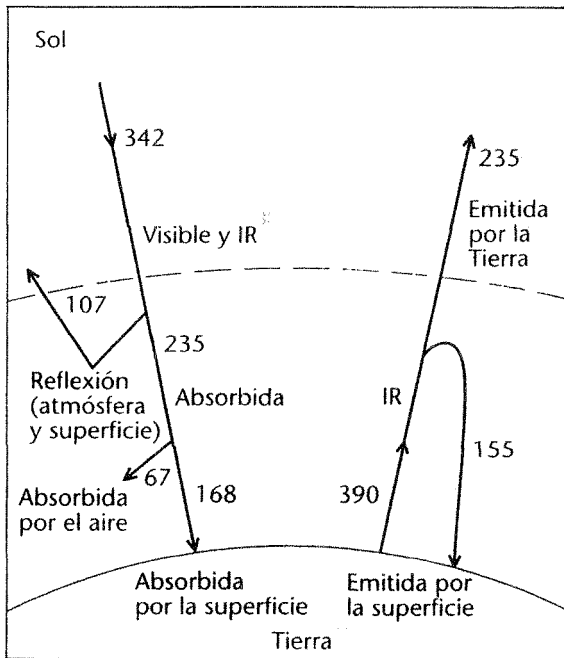


Figura 17. Flujos promedios de energías globales y estacionales hacia y desde la tierra en vatios por metro cuadrado de superficie.

### El calentamiento global

En la figura 17 podemos ver los flujos de entrada y salida de energía de la tierra en vatios por metro cuadrado de superficie y promediados a lo largo del día y noche y para todas las estaciones y latitudes. Inciden 342 vatios por  $m^2$  de los cuales 235 son absorbidos por la atmósfera y la tierra y deben reemitirse hacia el espa-

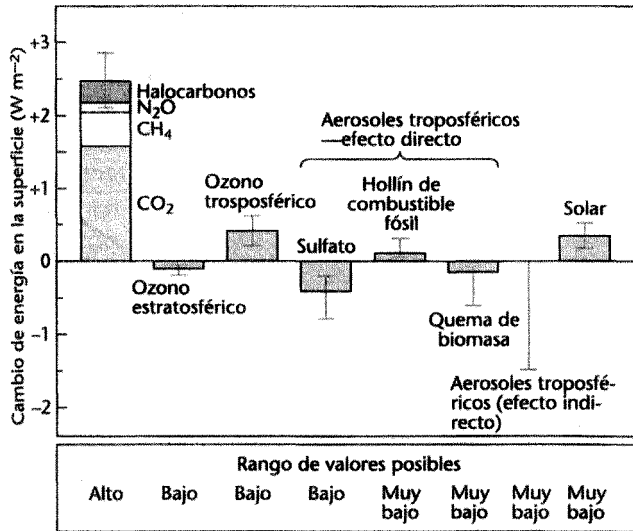
cio exterior para mantener la temperatura del planeta estacionaria. Para ello deben emitirse 390 vatios por  $m^2$  de la superficie, 155 de los cuales son desviados de vuelta por los gases invernadero con lo que no escapan.

En la figura 18 se realiza una representación de la contribución de los diferentes gases invernadero al cambio global, la altura de las barras representa una estimación del calentamiento o enfriamiento en términos de la cantidad de la luz solar que alcanza la superficie de la tierra mientras que las barras de error representan el rango de incertidumbre.

Los científicos han observado que las emisiones a la atmósfera de los gases invernadero continúa aumentando con el tiempo. En numerosos proyectos de investigación se intenta realizar simulaciones por ordenador para predecir las consecuencias de estos aumentos sobre el clima del planeta; sin embargo, para realizar estos cálculos faltan por una parte datos actuales de algunos parámetros ya que por una parte no conocemos todas las fuentes y sumideros de los gases invernadero. Además no se conoce el posible efecto de la retroalimentación de la cubierta de nubes que se originara como consecuencia del calentamiento y por otra parte no se dispone de datos de épocas anteriores para poder ver su evolución.

La pregunta de si ya ha ocurrido un calentamiento global debido al efecto invernadero tiene múltiples respuestas no habiendo un acuerdo unánime sobre ella. Los ciclos periódicos de calentamiento y enfriamiento han ocurrido a través de los siglos, pero lo que si es cierto es que la magnitud medible del aumento de la temperatura media de la tie-

Figura 18. Estimaciones del calentamiento global debido a los cambios en las concentraciones de los gases invernadero y a otros factores desde la época preindustrial hasta mediados de los 90.



rra esta claramente demostrada, aunque no se puedan explicar las oscilaciones año a año. A partir de estos datos el grupo del Panel Intergubernamental sobre el cambio Climático, IPCC, promovido por la ONU concluyo en 1995 que “El balance de evidencias, sugiere que existe una influencia humana discernible sobre el clima global”.

Algunos escépticos señalan que la evidencia del aumento de temperatura se refiere a la temperatura superficial de la tierra y que los datos de los satélites indican que la baja troposfera, en conjunto se ha enfriado, en lugar de sufrir un calentamiento. Sin embargo, otros afirman que este calentamiento no es cierto y ocurre debido a los problemas de la combinación de datos de los satélites distintos con ligeras diferencias en la calibración. Otras evidencias que apoyan la existencia del calentamiento global son el hecho de que en el hemisferio norte la primavera empieza una semana antes con respecto a los años 70; en Alaska y norte de Canada la temperatura media ha aumentado un grado por década. La década de los 80 fue de las mas húmedas en las latitudes mas septentrionales a 50 grados. Por otra parte hay evidencias de que el calentamiento se esta produciendo a partir del aumento del nivel del mar, del blanqueo de los arrecifes de coral y de la retirada de los bosques de hielo y glaciares.

La preocupación por los problemas ambientales globales fundamentalmente en lo que se refiere al Cambio Climático tuvo su primer acuerdo internacional importante en la reunión celebrada en Río de Janeiro en 1992, llamada La Cumbre de la Tierra. Esta reunión culminó con 4 acuerdos: la convención de Cambio Climático, la de Biodiversidad, la de Desertización y la Agenda 21 (desarrollo sostenible).

En 1993 entra en vigor la convención marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC).

En 1995 en la Primera Conferencia de las Partes (COF) de la UNFCCC, en Berlín, se adoptó el Mandato de Berlín que establece que habrá un protocolo de la convención en la tercera conferencia.

En 1996 se celebra en Ginebra la segunda conferencia de la convención de carácter técnico.

En 1997 se aprueba el **Protocolo de Kioto** de la UNFCCC en la tercera conferencia, que estipula que “ los países desarrollados reducirán sus emisiones en un 5,2% de media en 2008-2012, respecto al nivel de emisiones de 1990.

Una reducción tan modesta no puede resolver el problema ya creado, pero supone un cambio sustancial en la tendencia desbocada al crecimiento de las emisiones. Sin embargo, el conseguir los objetivos marcados presenta tales dificultades que el acuerdo de 1997 no era más que un principio de un largo camino que exige entre otras cosas el fijar los criterios técnicos y políticos para su aplicación práctica y su ratificación por un número suficientemente grande de países. La reducción de emisiones de gases invernadero en los países desarrollados supone cambios complejos en el transporte, el suministro energético, los procesos industriales, la agricultura y hasta los hábitos sociales.

En 1998 se celebra la cuarta COP en Buenos Aires y se aprueba el Plan de Acción estableciendo que deben fijarse los instrumentos del Protocolo de Kioto.

En 1999 tiene lugar la quinta COP en Bonn con avances técnicos.

En 2000, se reúne la sexta COP en la Haya acabando en un fracaso sobre los instrumentos de aplicación del Protocolo de Kioto.

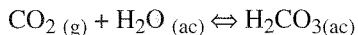
En 2001, en el mes de julio prosigue en Bonn la conferencia aplazada en la Haya, alcanzándose acuerdos importantes sobre aspectos que es preciso aclarar para la entrada en vigor del protocolo. Entre estos destacan: la consideración de nuevas masas forestales como posibles sumideros de CO<sub>2</sub> y, por tanto, una contribución negativa a los vertidos; la ayuda a los países en desarrollo para que puedan crecer sin comprometer los objetivos de reducción de emisiones, la compraventa de derechos de emisión entre países o las sanciones para quien no cumplan sus compromisos. El principal problema que se plantea es el rechazo de Estados Unidos, principal emisor mundial de gases invernadero. En noviembre del mismo año se celebró en Marrakech una nueva reunión en la que se han acabado de perfilar los instrumentos técnicos, y en la que todos los países excepto EEUU muestran su apoyo al Protocolo de Kioto, y abre la vía hacia el calendario de entrada en vigor del mismo.

En septiembre del 2002 se celebrará en Johannesburgo la Cumbre sobre Desarrollo Sostenible, llamada Río+10, en la que se espera que se ratifiquen los últimos acuerdos obtenidos.

### 3 LA LLUVIA ÁCIDA

La lluvia ácida es uno de los problemas ambientales más graves que en la actualidad afecta a muchas regiones del mundo. El término “lluvia ácida” incluye también fenómenos como la niebla y la nieve ácida, fenómenos todos ellos que corresponden a la precipitación de ácido. Este problema de la lluvia ácida fue descubierto en 1880 en Gran Bretaña por Agnus Smith, pero fue ignorado hasta mediados de 1950. En primer lugar

debemos explicar que entendemos por lluvia ácida. La lluvia "natural", es decir la lluvia en ausencia de contaminación es algo ácida, debido a la presencia en ella de dióxido de carbono atmosférico, el cual forma ácido carbónico



El ácido carbónico se ioniza parcialmente para liberar un ión hidrógeno con la consecuente reducción en el pH del sistema:



Debido a esta fuente de acidez, el pH de la lluvia natural es alrededor de 5,6. Solo la lluvia que tenga un pH menos de 5 es considerada como lluvia ácida, ya que a causa de las cantidades traza naturales de ácidos fuertes, el nivel de la acidez de lluvia en el aire limpio es un poco mayor que el debido sólo al dióxido de carbono. Ácidos fuertes como el ácido clorhídrico, HCl emitido por erupciones volcánicas pueden originar temporalmente "lluvia ácida natural".

Los dos ácidos que causan principalmente la lluvia ácida son el ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y el ácido nítrico,  $\text{HNO}_3$ . Pero estos ácidos no son contaminantes primarios, es decir no son emitidos como tales, sino que son contaminantes secundarios, es decir se generan en la atmósfera a partir de contaminantes primarios, en concreto a partir de dióxido de azufre,  $\text{SO}_2$ , y de óxidos de nitrógeno,  $\text{NO}_x$ . Estos ácidos se producen durante el transporte de las masas de aire que contienen los contaminantes primarios, por ello la lluvia ácida es un problema de contaminación que no respeta fronteras de ningún tipo, debido al transporte de largo alcance al que están sometidos los contaminantes atmosféricos. Así por ejemplo, toda la lluvia ácida que precipita en el norte de Europa, Noruega, Suecia, etc se genera a partir de las emisiones de otros países del Sur. De igual forma se ha observado en Estados Unidos que existe una importante contaminación en el Sudoeste procedente de las centrales de energía a base de carbón de México(6).

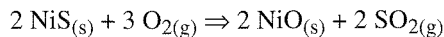
#### *Fuentes de la lluvia ácida*

La fuente principal de lluvia ácida es el  $\text{SO}_2$ . El  $\text{SO}_2$  es emitido de forma natural por los volcanes y es originado por la oxidación de los gases sulfurosos producidos en la descomposición de las plantas. Este  $\text{SO}_2$  de origen natural es lanzado a la atmósfera a gran altura y lejos de zonas densamente pobladas, por ello presenta una concentración de fondo del gas en el aire limpio muy pequeña. El  $\text{SO}_2$  de origen antropogénico es debido fundamentalmente a la combustión del carbón, que dependiendo de su origen puede contener desde 1 a un 9 % de azufre que en el proceso de combustión se transforma en  $\text{SO}_2$ . En la actualidad el uso más importante del carbón es como combustible para generar electricidad en las centrales térmicas. Una parte del azufre retenido en el carbón puede ser eliminado antes de la combustión, ya que esta parte queda retenido en forma de inclusiones en el contenido mineral del carbón, de manera que si este se pulveriza antes de la combustión este tipo de azufre puede eliminarse por medios mecánicos. Sin embargo, otra parte del azufre esta enlazado a la estructura del carbón de tal manera que no es eliminable antes de la combustión.

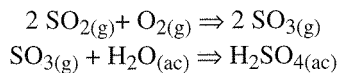
Cuando el dióxido de azufre emitido se diluye en el aire no es factible su eliminación por otros procesos químicos, sin embargo sí puede controlarse de un modo relativamente sencillo su eliminación antes de ser emitido al exterior. El  $\text{SO}_2$  se elimina a través de una reacción ácido-base con carbonato cálcico,  $\text{CaCO}_3$ , ó óxido de calcio,  $\text{CaO}$ , en forma de sólido húmedo apelmazado. Los gases emitidos se hacen pasar a través de una suspensión del sólido húmedo o se bombardean con chorros de la mencionada suspensión. Este proceso de lavado se conoce con el nombre de desulfuración de los gases de la combustión, y con el se puede eliminar hasta el 90% del  $\text{SO}_2$  emitido. El producto que resulta de este procesos es el sulfito ó sulfato de calcio que se puede depositar sin ningún tipo de problemas en vertederos.

El petróleo también contiene azufre aunque en baja proporción, pero en productos como la gasolina alcanza valores de ppm. El  $\text{SO}_2$  ó  $\text{H}_2\text{S}$  se emite directamente al aire en los procesos de refinado del petróleo y cuando se limpia el gas natural antes de su distribución. De hecho el componente predominante en los pozos de gas natural es el  $\text{H}_2\text{S}$  en lugar del metano,  $\text{CH}_4$ . El  $\text{H}_2\text{S}$  obtenido de su eliminación del petróleo y del gas natural se convierten fácilmente a azufre elemental sólido,  $\text{S}$ , que es una sustancia benigna para el ambiente.

Otras fuentes importantes de emisión de  $\text{SO}_2$  son las industrias de fundición de metales no ferrosos, es decir industrias que obtienen metales libres a partir de minerales. Muchos metales, tales como  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$  en la naturaleza se encuentran como minerales sulfurados, siendo necesario en el proceso de obtención realizar una primera etapa de calcinación del mineral en la cual se genera el óxido metálico y se libera el  $\text{SO}_2$

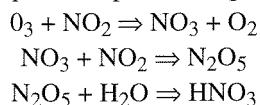


Realmente este  $\text{SO}_2$  liberado puede ser utilizado para generar ácido sulfúrico, un ácido con gran cantidad de aplicaciones industriales, para ello solo es necesario realizar una oxidación del dióxido de azufre,  $\text{SO}_2$ , a trióxido de azufre  $\text{SO}_3$  y una posterior reacción de hidrólisis con agua



Hoy en día existen por lo tanto **tecnologías limpias** tanto para el carbón como para los otros procesos en los que se genera el  $\text{SO}_2$ , el problema es que evidentemente estas tecnologías encarecen el proceso de producción.

Por lo que respecta al  $\text{HNO}_3$  este se genera por oxidación de los óxidos de nitrógeno debida al ozono atmosférico que es un poderoso agente oxidante



La deposición de los ácidos nítrico y sulfúrico en la lluvia ácida se llama también **deposición húmeda**, pero además de ella una parte similar de ambos ácidos se deposita sobre la superficie de la tierra por medio de una **deposición seca**, que es el proceso por el cual se depositan sobre superficies sólidas ó líquidas a nivel del suelo, cuando el aire que los contiene pasa por encima de las superficies y los deposita como contaminantes.

Los principales oxidantes atmosféricos que participan en la oxidación de los óxidos de nitrógeno y de azufre para dar lugar a la lluvia ácida son el radical OH·, el ozono, el radical hidroperóxido, HO<sub>2</sub>·, peroxiradicales de tipo orgánico, el radical nitrato NO<sub>3</sub>· y el peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. De todos estos oxidantes el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el O<sub>3</sub> son los principales oxidantes responsables de la oxidación del SO<sub>2</sub> disuelto en las gotas de agua de la lluvia y de las nubes.

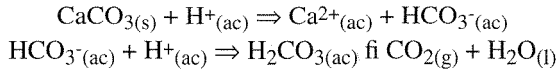
¿Cuál es el origen de estos oxidantes?. La formación del ozono en la baja troposfera esta intimamente ligada a la concentración presente de los óxidos de nitrógeno, la cual depende sobre todo de las emisiones antropogénicas de estos compuestos.

Durante muchos años el ozono, fué considerado el oxidante que determinaba la calidad del aire en una atmósfera urbana, sin embargo, en la década de los 80 se identificó el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como producto fotoquímico presente en el aire, sobre todo mediante la formación de la lluvia. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es una especie presente en la atmósfera principalmente como producto de reacciones fotoquímicas ligadas a la formación del ozono. El conocimiento de los niveles atmosféricos es de gran interés por las siguientes razones (12):

1. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en fase gas esta implicado en la química de los radicales gaseosos actuando como un sumidero de los radicales peróxido y como fuente de radicales hidróxilo por fotólisis. Estos radicales junto con el ozono y el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> son las especies oxidantes mas importantes en la transformación de los contaminantes primarios, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> y determinan la forma química y el tiempo de vida de otros compuestos pertenecientes a los ciclos troposféricos del nitrógeno, carbono y azufre.
2. Ya que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es muy soluble en agua, su química atmosférica en fase líquida (gotas de lluvia, nubes, rocío) es el sumidero más importante del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gaseoso. En fase líquida esta considerado como el principal agente oxidante del azufre a sulfato.
3. Las degradaciones forestales observadas en el norte de Europa y en el noroeste Americano, que se han intentado explicar por las elevadas concentraciones de ozono del aire, combinadas con los efectos directos e indirectos de la precipitación y niebla ácida, no dan una explicación satisfactoria del declive forestal observado. Numerosos investigadores han confirmado que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y los hidroperoxidos orgánicos son potentes agentes oxidantes que pueden dañar las células de las plantas contribuyendo de esta forma al declive forestal (13,14)

#### *Efectos de la lluvia ácida*

La extensión con que afecta la lluvia ácida a la vida en una zona concreta depende de la composición del suelo y de la roca subyacente de esa zona. Así las zonas menos afectadas son aquellas con terrenos calcáreos, ya que el ácido puede neutralizarse de forma efectiva puesto que estas rocas están compuestas de carbonato cálcico que actúa como una base neutralizando al ácido y generando iones calcio, dióxido de carbono y agua líquida produciéndose la disolución de la roca.



Estas mismas reacciones son las responsables del deterioro de las estatuas de caliza y de mármol que se van disolviendo poco a poco.

Los suelos que contienen cuarzo como por ejemplo los terrenos graníticos son por el contrario poco erosionables, ya que la sílice (cuarzo) es químicamente un material bastante inerte.

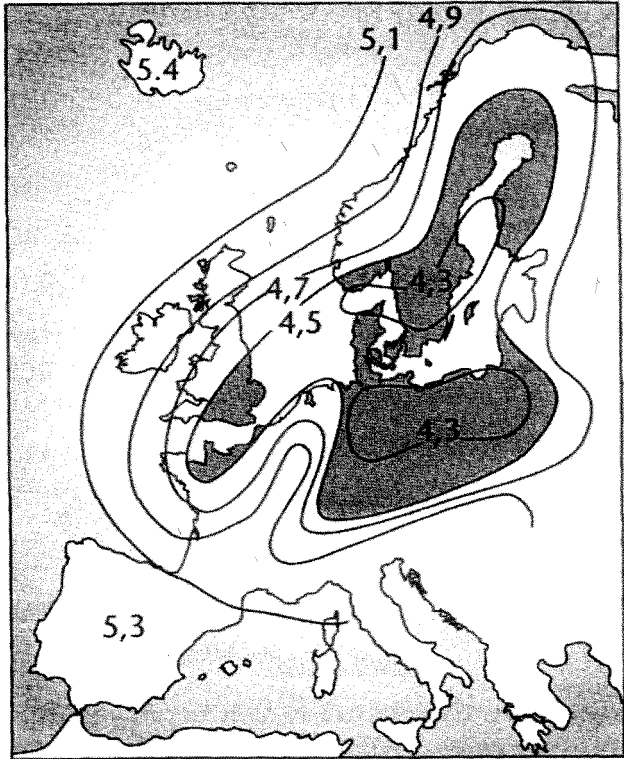
Otro factor del cual depende la acidificación del suelo es el grosor de la capa de humus, ya que cuanto mayor sea la capa de humus mayor será la garantía de neutralización del ácido por el humus, ya que este contiene muchos componentes tamponantes e iones metálicos que se pueden intercambiar por los  $\text{H}^+$  ácidos. Sin embargo, el arrastre de iones metálicos producido por la acidez del medio (lixiviación) tiene efectos negativos, ya que se pueden movilizar iones tóxicos tales como cadmio, zinc, plomo o manganeso, que pueden ser entonces absorbidos por la vegetación incorporándose a la cadena trófica. Además para los metales esenciales tales como calcio, magnesio y potasio puede suceder el efecto contrario, es decir que el ion metálico sea menos accesible a las plantas.

La lluvia ácida provoca la disolución de los aluminosilicatos presentes en el suelo produciendo la movilidad del ion aluminio. Esto es importante porque el aluminio es después del oxígeno y el silicio el elemento más abundante en la corteza terrestre y este una vez liberado compite con otros elementos esenciales en su fijación en las plantas inhibiendo su crecimiento. Además este aluminio es arrastrado a las aguas donde sufre una reacción de hidrólisis ácida y en consecuencia disminuye el pH del agua y provoca la desaparición de la materia orgánica ya que forma compuestos insolubles con ella que se depositan en el fondo. Esto origina numerosos problemas a los organismos acuáticos, sobre todo a los peces cuya vida se ve amenazada cuando el pH del agua baja de 4,5. Por otra parte el aluminio en el agua destinada al consumo humano tampoco presenta efectos positivos ya que este es un elemento tóxico para el hombre.

Otro efecto de la lluvia ácida que en principio es positivo es la deposición de iones nitrato,  $\text{NO}_3^-$  en el suelo, iones que en principio tienen un efecto fertilizante; sin embargo, esto supone una alteración en el ciclo del nitrógeno. De modo que si los procesos de desnitrificación que transcurren en el suelo no se producen con el mismo ritmo que la deposición de los nitratos, el terreno se satura de estas especies provocando su lixiviación. El exceso de nitrato en medios acuáticos favorece el crecimiento de determinadas algas microscópicas las cuales dificultan la penetración de los rayos solares impidiendo que se lleve a cabo la fotosíntesis por las plantas verdes del medio. Además, estas algas al morir forman el sustrato alimenticio de las bacterias, las cuales consumen oxígeno del medio originando la muerte de la mayoría de las especies del medio acuático.

El ecosistema forestal es probablemente el más seriamente afectado por la lluvia ácida. Los bosques de los países de la Europa Central y Nórdica son los más afectados, debido por un lado a la alta pluviosidad y por otra al desplazamiento de los contaminantes a estas zonas. En la figura 19 se puede ver una distribución de la lluvia ácida en

Figura 19. Lluvia ácida en Europa en 1985



Europa, y podemos observar como los valores más bajos de pH se sitúan hacia el norte, mientras que en la zona Mediterránea el efecto es menor. Esto es debido a la localización geográfica de una parte de Europa situada en el límite de la influencia del cinturón de las borrascas boreales, lo cual caracteriza el clima de esta zona con un prolongado período de sequía durante el verano, además de precipitaciones irregulares. También Gran Bretaña esta sujeta a menor intensidad debido a los fuertes vientos que soplan en esta nación procedentes del Atlántico y que trasladan los contaminantes generales en la isla hacia el continente europeo y en particular a la península escandinava. El fenómeno de la desaparición de los bosques que comenzó en la parte oeste de Alemania es a veces difícil de explicar, en el sentido de encontrar una relación causa-efecto clara con la aparición de la lluvia ácida. Como ya comentamos la acidificación del suelo puede lixiviar nutrientes y disolver aluminio, elemento que puede interferir en la asimilación de los nutrientes de los árboles y plantas, la acidez de la lluvia que precipita en los bosques, la presencia del ozono estratosférico así como de otros oxidantes pueden poner a los árboles en un significativo estado de estrés, este estado por si solo no mata a los árboles, pero cuando se combina con una sequía, temperaturas extremas, enfermedades o ataques de insectos los hace mas vulnerables.

La acidificación de los lagos y de las aguas superficiales es otro efecto de la lluvia ácida; esta reduce la capacidad de crecimiento de algunas plantas que viven en las aguas dulces debido a la disminución de la productividad de lagos y ríos que alimentan a las plantas, la cantidad de carbono orgánico disuelto en el agua superficial ha disminuido. Este carbono incluye moléculas que absorben UV de la luz solar, por lo tanto la disminución de sus niveles ha permitido el paso de mas radiación UV a las zonas mas profundas del lago. Además el calentamiento global ha secado algunos ríos que suministraban

La acidificación de los lagos y de las aguas superficiales es otro efecto de la lluvia ácida; esta reduce la capacidad de crecimiento de algunas plantas que viven en las aguas dulces debido a la disminución de la productividad de lagos y ríos que alimentan a las plantas, la cantidad de carbono orgánico disuelto en el agua superficial ha disminuido. Este carbono incluye moléculas que absorben UV de la luz solar, por lo tanto la disminución de sus niveles ha permitido el paso de mas radiación UV a las zonas mas profundas del lago. Además el calentamiento global ha secado algunos ríos que suministraban

carbono orgánico a los lagos y el agujero de ozono permite llegar mas radiación UV a la superficie de la tierra y a los lagos, por lo que los lagos de agua dulce sufren **por triplicado** los problemas ambientales globales (3).

Aunque los niveles de emisión del  $\text{SO}_2$  han disminuido significativamente en las últimas décadas tanto en Europa como en América del Norte, el pH de las precipitaciones ha cambiado poco. El pH medio de la lluvia en Europa es aún entre 4,0 – 4,5. Esto puede explicarse por la disminución de las cenizas volantes de las chimeneas y otras partículas sólidas, partículas de carácter alcalino que neutralizaban una fracción del  $\text{SO}_2$ . Además las emisiones totales de óxidos de nitrógeno no han disminuido ni en Europa ni en América del Norte, y buena parte de estas emisiones se han convertido en ácido nítrico, además las reducciones de las emisiones de origen industrial se han contrarrestado por el aumento de las emisiones de tráfico.

#### *La lluvia ácida en Galicia*

El estudio de la lluvia ácida en Galicia ha sido durante mucho tiempo un tema tabú siendo por ello difícil encontrar datos a lo largo del tiempo. Uno de los primeros trabajos realizados sobre la lluvia ácida fue la Tesis Doctoral de Ramon Varela titulada “La deposición ácida por vía húmeda en dos zonas rurales de Galicia: Ames y a Estrada. Impacto de la deposición atmosférica en *Pinus Pinaster Aiton*” (15). En ella se demostró la alta sensibilidad del territorio gallego a la deposición ácida encontrándose altos niveles de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  debidos a la combustión de las centrales térmicas. Concluye que la contaminación antropogénica que se da tiene un origen interno siendo el efecto de la contaminación transfronteriza de poca importancia y se comprueban los efectos perjudiciales para el *Pinus* y posiblemente para otras especies. Esta Tesis Doctoral aunque fue realizada en la Universidad de Santiago de Compostela no pudo ser defendida en ella y fue finalmente presentada y aprobada en le Universidad Complutense de Madrid.

Las principales industrias que generan lluvia ácida en Galicia son las centrales térmicas de As Pontes de García Rodríguez, de Meirama y la de Sabón, siendo las dos primeras las que más gases generadores de lluvia ácida producen en España. Así en la figura 20 podemos ver como la central de As Pontes era en 1993 la primera central y la de Meirama la segunda central en lo que a la emisión de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  se refiere.

La central térmica de As Pontes, está constituida por 4 grupos de generación eléctrica de 350 MW de potencia unitaria y se construyó para utilizar los lignitos pardos del yacimiento existente en la localidad, los distintos grupos entraron en operación los años 1976, 1977, 1978 y 1979. Los lignitos locales son carbones terciarios jóvenes de baja calidad, con altos contenidos de humedad, cenizas y azufre (2,5%), la presencia de este último da lugar a la generación de grandes cantidades de  $\text{SO}_2$  en su combustión. Para evitar este problema después de numerosos estudios ENDESA decidió mezclar estos lignitos con carbones de mas calidad como los procedentes de Powder River Basin de Wyoming (Estados Unidos) y de Indonesia. Después de realizar importantes modificaciones en la central y de desarrollar instalaciones de descarga en el puerto de Ferrol, la central paso a

Figura 20. Emisiones de centrales térmicas en 1993

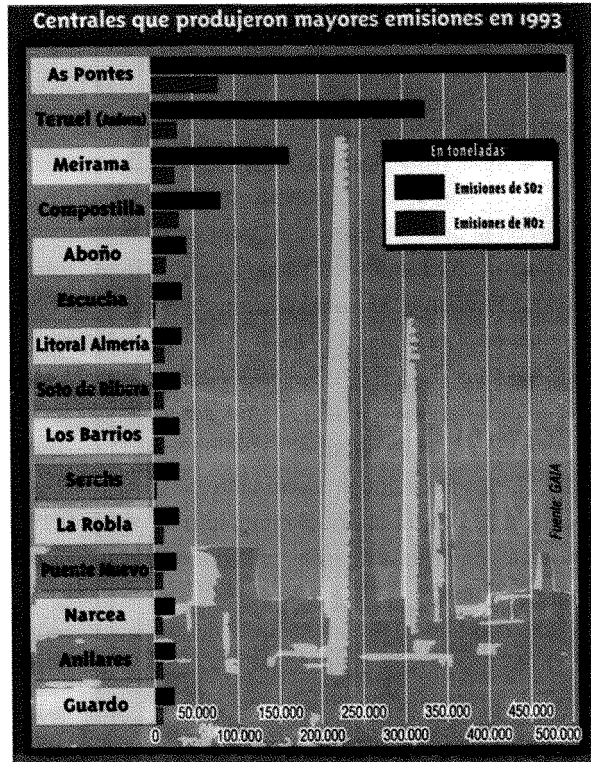
utilizar mezclas 50/50 de los lignitos locales y de los carbones importantes consiguiendo una reducción del 40% en la emisión del  $\text{SO}_2$ . En cuanto a la emisión de óxidos de nitrógeno según informaciones de la propia central estas se mantienen por debajo de lo permitido por la legislación europea (16)

Desde la entrada de España en la CEE, esta obligada a reducir sus emisiones gaseosas para adaptarse a la normativa europea. Esta normativa se concretaba en reducir para el

año 1993 las emisiones totales de cada Estado en un 40% respecto a las de año 1980, y en un 60% para 1998. A España se le han exigido reducciones del 40 y 50% respectivamente. El Plan energético Nacional (PEN) prevé reducción del 26% para 1997 y de un 37,7 % para el 2002.

A pesar de que en la actualidad las centrales gallegas han reducido un 40% sus emisiones y se encuentran dentro de los límites legales, otras centrales han reducido hasta un 80%. El volumen de  $\text{SO}_2$  emitido es del orden de 300.000 t/año en As Pontes, siguiendo Galicia en la cabeza del Estado Español, con un 33% del total emitido en España (17). A pesar de las medidas correctoras ya realizadas por ENDESA esta claro que todavía no parecen suficientes.

Estudios recientes demuestran que la lluvia ácida generada en Galicia no solo afecta al Norte de Europa sino que afecta también a Galicia. Así del estudio de los datos recogidos en las 5 estaciones peninsulares de la Red EMEP/BAPMON/CAMP (European Monitoring Evaluation Programme (convención de Ginebra)/Background Air Pollution Monitoring Network/Comprehensive Atmospheric Monitoring Programme (Convención de Oslo y Paris), la estación situada en Noya presenta el valor más bajo de pH 3,9 frente a valores de 4,6; 5,4; 5,5, y 5,6 de las estaciones de Toledo, Tarragona, Logroño y Granada. Por otra parte, durante el año 1997 (17) los valores medios mensuales de pH estuvieron por debajo de 5,6 (valor límite por debajo del cual se considera lluvia ácida) en los



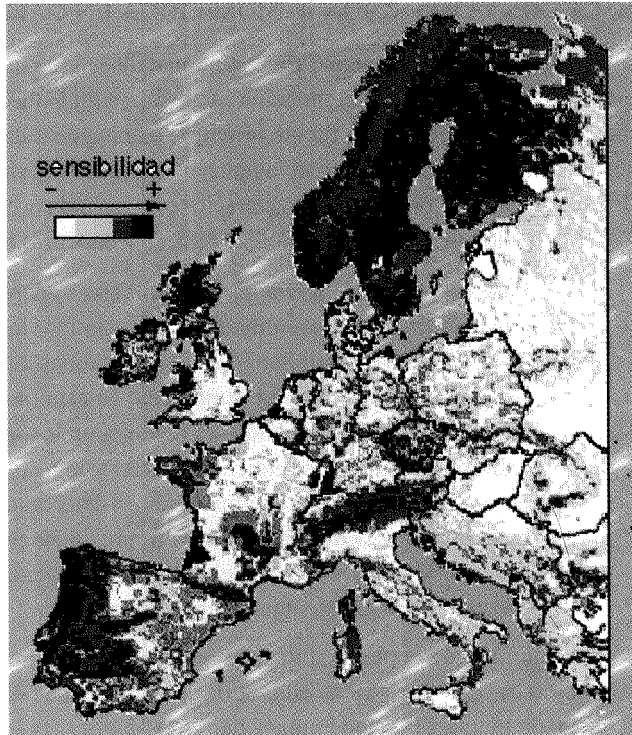
meses de enero (4,57), febrero (5,19), y abril (5,35), estando en agosto en (5,6). En las demás estaciones de España solo en enero de 1997 se presentó lluvia ácida en Toledo.

En cuanto a los agentes que favorecen la lluvia ácida, es decir los que producen la transformación de los contaminantes primarios, principalmente el  $\text{SO}_2$  en la lluvia ácida, cabe citar la Tesis Doctoral de Rosa Peña (18) realizada en el Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología de la Universidad de Santiago de Compostela en 1997, en la que se realiza el estudio de compuestos oxidantes en el entorno de la central térmica de As Pontes. El trabajo se enmarca dentro de dos proyectos financiados por Endesa titulados: "Caracterización de compuestos oxidantes en el entorno de la central térmica de As Pontes, 1992-94" y "Estudio de precursores oxidantes atmosféricos en el entorno de la central térmica de As Pontes 1400 W, 1994-97". En este trabajo se estudian los niveles del  $\text{H}_2\text{O}_2$  y del  $\text{O}_3$  en dos estaciones situadas en los alrededores de la central. La estación de Fraga Redonda situada en el Municipio de As Pontes al Suroeste de la central (11 km) dirección predominante de vientos (NE y E) en situaciones anticiclónicas y la estación de Louseiras, en el municipio de Muras a 13,5 km, situada en dirección opuesta (Noreste) en la zona de influencia de los vientos asociados a bajas presiones (SW) y causantes de lluvias.

Las principales conclusiones de este trabajo son que se encuentran bajos niveles de  $\text{H}_2\text{O}_2$  ya que no hay fuentes antropogénicas del mismo en la zona. Además dado que el nivel de insolación de la zona es relativamente bajo las concentraciones del  $\text{H}_2\text{O}_2$  gas ó líquido no pueden ser muy altas. Por otra parte la alta pluviosidad produce un importante efecto de lavado. La presencia del  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  (producidos por la central) puede inhibir la formación del  $\text{H}_2\text{O}_2$  a partir de los radicales libres presentes en la atmósfera. La reacción de estos radicales  $\text{HO}_2$  con óxido nítrico produce una disminución significativa en la generación de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Por otra parte, el poco  $\text{H}_2\text{O}_2$  presente se consume en gran parte en la oxidación de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ . Los niveles fueron determinados a nivel del suelo, y estudios recientes han demostrado que en general las concentración al nivel del suelo son mínimas y aumentan con la altura, siendo máximas cerca de la parte superior de la capa límite atmosférica, justo por encima de las nubes. En cuanto al  $\text{O}_3$  es difícil establecer comparaciones entre los niveles encontrados en otras zonas ya que las variables que afectan a su concentración en la troposfera son muchas y muy variadas.

En la actualidad se están realizando varios estudios acerca de modelos de distribución de los contaminantes precursores de la lluvia ácida, así como de los posibles agentes oxidantes presentes en el medio que pueden favorecer la formación de la misma. La razón de ello es que a pesar de la disminución de los niveles de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  emitidos no se ha producido una disminución del problema de la lluvia ácida. En un trabajo reciente (19) se concluye que un factor esencial a tener en cuenta en la deposición ácida en Galicia es la existencia de una actividad fotoquímica importante, en la intervienen los compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentes, lo que favorece la existencia de radicales libres, los cuales a su vez aceleran y promueven la generación de oxidantes que permiten la for-

Figura 21. Distribución de lluvia ácida sobre Galicia y Europa (la coloración puede identificarse con los distintos grados de acidez señalados en la escala de la izquierda del mapa)



mación de la lluvia ácida; concluyendo que la sola reducción de emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  no garantiza una reducción análoga de su deposición, si no se tienen en cuenta también las emisiones de los COVs.

Los principales problemas que genera la lluvia ácida en Galicia son:

- a) contaminación aguda en zonas concretas y crónica en la mayor parte de Galicia. En la figura se muestran las zonas más afectadas por la lluvia ácida
- b) daños sobre las plantas, debilitándolas y haciéndolas más sensibles a todo tipo de enfermedades
- c) afecta negativamente a los microorganismos del suelo repercutiendo en los nutrientes
- d) agudiza en el hombre las enfermedades respiratorias
- e) provoca la movilización del aluminio y otros metales pesados tóxicos del suelo pasando a las aguas superficiales y subterráneas
- f) la quema del lignito libera además metales tóxicos como el mercurio, cadmio y otros que pasan a la atmósfera, suelo, agua y vegetación
- g) aumenta la corrosión de muchos materiales de construcción, metálicos, pinturas, etc. En esta línea destacan los trabajos realizados por el grupo del Espada Recarey (20) del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Vigo sobre la corrosión de distintos tipos de materiales metálicos usados en la construcción
- h) aumenta la destrucción de monumentos del patrimonio histórico artístico gallego

## B) LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN GALICIA

A parte de los problemas de contaminaciones globales ya comentados hablaremos en este apartado de la contaminación atmosférica en Galicia. La contaminación del aire puede originarse desde una fuente principal que puede afectar a un área pequeña, o bien ser originada por una mezcla de agentes contaminantes provenientes de varias fuentes difusas tales como el tráfico, las calefacciones y las industrias.

Al hablar de la contaminación atmosférica debemos hablar de tres fases:

1. **Fase de emisión:** en ella los contaminantes aparecen en el lugar donde se originan a elevadas concentraciones. En esta fase los accidentes ocasionados son de tipo agudo y se limitan a las inmediaciones de la fuente.
2. **Fase de suspensión en la atmósfera:** en esta fase el contaminante permanece en la atmósfera produciendo alteraciones en los seres vivos. En esta fase son de gran importancia las condiciones meteorológicas ya que contribuyen a dispersar o a concentrar los contaminantes en determinadas zonas.
3. **Fase terminal o de sedimentación:** en ella se produce un retorno de las sustancias contaminantes hacia el suelo, la vegetación o sobre los materiales en los que puede producirse una fijación irreversible.

El número de contaminantes atmosféricos es muy elevado, pero el interés de su estudio no es igual para todos ellos. Los contaminantes del aire de especial interés para el medio ambiente y la salud humana han sido fijados para los países de la Unión Europea en base a una serie de criterios establecidos por la OMS. Estos criterios se pueden resumir en los siguientes:

- la gravedad y frecuencia de los efectos adversos observados o sospechados en la salud humana, en los que los efectos irreversibles son de especial preocupación
- la ubicuidad y abundancia del agente en el ambiente en el que se mueve el hombre
- las transformaciones ambientales o alteraciones metabólicas, cuando estas alteraciones puedan dar lugar a sustancias químicas con mayor potencial tóxico
- la persistencia en el ambiente, especialmente si el contaminante puede resistir los procesos de degradación ambiental y acumularse en los seres vivos
- la población expuesta, prestándose especial atención cuando afecta a una gran población, o a grupos ocupacionales, así como a las exposiciones selectivas de grupos vulnerables como pueden ser mujeres embarazadas, niños, personas de edad etc.

Con estos criterios se ha establecido la necesidad de estudiar los siguientes contaminantes:

**Contaminantes de tipo orgánico:** acrilonitrilo, benceno, disulfuro de carbono, 1-2dicloroetano, diclorometano, formaldehído, hidrocarburos aromáticos polinucleares, estireno, tetracloroetileno, tolueno, trocloroetileno y cloruro de vinilo

**Contaminantes de tipo inorgánico:** arsénico, asbestos, cadmio, monóxido de carbono, cromo, sulfuro de hidrógeno, manganeso, mercurio, níquel, óxido de nitrógeno, ozono y oxidantes fotoquímicos, materia particulada, radon, óxidos de azufre y vanadio

De estos 28 contaminantes, la CEE solo ha legislado mediante Directivas Comunitarias sobre: asbestos, óxidos de nitrógeno, ozono, materia particulada, óxidos de azufre y plomo. Para vigilar la calidad del aire, es decir para establecer la concentración de los contaminantes en el aire con el fin de satisfacer los criterios de calidad del aire establecidos en los programas de control y en la legislación vigente, se instalan diversos aparatos en diferentes lugares de una ciudad, en torno a una industria determinada, etc, y al conjunto de estos aparatos se le denomina una red.

Los objetivos de una red son:

- conocer los niveles de fondo de una determinada zona
- informar sobre la evolución de la contaminación
- comprobar la validez de los modelos de dispersión de los contaminantes en la atmósfera
- facilitar la información necesaria para la elaboración y la corrección, si es preciso, de planes de urbanismo y la creación de áreas industriales
- suministrar las concentraciones de contaminantes en los estudios de efectos sobre la salud
- contrastar la eficacia de las políticas de control de la contaminación atmosférica
- comprobar el grado de cumplimiento observado con respecto a la legislación estatal y las Directivas Comunitarias
- poseer un conocimiento fiable para la tramitación de quejas y denuncias
- informar al público cual es la calidad del aire que respira

Las redes pueden clasificarse de muchas formas pero quizás la mas interesante es aquella que las clasifica según sus objetivos en:

**Redes de vigilancia:** se limitan a proporcionar información, de forma mas o menos continua, sobre la evolución del problema de la contaminación con objetivos de tipo general.

**Redes de alerta:** permiten el conocimiento de los niveles de contaminación en tiempo real y llevan dispositivos de alarma que funcionan cuando la situación presenta una serie de aspectos prefijados, con objetos de evitar períodos de alta contaminación, peligrosos desde el punto de vista sanitario.

En Galicia en la actualidad existe **La red nacional de vigilancia y control de la contaminación atmosférica en Galicia (RENVACAG)**, que depende de la Consellería de Sanidad y esta constituida por 11 redes de Control de la Calidad del aire situadas en el entorno de los principales focos de origen industrial, comprenden un total de 94 estaciones y 315 monitores que miden un total de 6 contaminantes, controlando en total 15 industrias (21).

<b>REDES</b>	<b>Nº ESTACIONES</b>	<b>Nº PARÁMETROS</b>
Central térmica de As Pontes	47	182
FerroAtlántica Dumbria	3	6
Central térmica Meirama	8	40
Cinturón industrial de A Coruña	12	34
FerroAtlántica CEE	3	3
FINSA	2	4
Alúmina-Aluminio, SA	5	20
Cementos Cosmos, SA	2	5
Cedie,SA	3	7
ENCE,SA	4	14
CITROEN HISPANIA,SA	2	8
<b>TOTAL</b>	<b>91</b>	<b>323</b>

Por otra parte, como complemento a estas redes y como unidad de control y validación de datos, el Laboratorio de Medio Ambiente Industrial de Galicia dispone de una Unidad Móvil de Inmisión, que mide en continuo y a tiempo real los siguientes contaminantes químicos y parámetros meteorológicos:

- SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, NO<sub>x</sub>, flúor y partículas
- presión barométrica, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento

El centro de proceso de datos de la contaminación atmosférica de Galicia (C.P.D.) esta situado en el citado Laboratorio que recibe los datos a tiempo real de las distintas redes de control de la contaminación atmosférica.

De los datos recogidos en esta red se puede concluir que en general la atmósfera de Galicia es higiénicamente admisible ya que la contaminación atmosférica por lo que se refiere a los valores de inmisión es baja, ya que los valores encontrados están por debajo de los valores límite que marca la legislación vigente. Existen solo algunos problemas puntuales, así por ejemplo en 1995 en la ciudad de Vigo se encontraron altos valores de partículas en suspensión que se aproximan a los valores límite permitidos y que son debidos al tráfico (22).

## LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

### 1. La contaminación en las rías gallegas

Una ría es un valle fluvial profundo que posteriormente fue invadido por el mar. Las rías pueden tener un comportamiento hidrográfico diferente y por ello pueden clasificarse en diferentes grupos desde el punto de vista dinámico. Las rías gallegas pueden considerarse como estuarios parcialmente mezclados, esto quiere decir que como la corriente de la marea supera a la producida por la descarga del río se produce una mezcla vertical del agua salada del mar y del agua dulce del río. La circulación del agua es por lo tanto considerable siendo la entrada del agua profunda unas 10 veces mayor que la del caudal del río.

El agua de una ría esta formada aproximadamente por un 98% de agua oceánica, por lo tanto las características del agua de las rías dependen principalmente de las características del agua de mar. El agua de mar es una disolución de sales, de las cuales un 78% es la sal común, el cloruro sódico, NaCl; existen además otros iones que llamamos mayoritarios como son el calcio, magnesio, potasio, estroncio, sulfato, carbonatos, fluoruros y bromuros. A estos iones mayoritarios también se les llama conservativos porque su concentración relativa frente a la salinidad es practicamente constante. Sin embargo, existe otro grupo de iones que llamamos minoritarios y en especial los llamados nutrientes, que son el nitrato, el hidrogeno fosfato y el silicato, que aunque se encuentran en baja concentración tienen variaciones muy grandes y de ellas depende la productividad biológica de cada tipo de agua (23).

El agua del río forma una parte muy pequeña del conjunto de la ría, por ello los únicos iones que tienen importancia desde el punto de vista de la contaminación son aquellos que son minoritarios en el agua oceánica ó que son extraños a ella. Los ríos tienen una mayor concentración de nutrientes, silicatos y nitratos que el agua de mar. En el invierno con la mayor descarga de los ríos se produce un aumento de la concentración de nutrientes en el agua superficial que va disminuyendo hacia la boca de la ría. En primavera con la mayor cantidad de horas de sol aumenta la fotosíntesis produciendo una disminución de nutrientes. El fitoplacton del agua superficial de la ría a medida que avanza hacia la boca va realizando la fotosíntesis y multiplicandose. Cuando el agua sale de la ría no lleva nutrientes y el fitoplacton que no fue utilizado como alimento por otros organismos muere y sedimenta remineralizandose en el fondo por la acción bacteriana con la correspondiente regeneración de nutrientes. El agua rica en nutrientes que penetra por el fondo se enriquece mas con estos nutrientes regenerados para repetir un nuevo ciclo aumentando su concentración sucesivamente, de manera que al final del verano la ría presenta su máxima concentración de biomasa potencial.

A pesar de la gran importancia que el estado de conservación de las rías gallegas tiene para la economía de Galicia el estudio completo del estado actual de todas ellas relativo no solo a los parámetros que definen el estado natural de las rías sino también las posibles contribuciones antropogénicas de todo tipo, no podemos afirmar que en la actualidad halla sido realizado en profundidad. Si existen datos hidrográficos de las rías, algunos desde 1920, pero son datos referidos básicamente a parámetros tales como temperatura, salinidad, oxígeno, pH, fosfato, nitrato, nitrito, amonio y sílice. Todos estos datos hasta 1995 han sido recopilados por Fraga Rodriguez(23), aunque no se incluyen en esta publicación ningún dato relativo a especies contaminantes antropogénicas. Una relación de publicaciones que abarca un campo mas amplio en el conocimiento de las rías gallegas desde 1900 hasta 1977 ha sido realizada por Niell en 1978 (24).

A principios de 1989 la Consellería de Sanidad de la Xunta de Galicia a través de la Subdirección de Salud Ambiental de la Dirección General del Servicio Gallego de Salud puso en marcha un Programa de Sanidad Ambiental orientado fundamentalmente a conocer la calidad de las aguas marinas destinadas a los cultivos marinos, llamado pro-

grama **RENV CAM “Red de Control y Vixilancia Sanitaria da Contaminación Marítima da Comunidade Autónoma de Galicia”**. El objetivo de este programa era reunir las distintas acciones aisladas que se estaban desarrollando en las distintas rías gallegas y además se complementaba con los estudios de calidad de las aguas marítimas destinadas a zona de baños del Programa Control Sanitario de la Calidad de las Aguas y Zonas de Baño.

Este programa fue desarrollado por la Consellería de Sanidad (unidad de Sanidad Ambiental de los Servicios Centrales y de las Delegaciones provinciales de Sanidad), la Consellería de Pesca, Acuicultura y Cultivos Marinos, y los Departamentos de Química Analítica, Nutrición y Bromatología y el de Microbiología y Parasitología de la Universidad de Santiago de Compostela, participando en total mas de 50 personas. El programa tuvo una duración de 3 años, desde mayo de 1989 hasta mayo de 1992.

Los objetivos del programa eran fundamentalmente dos:

- disponer de una estadística actualizada, fiable y continua en el tiempo de los indicadores y niveles de contaminación en: aguas marítimas, sedimentos, fangos y moluscos bivalvos.
- Determinar valores de: indicadores microbiológicos, microcontaminantes inorgánicos y plaguicidas.

Para poder desarrollar estos objetivos el programa se dividió en tres partes:

**Subprograma MR.** Orientado a conocer la calidad sanitaria de microcontaminantes inorgánicos y contaminantes orgánicos en bioindicadores (mejillón de roca y mejillón de batea), investigándose los siguientes parámetros:

*Físico-químicos* (en las aguas marítimas donde se crían los moluscos), pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y salinidad

*Microcontaminantes inorgánicos* (en moluscos), cadmio, plomo, cobre, níquel, zinc, cromo, hierro y mercurio

*Plaguicidas* (en moluscos), organoclorados y PCB's. La red de control constaba de 92 estaciones de muestreo situadas a lo largo de la costa gallega desde Ribadeo a Baiona, con 30 estaciones de muestreo situadas en bateas de cultivo de mejillón en las rías bajas.

**Subprograma MV.** Orientado a conocer la calidad microbiológica de las aguas marítimas de Galicia y de los moluscos bivalvos cultivados en las bateas. Los parámetros que se estudiaron fueron: Coliformes totales, Coliformes fecales, *Escherichia coli*, *Streptococcus fecalis*, Clostridios sulfito reductores, Heterotrofos, Bacterias marinas, *Vibrio parahaemolyticus* y Salmonelas. La red de control contenía 50 estaciones situadas preferentemente en las rías bajas (Vigo, Pontevedra y Arosa) y en las bateas de mejillón de los polígonos de cultivo.

**Subprograma HG.** Orientado al estudio del mercurio y de los derivados organo-mercúricos (metilmercurio) en sedimentos y fangos, mejillón de roca y de batea y moluscos bivalvos de parques de cultivo. Se determinó el mercurio total, el mercurio

inorgánico y el metilmercurio. La red de control constaba de 50 estaciones de control de sedimentos y 20 estaciones de control de moluscos bivalvos situados en áreas cercanas a Placeres (Ría de Pontevedra), cerca del complejo industrial de Elnosa-Celulosas de Pontevedra.

#### *Conclusiones del programa MV*

Las muestras de agua marítima que se analizaron en las diferentes zonas de cultivo de mejillón de batea presentan valores inferiores de los que indica la legislación vigente para los indicadores de calidad bacteriológica en las Directivas de Calidad de agua para cría de moluscos bivalvos. Globalmente la Ría de Arosa es la que presenta un menor grado de contaminación microbiológica. Destaca la zona de la ría de Pontevedra (desde la desembocadura del río Lerez en la ciudad de Pontevedra hasta Placeres cerca de la isla de Tambo y Lourido) presentan niveles altos de contaminación microbiológica fecal, fundamentalmente de origen humano.

En cuanto al estudio de sedimentos y fangos existe una zona de alta contaminación microbiológica originada su totalidad por los restos de detritus de mejillón de las bateas debidos a las operaciones de trabajo en las mismas. El estado de los fondos de las rías donde se cultiva el mejillón es preocupante debido al aumento de la contaminación microbiológica, llegando en algunas zonas a comenzar a obtenerse condiciones anaerobias en los fondos.

El estudio microbiológico de los mejillones tanto en los de batea como en los de roca no supuso problema alguno ya que en ningún caso se sobrepasaron los valores límite.

#### *Conclusiones del programa MR*

En lo que respecta al estudio de plaguicidas y PCB's en los moluscos los valores obtenidos individualmente para cada plaguicida así como en el total de pesticidas y de PCB's son similares a los encontrados en estudios anteriores realizados en las mismas rías y similares a los encontrados en la bibliografía en otras zonas costeras. En cuanto a los metales pesados estudiados, en ningún caso se superaron los valores permitidos por la legislación, solo debe destacarse que los valores encontrados en el mejillón de roca son superiores, a veces hasta el doble que el de los mejillones de batea. En cuanto a los parámetros fisico-químicos, los valores encontrados están siempre por debajo de los permitidos por la legislación vigente y concuerdan con los obtenidos en el programa de control y vigilancia sanitaria de las zonas de baño marítimas.

#### *Conclusiones del programa HG*

En las rías de Vigo y Arosa y en la zona externa de la ría de Pontevedra los niveles encontrados del mercurio son similares y están por debajo de los límites permitidos.

En las zonas próximas a Placeres (cercanas al complejo Celulosas-Elnosa) los niveles de mercurio obtenidos son unas 10 veces superiores a los de otras rías, estando comprendidas entre 0,2-0,4 ppm, aunque se encuentran por debajo de 1 ppm que es el valor

permitido. Finalmente las muestras recogidas enfrente de Elnosa presentan niveles entre 0,6-1 ppm encontrándose en estas muestras los valores mas altos de metilmercurio.

De todas las rías gallegas, la ría de Vigo es la mejor conocida, debido por un lado a que en ella se encuentran dos centros dedicados a los estudios marinos, el Instituto Español de Oceanografía creado en 1917 y el Instituto de Investigaciones Pesqueras del C.S.I.C creado en 1952 que a partir de 1986 paso a llamarse el Instituto de Investigaciones marinas. Por otra parte, la ría de Vigo es la que mejor se presta para el estudio de una ría por su especial forma, mas regular, sin accidentes geográficos importantes, lo que permite sacar conclusiones generales con mayor fiabilidad..

En la actualidad el Centro Gallego para el control de calidad del medio marino que pertenece a la Consellería de Pesca, Marisqueo y Acuicultura de la Xunta de Galicia empezó a partir de 1992 a la toma de datos semanal de las condiciones hidrográficas y plancton de las principales rías. En las diferentes estaciones localizadas en las rías se estudia un perfil vertical desde la superficie al fondo, de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH, fluorescencia y transmitancia de la luz, así como la acción integrada de nitrato, nitrito, amonio, fosfato y silicato.

En cuanto a publicaciones generales sobre estado de conservación de las rías gallegas merece destacarse la obra de A.Carballeira, et al, (26), titulada "Estado de conservación de la costa de Galicia, nutrientes y metales pesados en sedimentos y organismos intermareales". En esta obra se realiza un estudio de toda la costa gallega relativo a los nutrientes y metales pesados en sedimentos y en organismos. De los resultados obtenidos en este estudio se puede deducir las siguientes conclusiones: en lo relativo a los sedimentos las zonas con niveles considerables o altos de contaminación son: A Coruña, Xunqueira-Noia, A Pobra, Rio Ulla, Vilanova-Cambados, Pontevedra, San Simón, Redondela y Samil. El 65 % de los espacios analizados presenta un Índice de riesgo ecológico potencial, IREP, bajo o nulo. Un 35% (7 de los 20 espacios) presenta un índice moderado. Estas zonas coinciden con espacios afectados por la proximidad de una población urbana y/o industrial importante y por tanto están afectados por efluentes de desecho no depurados total o parcialmente. Con IREP moderado, Viveiro, Cedeira, Ferrol, A Coruña (ría do Burgo), ría de Arousa, ría de Pontevedra, Ensenada de San Simón y Samil en la ría de Vigo.

En cuanto a los organismos marinos la determinación de los factores de contaminación para las distintas zonas según las concentraciones metálicas encontradas en los tejidos corporales es imprescindible, ya que si el estudio de la fase sedimentaria nos indica el grado de acumulación de las sustancias potencialmente disponibles para los organismos, el conocimiento de la fase biótica nos indica el grado de la presencia real de los metales en la cadena trófica. Se estudiaron las especies *Nereis diversicolor* y *Fucus ceratoides* porque reflejan las dos fases metálicas fuente, la particulada del sedimento y en disolución del agua. De todos los metales estudiados el cobre es el elemento mas contaminante apareciendo los valores mas elevados en zonas caracterizadas por una considerable presión urbana y/o industrial, Foz, Viveiro, Ferrol, Betanzos, la ría del Burgo, la ría

de Noia, de Arousa y San Simón en Vigo. El níquel y el cromo siguen en orden de importancia por su grado de acumulación. Esta misma tendencia también fue observada en el caso de los sedimentos, confirmando el enriquecimiento de cobre que se viene produciendo en estos ecosistemas.

#### *Contaminación microbiológica de las rías gallegas*

El interés del estudio de la contaminación microbiológica de las aguas costeras es debido por una lado a la alteración ecológica que esta pueda producir y por otra parte al efecto que esta pueda producir en la aptitud de las aguas para el baño y la cría de moluscos. Suponiendo en ambos casos un peligro para la salud pública, ya que los organismos patógenos pueden sobrevivir y mantenerse activos durante un largo período de tiempo en estos ecosistemas. Por otra parte debido a que los moluscos por su forma de alimentarse son capaces de concentrar y retener un gran número de bacterias y virus es de gran interés el conocimiento de este tipo de contaminación en las aguas dedicadas al cultivo de moluscos. El estudio de esta problemática es especialmente importante para Galicia debido a la práctica de verter residuos sin tratar o insuficientemente tratados a las aguas costeras. Si a ello añadimos la gran carga bacteriana transportada por los ríos que se desembocan en las rías, el vertido final de los residuos fecales de nuestras rías puede alcanzar cotas lo suficientemente elevadas como para poner en peligro la posibilidad de la productividad de las rías.

En la actualidad existen dos normativas relativas al control de la calidad de las aguas para el baño y para la cría de moluscos. Estas son:

Real Decreto 734/1988 de 1 de julio (BOE 13 de julio), corrección de errores 16 julio por el que se establecen normas de calidad de las aguas de baño, que son las mismas normas que para las aguas superficiales.

Real Decreto 345/1993 de 5 de marzo (BOE 27 marzo), corrección de errores de 5 de julio, por el que se establecen normas de calidad de las aguas y de la producción de moluscos y otros invertebrados marinos vivos, el cual incorpora normas relativas a la calidad de las aguas exigidas por la directiva 79/923/CEE.

Los dos estudios más amplios que se ha realizado en este sentido y que son accesibles al público han sido, el primero de ellos el realizado en 1987 por la Consellería de Ordenación del territorio y Obras Públicas sobre **“Plan de saneamiento para cinco sistemas de rías de Galicia”**(27) que incluía la rías de Vigo, Ferrol, A Coruña, Arousa y Pontevedra. El segundo corresponde al programa **RENV CAMG** ya comentado cuyo subprograma MV incluye el estudio de la calidad sanitaria de las aguas de cultivo de moluscos en las rías de Vigo, Pontevedra, Arousa y Muros-Noia.

A continuación se exponen brevemente los resultados más significativos de estos estudios para las diferentes rías:

#### *Ría de Vigo*

En el primero de los trabajos citados se estudiaron 9 puntos próximos a las márgenes de toda la ría y en ellos se realizó un único muestreo. Lo más destacable de este tra-

bajo es que el agua de la mayor parte de la ría presentaba niveles bajos de contaminación, siendo apta para el cultivo y baño, con excepción del litoral del municipio de Vigo y las ensenadas de Moaña, Cangas, y Baiona-Playa América, siendo especialmente elevada la contaminación frente al área urbana de Vigo y desembocadura del río Lagares, no siendo apta ni para el cultivo ni para el baño. El segundo trabajo mas amplio incluyo 47 de muestras de agua, 5 de sedimentos y 20 de mejillones de batea recogidas en las 5 zonas de cultivo de la ría; y de se dedujo que en general la contaminación bacteriológica del agua de las zonas de cultivo es baja, aunque existen diferencias significativas entre las 5 zonas de cultivo. En cuanto al nivel de contaminación bacteriológica del mejillón se puede decir que los niveles fueron muy elevados, muy superiores a los encontrados en las muestras de agua, no encontrándose diferencias entre los mejillones de las distintas zonas. Los sedimentos se caracterizaron por su alto nivel en bacterias indicadoras en comparación con la columna de agua.

#### *Ría de Pontevedra*

La primera referencia sobre contaminación bacteriológica en esta ría corresponde al programa **ESCORP** iniciado en 1980 y centrado exclusivamente en esta ría(28). En el se estudiaron muestras de agua recogidas a dos profundidades diferentes en 20 estaciones de muestreo y en muestras de mejillones recogidas en 15 puntos distribuidos por toda la ría. Se encontraron altos niveles de contaminación en agua y sedimento en la parte interna de la ría hasta la isla de Tambo y Marin manteniéndose en menor medida hasta Sanxenxo. En la zona abierta de la ría y en el margen sur no se detectó contaminación, solo una cierta contaminación en la ensenada de Bueu. Estos resultados fueron confirmados con los obtenidos por el Plan de saneamiento para las cinco rías de Galicia antes citado, concluyendo que existen dos zonas claramente diferenciadas desde el punto de vista microbiológico, una zona interna altamente contaminada en la que no es posible el baño y el cultivo de moluscos y otra exterior a partir de la isla de Tambo en donde no se detecto contaminación bacteriana. En el programa RENCAMG se estudiaron muestras de agua, sedimentos y mejillones procedentes de las 3 zonas de cultivo de moluscos, y los resultados obtenidos permitieron comprobar que el nivel medio de contaminación bacteriológica del agua es igual al de la ría de Vigo, relativamente baja, no existiendo diferencias significativas entre las 3 zonas del cultivo. En lo que respecta a las muestras de mejillón, se observa en primer lugar que el nivel medio de contaminación fecal es muy superior al del agua que los rodea (x2 ó x3) siendo el nivel de contaminación de la zona interna muy superior.

#### *Ría de Arousa*

Los datos de que se dispone para esta ría corresponden a los dos programas ya citados para la ría de Vigo, el Plan de Saneamiento y el programa RENCAMG, estudiándose en el primero muestras de agua en 11 puntos y en el segundo 156 muestras de agua y sedimentos recogidas en 8 zonas de cultivo y 69 muestras de mejillón de batea procedentes de las 9 zonas de cultivo en que esta dividida esta ría.

Para esta ría la conclusión del primer estudio es que el estado microbiológico del agua correspondiente a la mayoría de la ría es bueno en general, a excepción del nivel de contaminación en las ensenadas de Rianxo, Boiro, Ribeira y O Grove, y una elevada contaminación en el área circundante de Villargacia. El segundo estudio más amplio confirma los resultados del primero, la contaminación bacteriológica en la columna de agua es baja, pero existen diferencias significativas cuando se compara con el sedimento, en el cual los recuentos medios son muy superiores. Esto ya se había observado en las rías de Vigo y Pontevedra y confirma el carácter del sedimento como reserva de la contaminación bacteriológica. Por otra parte, existen diferencias significativas entre las distintas zonas de cultivos tanto en lo que se refiere a la contaminación bacteriológica del agua, como de los moluscos estudiados, concluyéndose que el estado sanitario no es uniforme en toda la ría de Arousa, sino que existen diferencias claras entre las distintas zonas de cultivo. En función de los niveles de contaminación bacteriana se pueden distinguir tres zonas:

- a) un área de muy baja calidad que comprende toda la margen norte desde la desembocadura del río Ulla hasta Riveira.
- b) Una segunda área, que corresponde a la parte central de la ría y la zona de Vilagarcía y Vilanova, con alta calidad sanitaria en la que todas las zonas se pueden considerar aptas para el cultivo.
- c) Una tercera área localizada en la boca de la ría con niveles de contaminación intermedios.

#### *Ría de Muros-Noia*

Para esta ría solo hay datos procedentes del programa RENVCAMG y corresponden a los análisis bacteriológicos de muestras de mejillón recogidas en los polígonos de Muros y Noia. Lo más destacable fue que el grado de contaminación acumulado es los moluscos fue muy elevado estando más contaminada la zona interna de la ría.

Como conclusión del estudio de estas tres rías, Arousa, Pontevedra y Vigo, podemos decir que las aguas de cultivo aunque presentan una cierta contaminación fecal, en general es bastante baja, siendo la contaminación de la ría de Vigo superior, debido probablemente a la mayor densidad de población. Sin embargo, a pesar de bajos niveles de contaminación en el agua se encuentran niveles altos en algunos moluscos de las diferentes zonas de cultivo en todas las rías estudiadas, confirmando la gran capacidad de concentración que presentan estos moluscos. Bajos niveles de contaminación en el agua son compatibles con altos niveles en el mejillón presente en ella.

La clasificación de las zonas de cultivo en diferentes tipos de zonas de producción, A, B, y C, de acuerdo con el Real Decreto 345/1993 indica que para los mejillones procedentes de la mayoría de las zonas es necesario un proceso de depuración (más o menos drástico según el tipo de zona, siendo la zona C la que requiere el proceso más fuerte) antes de destinarlos al consumo humano directo, y hay zonas en que se cultivan que no deberían ser consumidos aunque fuesen sometidos al proceso de depuración más complejo exigido por la legislación (zonas tipo D). En las siguientes figuras, figura 22 a 24, se pueden ver las distintas zonas de producción en las 4 rías estudiadas. Otro aspecto a

destacar en todas las rías es que la zona mas contaminada es la que se encuentra en el margen norte o en la proximidad de núcleos de población importantes.

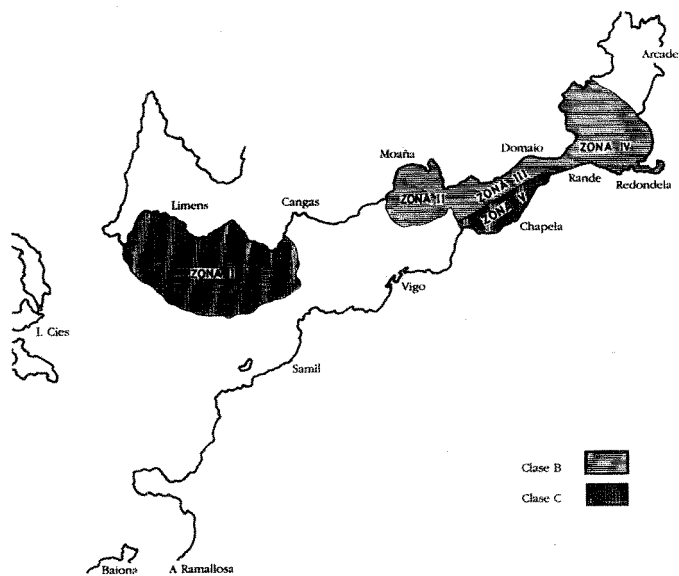


Figura 22. Representación gráfica de los diferentes tipos de zonas de producción de moluscos de la ría de Vigo



Figura 23. Representación gráfica de los diferentes tipos de zonas de producción de moluscos de la ría de Pontevedra

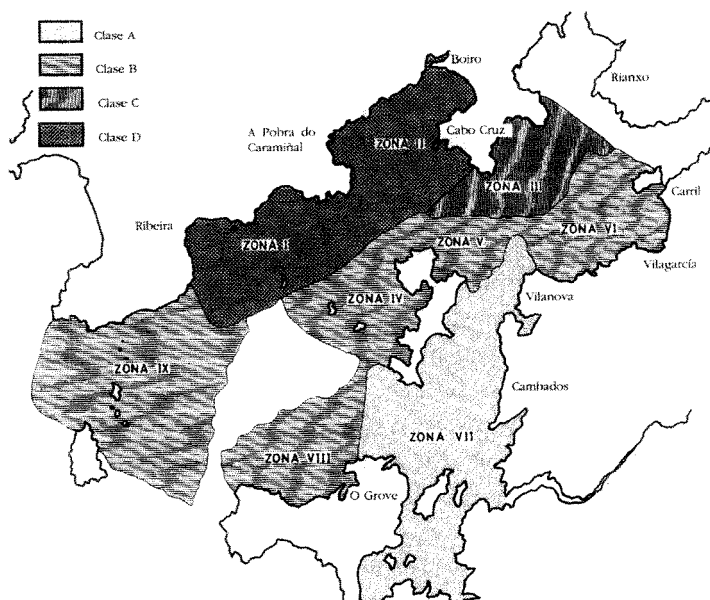


Figura 24. Representación gráfica de los diferentes tipos de zonas de producción de moluscos de la ría de Arousa

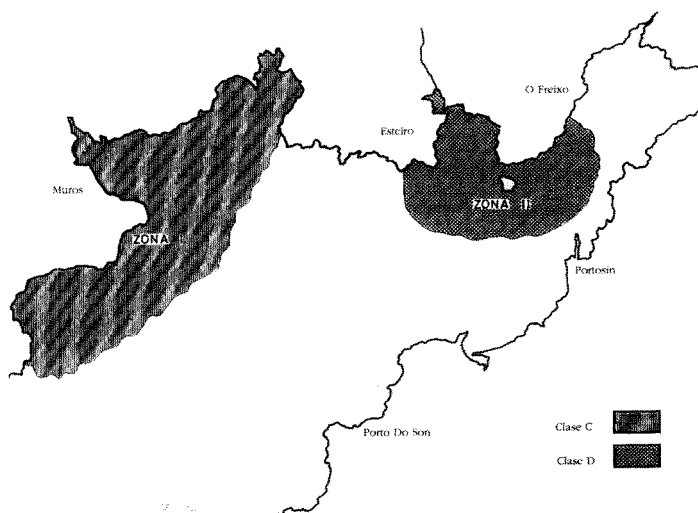


Figura 25. Representación gráfica de los diferentes tipos de zonas de producción de moluscos de la ría de Muros-Noia

### *Rías de A Coruña, Ferrol, Ortigueira, Cedeira, O Barqueiro y Viveiro*

Los datos disponibles para estas rías se obtuvieron del Plan de saneamiento para cinco rías en Galicia (Ferrol, A Coruña, Arousa-Umiá, Pontevedra y Vigo) y el Plan de Saneamiento de las rías gallegas, rías de Viveiro, O Barqueiro, Cedeira, Ortigueira, Ares y Betanzos, y del seguimiento, control y gestión del Plan de Saneamiento, rías de A Coruña, Ferrol, Arousa, Pontevedra y Vigo.

Con respecto a la ría de A Coruña se llegó a la conclusión de que la contaminación biológica y microbiológica es alta en la ría del Burgo, en la cual la capacidad de dilución es baja y además tiene innumerables vertidos de pequeña entidad de industrias diversas. En el exterior de la ría la contaminación es elevada en las proximidades de la ciudad de A Coruña, playa de Santa Cristina y Santa Cruz, en las que las aguas incumplen las condiciones de baño y cría de moluscos. En la ría de Ferrol es alta en la parte interna de la ría a partir del puente Pías, y en las ensenadas de Malata y Caranza, Astano y en la zona portuaria de astilleros de Ferrol; en general en toda la margen norte, no siendo adecuada para los cultivos marinos. En las rías de Ortigueira, Cedeira, O Barqueiro y Viveiro el nivel de contaminación es bajo siendo aptas para el baño y los cultivos marinos.

### **La contaminación por compuestos organoestánicos**

Los compuestos orgánicos de estaño encuentran aplicación en un amplio número de campos. Este hecho ha propiciado el espectacular aumento en la producción mundial de estos compuestos, pasándose de una producción anual prácticamente nula a finales de los años 40 a unas 30000 toneladas en el año 1980 y unas 50000 en la década de los 90.

Una de las aplicaciones más conocidas de los compuestos organoestánicos debido al efecto dañino que produce en el medioambiente, es el empleo del tributilestaño (TBT) en pinturas antiincrustantes. La adición del TBT en este tipo de pinturas comenzó ya en los años 60. Las algas, moluscos y otros organismos marinos se adhieren al casco de los barcos ralentizando su movimiento y por tanto aumentando el gasto de combustible. El TBT se libera directamente al agua formando una película tóxica alrededor del barco que impide las incrustaciones.

Sin embargo, los estudios realizados en la década de los 80 en los cultivos de ostras de la bahía de Arcachon en la costa atlántica francesa, señalaron al TBT como causante del aumento de la mortalidad y la aparición de malformaciones en la concha de los animales. Posteriores investigaciones pusieron de manifiesto la toxicidad del TBT en otros organismos marinos como los moluscos. Este descubrimiento activó la alarma medioambiental que hizo que numerosos países, con Francia como pionero, aprobasen una legislación introduciendo restricciones en el uso del compuesto. Una de las alteraciones mejor tipificadas en España corresponde a la masculinización acusada que presentan gastrópodos y moluscos en aguas marítimas de Galicia (29), Cataluña y Huelva (30), y que se asocia de forma inequívoca a la exposición a tributilestaño y otros derivados del estaño uti-

lizados como antialgas. La Unión Europea ha prohibido el empleo de TBT en pinturas antiincrustaciones a partir de enero de 2003.

Los compuestos organoestánicos se han encontrado en concentraciones del orden de ng- $\mu$ g/l en agua dulce y muestras marinas. La mayor concentración de estos compuestos se encontró en la microcapa de la superficie. El TBT posee una gran afinidad por las partículas sólidas lo que convierte a los sedimentos en una especie de almacén de este compuesto. Bajo ciertas condiciones de pH, temperatura, etc, los sedimentos pueden liberar la sustancia tóxica de nuevo a la columna acuosa aumentando la concentración en el agua incluso mucho después de cesar su introducción en el medio. Además, la velocidad de degradación de los organoestánicos en los sedimentos es mucho menor que en el agua, teniendo una vida media de entre 1 y 4 años. Por tanto, el análisis de sedimentos es un indicador de los niveles de contaminación de las aguas y puede relacionarse con la mortalidad o salud de los organismos que viven en ellas. Además la determinación de la concentración de los compuestos de degradación del TBT en el sedimento, dibutil- y monobutil estaño (DBT y MBT respectivamente), da idea del tiempo o la historia de la introducción del TBT en el sedimento.

La ría de Pontevedra es una de las rías gallegas con niveles más altos de contaminación tanto microbiológica como química (organoclorados, pesticidas y metales pesados). La causa de este problema está en las industrias y núcleos de población existentes en la zona que vierten sus residuos al agua de la ría, unido a la actividad marítima derivada del puerto de Marín. En toda la ría de Pontevedra existe una gran tradición marisquera albergando sus aguas el 10% del total de los viveros flotantes (bateas) de Galicia.

En una Tesis Doctoral presentada en septiembre del 2001 por Rosa Anllo (31) realizada en el Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología de la Universidad de Santiago de Compostela se llevó a cabo un estudio para determinar los niveles de compuestos butilados de estaño en muestras de agua y sedimentos a lo largo de toda la ría de Pontevedra (Figuras 26 y 27).

El análisis de los datos nos permite realizar un estudio de la distribución del total de los tres compuestos a lo largo de la ría. En cuanto a los sedimentos, la parte interna de la ría es la que presenta las concentraciones más altas de organoestánicos, especialmente en los alrededores del islote de Tambo destacan las inmediaciones del puerto de Marín con una concentración total de 2.69 $\mu$ g/g en Sn. El intenso tráfico marítimo del puerto de la ciudad, más los trabajos derivados de su astillero unido con una pobre renovación de las aguas propician la adsorción de estos compuestos en los sedimentos.

A lo largo del eje central de la ría se puede establecer un gradiente de concentraciones negativo desde el estuario al océano. Esta disminución progresiva de la concentración hacia mar abierto señala a las pinturas antiincrustaciones de los barcos como fuente principal de introducción de los compuestos en el medio marino. Las islas Ons situadas en la entrada de la ría forman una barrera natural contra las corrientes y el oleaje. Esto se refleja en un aumento de la concentración de organoestánicos en sedimentos en las zonas protegidas por las islas. En zonas ya próximas a mar abierto, ninguno de los tres

compuestos fue detectado en los sedimentos. Las altas velocidades de corriente hacen muy difícil el paso de los compuestos de la columna de agua al sedimento. La ría de Aldán situada en la margen sur de la ría presenta altas concentraciones favorecidas probablemente por un descenso en la velocidad de la corriente y la corriente y la naturaleza del sedimento de la zona (fango con arena) que propicia la adsorción de TBT, DBT y MBT. La ensenada de Bueu presenta también valores más altos de los esperados, probablemente reflejo de la actividad del puerto pesquero de Bueu.

En toda la ría se puede observar un gradiente positivo de concentraciones desde la margen norte a la sur. El aporte de los vertidos urbanos e industriales arrastrados por el río hacia la orilla sur es una de las causas de la mayor contaminación de ese lado de la ría. Otro hecho que apoya la existencia de esta contaminación diferencial es la naturaleza del sedimento, arenoso y de mayor tamaño en la margen norte que en la sur. El oleaje que consigue traspasar la barrera de las islas Ons afecta más a la orilla norte. La fuerza de la marea sumada a la circulación interna del agua de la ría en el sentido de las agujas del reloj, propician el depósito de los contaminantes en el sedimento de la margen derecha.

El porcentaje de TBT en el total de los compuestos butilados presentes en el sedimento es un indicador del grado de degradación de este compuesto. Los porcentajes de TBT calculados van desde un 23.7 hasta un 85.0% con un valor medio del 57.8% y una desviación estándar del 17.9%. Los valores mayores corresponden a las tres zonas de mayor contaminación (costa de Marín, ensenada de Bueu y ría de Aldán). Estos porcentajes de TBT indican una introducción reciente del tóxico al medio marino. En cuanto a las muestras de agua, la mayor concentración se localiza frente al puerto de Marín con valores muy superiores a los 20 ng/l valor "medioambientalmente aceptable" recogido

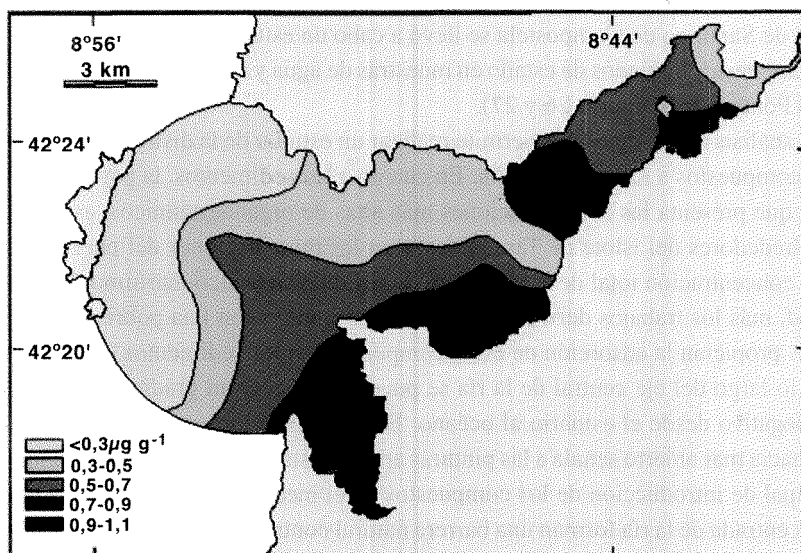


Figura 26. Distribución del TBT en sedimentos en la ría de Pontevedra.

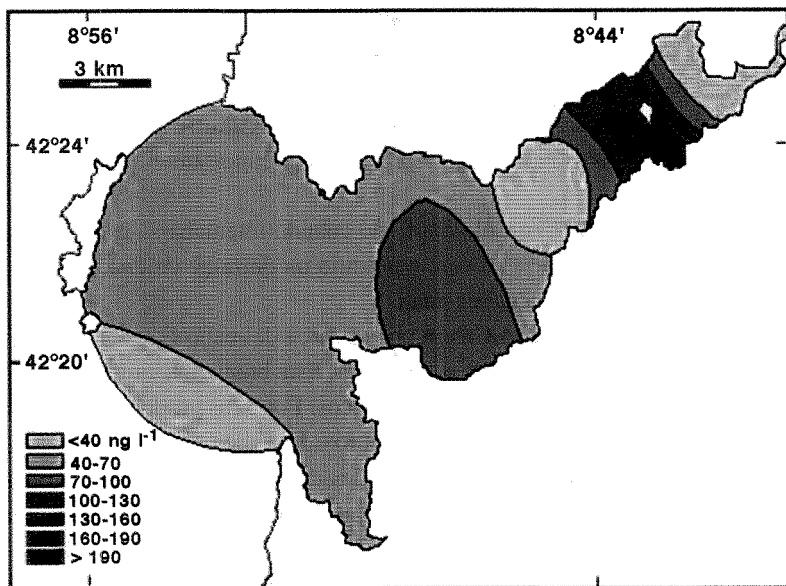


Figura 27. Distribución de TBT en agua en la ría de Pontevedra

por la legislación. Al igual que en el caso de los sedimentos la concentración de TBT aumenta a medida que nos desplazamos desde la boca de la ría al estuario del río Lézrez.

Como ya se ha mencionado anteriormente en toda la zona estudiada existe una gran tradición pesquera y marisquera (la ría alberga el 10% de los viveros flotantes). Entre las especies extraídas se encuentran todo tipo de moluscos bivalvos como almeja, berberecho, mejillón, navaja, ostra y vieira entre otros. Está bien demostrada la toxicidad del TBT en este tipo de organismos. La actividad marisquera de la comarca se centra principalmente en la orilla sur de la ría, a 2 Km de Marín. Las altas concentraciones de TBT encontradas en esa zona exceden mucho los niveles considerados tóxicos para este tipo de organismos, lo que puede suponer un peligro para estos cultivos de gran importancia económica para la zona.

### Mareas negras

Se estima que en la actualidad existen unos 6000 petroleros navegando en aguas internacionales y dado que España se encuentra en una posición de paso entre los grandes productores de petróleo de Oriente Próximo y los consumidores europeos, el número de barcos que pasan cerca de nuestras costas, particularmente bordeando la Costa de la Muerte, es muy alto, por lo que el riesgo de que se produzcan accidentes es elevado. Estos petroleros provocan que se viertan al mar millones de toneladas de residuos marinos de las que solamente del orden de un 10% son debidas a accidentes, la limpieza de los tanques y otras razones de carácter voluntario causan el resto.

Los accidentes marítimos más significativos y recientes que se produjeron en nuestras costas y que supusieron un importante problema de contaminación aguda han sido los siguientes.

En el año 1943 un petrolero alemán llamado **Nord Atlantic** conocido popularmente como “el barco del Gas” se accidentó y provocó una importante marea negra en la ría de Camariñas y Muxía.

En 1976 el petrolero **Urquiola** naufragó cuando intentaba salir de la bahía de A Coruña tras haber tocado fondo una vez, y produjo un derrame de decenas de miles de toneladas de petróleo crudo de alta densidad.

En 1987 el buque panameño **Casón** choco cerca del cabo Finisterre originándose un incendio a bordo y perdiendo parte de su carga. Este buque iba cargado de productos químicos, muchos de ellos peligrosos y muy tóxicos. Entre los productos que transportaba cabe destacar ácidos sulfúrico y fosfórico, hidróxido sódico (sosa) y sodio que en contacto con el agua produjo importantes explosiones en el barco, y una larga lista de productos orgánicos tales como: formalina, ortocresol, anhídrido ftálico, diisocianato de difenil metano, xileno, ciclohexano, butanoles, e metilbuteno, aerosoles, pinturas, adhesivos, resinas, etc. La combustión de muchos de estos productos originó una nube tóxica que produjo la alarma de la población de la zona.

En 1992 un nuevo petrolero llamado **Mar Egeo** naufragó cuando realizaba maniobras para entrar en A Coruña, además de producirse el derrame de gran parte de su carga, 80.000 toneladas de crudo, parte de esta se incendió originándose una gran marea negra que pudo ser detectada por el satélite ERS-1 de la Agencia Espacial Europea lanzado en 1991. Un año después el 8 de febrero de 1993 el mismo satélite volvió a procesar imágenes de la zona y todavía se observaban los restos de la marea negra.

Al hablar de la problemática ambiental causada por las mareas negras debemos distinguir por un lado el problema de la contaminación aguda producida por el crudo derramado, que evidentemente produce la muerte de muchos animales marinos y de muchas aves en un corto espacio de tiempo; y el problema de contaminación persistente a largo plazo debido a la presencia de diferentes hidrocarburos alifáticos ó aromáticos derivados del petróleo derramado y los hidrocarburos derivados del petróleo quemado, hidrocarburos pirolíticos. Para disminuir los efectos de la contaminación aguda se dispone hoy en día de numerosas medidas anticontaminantes que permiten realizar la recogida del crudo o en su caso la dispersión del mismo para evitar que este se adhiera a las rocas y organismos, sin embargo la recogida del crudo no siempre es posible ya sea por las malas condiciones meteorológicas que suelen acompañar a cualquier catastrófe ó bien al incendio que suele producirse en muchas ocasiones. Los problemas mas importantes se presentan en las contaminación a largo plazo. Así por ejemplo de la última marea negra producida por el Mar Egeo todavía hoy en día se siguen observando problemas en los moluscos de la zona. En investigaciones realizadas por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Barcelona, se concluye que los hidrocarburos originales del petróleo, o petrogénicos, habían reducido sus niveles en los diferentes medios a los niveles de fondo

a los seis meses del derrame, sin embargo, los hidrocarburos originados en la combustión del petróleo persistieron durante mucho más tiempo. (32,33,34). Por otra parte aunque los niveles de los hidrocarburos lleguen a sus valores de fondo se observan todavía hoy efectos sobre los moluscos de la zona, especialmente en mejillones, en los cuales se observan alteraciones en diferentes procesos enzimáticos que son una medida del estrés ambiental en el que viven los citados organismos.

Los efectos de un vertido, por tanto, pueden proseguir incluso una vez desaparecida la fuente de contaminación siendo por ello preciso establecer sistemas de vigilancia a largo plazo de las zonas contaminadas.

## 2. La contaminación de las aguas subterráneas

El estudio de las aguas subterráneas en Galicia tiene una gran importancia debido al elevado número de fuentes, manantiales y captaciones existentes. Es prácticamente imposible conocer el número de fuentes naturales, debido a la variabilidad del terreno y además es igualmente difícil realizar estimaciones sobre el número total de captaciones existentes. El Instituto Tecnológico y Geominero de España, I.T.G.E. en 1990 estimaba que la cifra no debe ser inferior a 300.000, lo que significa un pozo por hectárea (o bien un pozo por cada 9,2 habitantes). Esta gran abundancia de pozos ó afloramientos se puede explicar por tres razones. En primer lugar la gran dispersión de la población gallega unida al alto coste de obras e infraestructuras de abastecimiento obliga a que una buena parte de la población obtenga individualmente el agua subterránea para su uso. La segunda causa es el minifundismo y los usos agrícolas y ganaderos del campo que hacen necesario el poder disponer de agua, surgiendo por lo tanto una densa red de captaciones no cumpliéndose en muchos casos las distancias mínimas requeridas entre las captaciones. La última causa es la relativa facilidad y economía con la que en Galicia se puede acceder a las aguas subterráneas. Esto puede llevarnos a pensar que en Galicia el agua subterránea es un recurso inagotable y que además se encuentra homogeneamente repartida, pero esta afirmación es totalmente falsa. El substrato gallego presenta una grave problemática hidrogeológica, puesto que las rocas cristalinas que lo forman son prácticamente impermeables y dificultan la infiltración o almacenamiento y la transmisión del agua.

Probablemente debido a las pocas expectativas que siempre tuvo el substrato gallego los estudios hidrogeológicos en Galicia son mas bien escasos. Así el I.G.T.E. hasta el año 1990 apenas realizó una decena de trabajos, siendo además la mayoría de ellos de carácter muy local. En 1982, desarrollo un estudio titulado “**Investigación hidrogeológica básica de Galicia**” en el que se ofrece por primera vez una panorámica de las aguas subterráneas incluyendo un inventario de las captaciones con algunos análisis químicos básicos. (35).

El siguiente gran estudio regional fue realizado en 1990 titulado “**Proyecto del Plan hidrogeológico de las cuencas de Galicia-costa**”, que dentro del Plan Hidrológico Nacional realizó la COTOP a través de dos empresas consultoras EPTISA e IDASA(36).

En el se describen todas las cuencas hidrográficas gallegas estudiándose la problemática de sus recursos, demandas, calidad de aguas, vertidos, etc.

En 1989-1990 la empresa consultora INYSA por encargo de la Xunta de Galicia realizó un estudio sobre **“Estudio sobre infraestructuras sanitarias-abastecimiento y saneamiento de las cuencas intercomunitarias, 1ª fase”**. En este estudio se analizó el estado de conservación y operatividad de las infraestructuras de abastecimiento y saneamiento del agua para los núcleos de población con mas de 500 habitantes(37).

Por último destacar también **“El estudio de recursos de agua subterránea de Galicia”** efectuado por la COTOP en colaboración con ITGE y que realizaron las empresas EPTISA e IDASA en 1991. Este informe sintetiza los estudios hidrogeológicos realizados hasta entonces y amplía el inventario y análisis químico iniciado en 1982. Se cartografían las principales unidades hidrogeológicas, se delimitan las zonas de mayor interés y se propone soluciones para municipios con problemas de abastecimiento (38).

Sin embargo, a pesar de todos estos estudios debemos decir que el conocimiento actual de los recursos subterráneos en Galicia es aún muy insuficiente, por las pocas investigaciones orientadas a evaluar las principales características hidrogeológicas de los materiales que componen el substrato y en particular de las tasas de infiltración eficaz y de las posibles variaciones.

Lo que si podemos concluir de estos estudios es que Galicia presenta graves inconvenientes para la instalación de grandes acuíferos debido a las características del terreno, ya que el agua subterránea se acumula principalmente en zonas muy concretas de los macizos cristalinos con una elevada porosidad secundaria debida a los procesos de fracturación, meteorización y disolución; o bien en depósitos de porosidad intergranular. En resumen en Galicia disponemos de un gran número de acuíferos heterogéneos que cambian constantemente, en lo que se refiere a extensión, potencia, permeabilidad, posibilidad de recarga, etc, y realmente solo tienen 2 grandes unidades hidrogeológicas de importancia que son la cuenca de Xinzo de Limia y el Aluvial del bajo Miño.

En cuanto a la composición química de las aguas subterráneas, de los estudios del ITGE en 1982 y de EPTISA e IDASA en 1991 se puede concluir que la composición predominante de las aguas son aguas cloruradas sódicas con bajas concentraciones de iones disueltos y algo ácidas. Las aguas del interior presentan una mayor proporción de iones bicarbonato y calcio con un pH alcalino. Las primeras corresponden a zonas de terrenos graníticos, y las segundas a zonas con rocas carbonatadas.

No hay muchos datos acerca de la posible contaminación antropogénica de las aguas subterráneas en Galicia, y aunque en líneas generales podemos decir que la calidad de las aguas es buena, empiezan a observarse algunos problemas de contaminación relativos a compuestos tales como nitratos, nitritos y amonio, procedentes por una parte de las redes de saneamiento de las ciudades y por otra del uso intensivo de fertilizantes en la agricultura. No hay sin embargo datos acerca de los pesticidas, herbicidas etc, compuestos químicos utilizados ampliamente en la agricultura y cuyo uso no es controlado en absoluto por la administración correspondiente. Es por ello de esperar que en la actuali-

dad existan problemas de contaminación por este tipo de compuestos en las aguas subterráneas (39).

Por otra parte en algunas zonas como en el entorno de A Lanzada, O Grove, la ría de Arousa, y Ribadeo se detectan casos de intrusión marina, y no se descarta la presencia en otras zonas costeras debido al elevado número de caudales explotados principalmente en la época estival.

En cuanto a la contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas los primeros estudios datan del año 1988 (40 y 41) y han sido realizados en zonas muy limitadas. El primero es en las proximidades de Santiago y el segundo en las de Vigo. Posteriormente en 1991 (42) se realiza otro estudio en los alrededores de Ferrol. Sin tener en cuenta las diferencias metodológicas de los 3 trabajos, se deduce de ellos que aproximadamente un 75% de las aguas de pozos particulares no es apta para el consumo humano directo. Esta proporción fue inferior en las fuentes públicas, aunque prácticamente la mitad de ellas no eran potables. Esta contaminación es debida a los pozos negros, fosas sépticas, cortes o al estiércol orgánico empleado en la fertilización de las tierras.

Para confirmar estos datos en 1989 el laboratorio de Microbiología del Instituto de Investigación y Análisis Alimentario de la USC (42) realizó un estudio cuyo objetivo era estimar la salubridad de las aguas subterráneas para el consumo humano en las zonas rurales. Se estudiaron 255 pozos y 184 manantiales entre 1989-1992. De los resultados de este trabajo se demostró que solo un 23% de las muestras analizadas eran aptas para el consumo humano. Otros datos importantes obtenidos si se comparan estos resultados con resultados anteriores, es que la contaminación microbiológica no solo no disminuye con el tiempo, sino que ha aumentado en ese período, y que además no es un problema local sino que se extiende a todas las aguas subterráneas de Galicia. Es más la proporción de fuentes de agua subterránea no potable puede llegar al 90% en zonas de alta actividad agrícola-ganadera tal como puso de manifiesto en un estudio de 88 muestras de agua de pozos y manantiales en una zona bien delimitada(43).

De todos estos estudios se puede concluir que la disponibilidad del agua subterránea para el consumo en Galicia es baja, lo cual no es sorprendente, ya que como es sabido en la mayor parte de las zonas rurales la evacuación de los residuos fecales se realiza en fosas sépticas que están al lado de las viviendas y por lo tanto próximas a pozos. Además en pequeñas explotaciones la mayoría de los establos están al lado de las viviendas familiares y la fertilización de los campos se realiza con estiércol de origen animal.

### **3. La contaminación de las aguas superficiales**

El agua es el disolvente universal por excelencia, por ello puede contener gran cantidad de sustancias disueltas, tanto sustancias naturales, como sustancias con origen antropogénico. La composición química de una agua dulce depende del terreno por el cual circula, del grado de actividad biológica presente en ella y por último de las actividades humanas. Las sustancias presentes en el agua pueden clasificarse de varias formas,

siendo una de ellas en función de las concentraciones relativas de las diferentes sustancias. En este sentido podemos hablar de:

- a) **Constituyentes mayoritarios ó principales**, que son aquellos que presentan concentraciones mayores de 10 mg/l. Dentro de este grupo se encuentran fundamentalmente los iones calcio, magnesio, sodio, bicarbonato, sulfato, cloruro y sílice. El contenido y proporción de estos componentes depende básicamente del curso del río, es decir de la composición química de las rocas y suelos.
- b) **Constituyentes minoritarios**, aquellos que presentan concentraciones comprendidas entre 10-0,01 mg/l
- c) **Constituyentes traza**, aquellos con concentraciones menores de 0,01 mg/l

Todas estas sustancias presentes en el agua pueden estar en diversas formas químicas, en forma de moléculas, de iones simples, iones complejos, pares iónicos etc, pudiendo estar además en forma de disolución, o bien como sustancias insolubles en materia en suspensión.

Una de las fuentes de información de las que se dispone en la actualidad para el estudio de la calidad de las aguas de los ríos de Galicia son los datos obtenidos por la Dirección General de Obras Hidráulicas, a través de la Red de Control de Calidad de las aguas. Hasta el año 1987 esta red estaba constituida por:

**Red básica**, controlada por la Dirección General de Obras Hidráulicas (MOPU), en cuyas 12 estaciones se realizaba un estudio mensual de los ríos: Eo, mero, Tambre, Ulla, Umia, Miño, Sil, Cúa, Cabreira y Cabe.

**Red complementaria**, controlada por la Confederación Hidrográfica del Norte de España, y que constiutye una red de aforos en la que también se realizaban análisis mensuales.

En 1984 las competencias sobre obras hidráulicas fueron asumidas por la ley8/1984 de 10 de julio y por el Real Decreto 1970/85 de 11 de septiembre, en lo relativo a las funciones y servicios en materia de agua, saneamiento, canalización y defensa de márgenes. El 14 de febrero de 1987 se promulgo el Decreto 16/1987 que describía lo que debiera recoger el Plan Hidrológico de las cuencas intracomunitarias de Galicia, incluyendo esta planificación hidrológica dentro de la ley de aguas. Según esta ley en la actualidad Galicia esta dividida en 2 zonas con características distintas:

**Galicia costa**, formada por todas las cuencas hidrográficas de los ríos que circulan íntegramente por Galicia, es decir todos los ríos comprendidos entre el Eo y el Miño. En estos ríos la Comunidad Autónoma tiene todas las competencias en materia hidrológica iniciando en 1990 el mantenimiento de esta red.

**Galicia interior**, formada por las cuencas del Navia, Eo, Miño-Sil, y todas las cuencas mas al sur del Miño. Son cuencas en las que el MOPU y la Confederación Hidrográfica tienen aún competencias, y por lo tanto se mantiene en ella una red básica de vigilancia.

A parte de la información obtenida a partir de la Red de vigilancia de la Dirección de Obras Hidráulicas, existe una importante cantidad de información obtenida en estudios parciales realizados por diferentes grupos de investigación de las tres Universidades Gallegas y en menor medida por el C.S.I.C. que estudian parámetros no contemplados en los estudios básicos.

El estudio de los parámetros físico-químicos de las aguas superficiales gallegas más amplio ha sido realizado por el Departamento de Química Física de la Universidad de Santiago de Compostela. Los parámetros estudiados han sido el pH, conductividad, cloruros, sulfato, sílice, calcio y magnesio, dureza, sodio y potasio, alcalinidad, amonio, nitritos y nitratos, fosfatos, materia orgánica, oxígeno disuelto, bromuros y fluoruros y metales pesados tales como cobre, zinc, cadmio, níquel, plomo y hierro. El primer estudio se realizó en 1989 en 3 períodos diferentes y en 147 estaciones repartidas entre las 30 cuencas estudiadas. Se analizaron en total 453 muestras determinándose en cada una de ellas 33 parámetros, lo que permite obtener un volumen de información de 15.00 datos. En 1993 se realizó un nuevo estudio con dos muestreos uno de los cuales incluía el estudio de índices biológicos. Se estudiaron 93 estaciones en cada una de las cuales se determinaron 24 parámetros, eligiendo aquellos que permiten definir la calidad de un agua y su clasificación de acuerdo con los criterios de la CEE (44).

De las diferentes directivas de la CEE la que tiene un mayor interés es la relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable, directiva 75/440/CEE, 16 de julio 1975, según la cual se clasifican las aguas en tres categorías, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub> según el tipo de tratamiento a que deben ser sometidas las aguas para ser consideradas aptas para el consumo humano. Para cada categoría existe un nivel mínimo y un nivel máximo para cada parámetro y cuando algún parámetro supera el nivel permitido correspondiente a una categoría, el agua debe ser clasificada en la categoría superior. Se añade entonces la categoría A<sub>4</sub> para aquellas aguas en las que se superan algún parámetro establecido para las aguas de categoría A<sub>3</sub>.

La comparación de los resultados obtenidos con los establecidos en la normativa permite elaborar mapas de calidad que nos dan una visión de conjunto de la calidad de las aguas de las cuencas de la Galicia Costa. Este mapa se puede ver en la figura 28.

En lo que se refiere a las cuencas interautonómicas, se pueden ver los datos en el mapa de la figura 29.

Los puntos conflictivos más importantes son la cuenca del Miño a su paso por la ciudad de Lugo, mostrando un gran aumento en la concentración de nitritos, amonio, fosfatos y materia orgánica, presentando además el análisis microbiológico niveles de coliformes fecales mayores a los permitidos por la legislación vigente. En Portomarín y en la ciudad de Orense, la calidad del agua del río Miño empeora pero se mantiene siempre dentro del margen de calidad de agua aceptable. Los afluentes del Miño, río rato, Barboña y Louro presentan altos niveles de contaminación.

En la cuenca del Sil los vertidos urbanos e industriales de Ponferrada provocan una importante contaminación aunque esta se diluye posteriormente con las aguas de los ríos

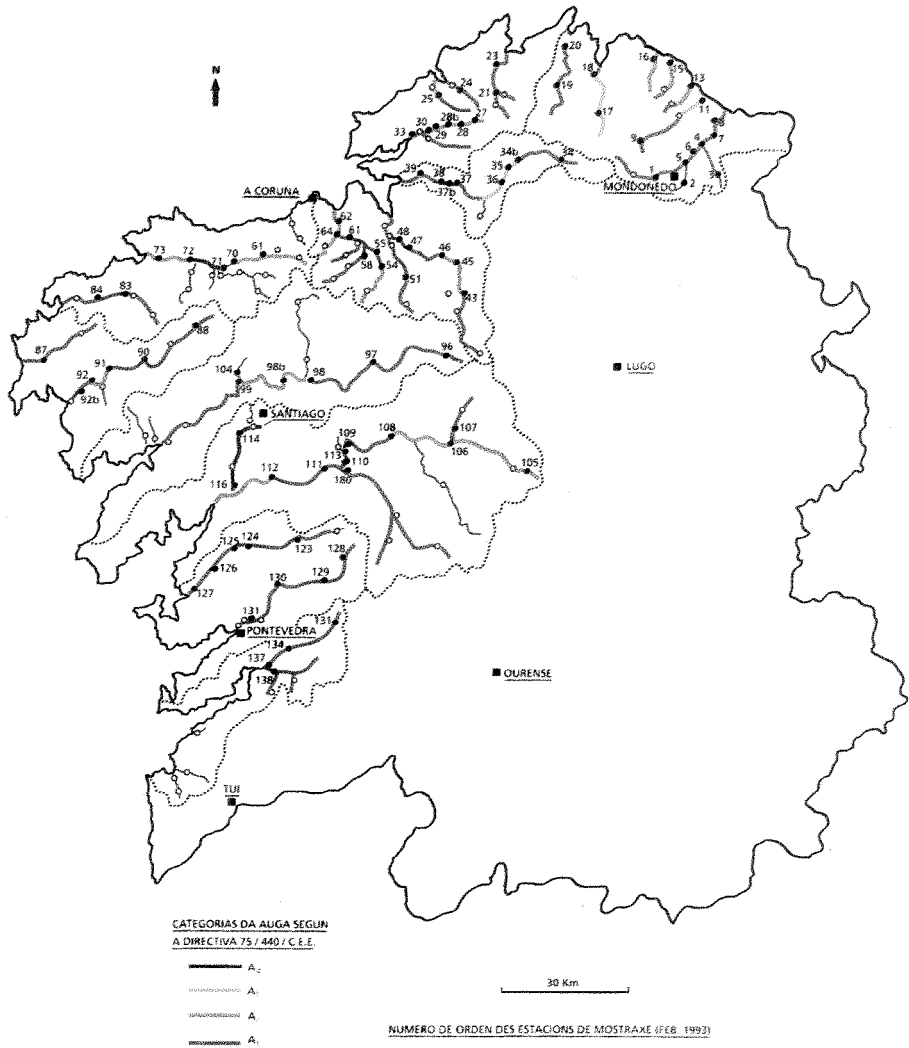


Figura 28. Mapa de calidad de las aguas de las cuencas de Galicia-costa, datos de febrero de 1993.

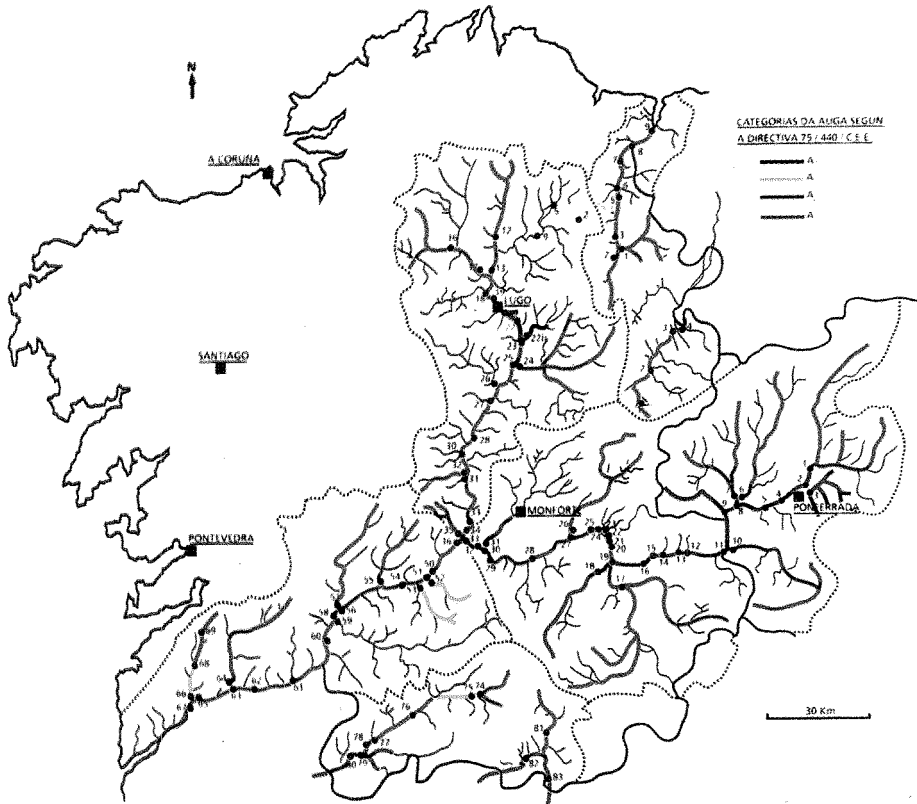


Figura 29. Mapa de calidad de las aguas de las cuencas interautonómicas, datos de febrero de 1993

Lúa y Burbia. Por último las cuencas del Limia a su paso por Xinzo de Limia y los del Támega a su paso por Verín presentan fuerte contaminación debida a los vertidos urbanos.

Estos estudios continúan realizándose de manera ininterrumpida desde 1990 estudiando una red con 180 puntos de muestreo y realizando dos muestreos al año uno en primavera y otro en otoño.

### *Contaminación microbiológica*

La contaminación microbiológica de las aguas procedente de los residuos orgánicos de origen animal constituye un problema importante desde el punto de vista sanitario. Esta puede alcanzar las aguas naturales procedentes de las aguas residuales de origen doméstico o industrial y de las aguas de escorrentía, a través de las cuales llega una gran mayoría de microorganismos patógenos responsables de enfermedades transmitidas por el agua. En el estado natural de las aguas existen microorganismos de muchos tipos que no son perjudiciales para la salud, pero además existe otro gran grupo que llamamos microorganismos patógenos ó potencialmente patógenos que si son peligrosos para la salud, y cuyo control es imprescindible en las aguas superficiales destinadas al consumo humano. Dado que no es posible la implantación de análisis rutinarios para la detección de todos los microorganismos patógenos, los sistemas de control se basan en la detección de determinados organismos o grupos de organismos denominados indicadores de contaminación fecal y por tanto de la posible existencia de patógenos. Los indicadores que mas se emplean son los coliformes, estos organismos consisten en varios géneros de bacterias pertenecientes a la familia Enterobacteraceae y se definen según la técnica empleada para su numeración. Entre los coliformes cabe distinguir entre coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia Coli*, siendo los dos primeros los que se utilizan mas para el control bacteriológico del agua.

Los primeros datos de contaminación microbiológica fueron obtenidos en los ríos Sar y Sarela en 1976 (45) y posteriormente en el mismo lugar en 1981(46), encontrándose en ambos casos altas concentraciones de coliformes totales a pesar de que las aguas son sometidas a un proceso de depuración. En 1978, se realiza un estudio sobre el río Lagares (47) encontrando también altos niveles de contaminación. En 1983 y 1984 realizaron nuevos estudios sobre el río Sar confirmando los resultados de estudios anteriores concluyendo que en algunos tramos el río no es apto para el baño y en algunas zonas especialmente entre Santiago y Bertamirans y después de Padrón el nivel de contaminación es tan grande que lo hace no apto para el riego, ni por supuesto para el abastecimiento de agua potable, siendo los vertidos urbanos de Santiago, Bertamirans y Padrón los responsables de esta situación (46,48). Estudios similares realizados en el río Miño en 1988 (50-51) encontraron también un alto nivel de contaminación fecal.

En 1984 la Consellería de Sanidad realizó un estudio para conocer la calidad Sanitaria de las aguas de consumo público y se encontraron importantes deficiencias en la potabilización de muchos núcleos de población pequeños y medianos, y en determinados casos hasta ausencia de cloración. Cinco años mas tarde, en 1989 se realizó otro estu-

dio y se observó que durante ese período la calidad de las aguas no había mejorado. Con el fin de tener un mejor conocimiento de las aguas potables esta Consellería realizó un programa que titulado **“Programa de control y vigilancia sanitaria de las aguas de consumo público”** se desarrolló entre 1989-1992. Este programa se dividió en 5 subprogramas:

**Subprograma I.** Inspección sanitaria de los abastecimientos, plantas potabilizadoras y redes de distribución de las aguas de consumo público.

**Subprograma II.** Control sanitario de cloración de las aguas.

**Subprograma III.** Calidad sanitaria de las aguas de consumo público de Galicia: controles analíticos.

**Subprograma IV.** Investigación de los niveles de plomo.

**Subprograma V.** Registro de fuentes de agua pública de Galicia. Nuevas plantas potabilizadoras y empresas gestoras de aguas.

**Subprograma complementario VI.** Educación sanitaria, formación, actualización y perfeccionamiento

Dentro de este programa cabe destacar los siguientes aspectos recogidos en tres convenios realizados con el Departamento de Microbiología y Parasitología y el Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología ambos de la Universidad de Santiago de Compostela.

**“Indicadores bacteriológicos en aguas de consumo de la Comunidad Autónoma de Galicia”.** Los resultados de este estudio indican que el 30% de las 50 muestras de agua potable analizadas en este trabajo pertenecientes a 49 poblaciones de Galicia, fueron calificadas como no potables; 12 muestras equivalentes a un 24% se consideraron como sanitariamente permisibles y solo un 23% reunían las condiciones bacteriológicas de potabilidad exigidas en la legislación. El mayor número de muestras no potables aparecía en la provincia de Lugo, 54,5%, después en Ourense, un 30%, un 21,4 % en A Coruña y un 20% en Pontevedra.

**“Estudio de plaguicidas organoclorados, PCP, carbaril y PCB’s en agua de consumo de la Comunidad Autónoma de Galicia”.** Los niveles de plaguicidas organoclorados, entendiendo como tales los residuos de lindano, heptaclor, aldrin, heptacloropóxido, dieldrin, endrin, o’PDDT, p’PDDT, p’PDDE, y metoxiclor sobrepasan los límites legales en 8 localidades, 4 en la provincia de A Coruña, 1 en Orense y Lugo y 2 en Pontevedra. Los niveles del PCP sobrepasan los límites en 4 ayuntamientos y los de carbamatos en 5. Es de destacar que no se detectaron PCB’s en ninguna de las muestras analizadas.

**“Estudio de microcontaminantes inorgánicos y de plomo en las aguas de consumo público y superficiales de la Comunidad Autónoma de Galicia”.** En este convenio se estudiaron los niveles de metales tales como el hierro, cobre y cinc que son componentes normales de las aguas, y metales tales como plomo, cromo, cadmio, níquel y mercurio que son componentes tóxicos. En total se estudiaron 52 poblaciones, y se realizaron 3 campañas diferentes analizándose un total de 1116 muestras sobre las que se rea-

lizaron 7812 determinaciones de metales. Los niveles de cobre, zinc, níquel y cromo estuvieron siempre por debajo de los niveles permitidos por la legislación vigente. El hierro esta por encima de los niveles guía en 25 puntos, y el plomo y el cadmio aunque en general están por debajo hay algunos puntos concretos en los que existe un importante problema de contaminación sobre todo para el caso del plomo.

El problema de la contaminación por plomo ya había sido observado por A. Bermejo en 1980 (53) siendo debido en muchos casos por el uso de las tuberías de plomo para la conducción, ya que debido al carácter ácido y agresivo de nuestras aguas provoca su fácil liberación. La posterior sustitución de este tipo de tuberías por tuberías de cobre o de PVC ha disminuido de manera importante este problema, aunque en el año 1992 todavía existían problemas puntuales de contaminación por este metal.

A finales de 1992 la Consellería de Ordenación del Territorio y Obras Públicas publicó un informe sobre los niveles microbiológicos de diferentes ríos que vierten sus aguas a las rías de Viveiro, O Barqueiro, Ares-Betanzos, Cedeira, Ortigueira, A Coruña, Arousa, Pontevedra y Vigo. Las conclusiones generales fueron que los ríos que desembocan en Viveiro y O Barqueiro vierten aguas de buena calidad, excepto en puntos concretos. Sin embargo, los ríos Eume, Mandeo y Mondeo que vierten en la ría de Ares-Betanzos presentan alta contaminación bacteriana en todo su recorrido, igual que los que vierten en la ría de Cedeira y Ortigueira. Altos niveles de contaminación se detectan en los ríos Mero y Valiñas que desembocan en la ría de A Coruña, mientras que los ríos Ulla y Umia que desembocan en la ría de Arousa llevan aguas de buena calidad excepto en su tramo final.

El estudio global de los datos de contaminación bacteriológica de las aguas superficiales permite deducir que en primer lugar el nivel de contaminación de las aguas superficiales de Galicia, aunque es variable entre los diferentes ríos estudiados, en general se puede decir que es bastante alta. En algunos ríos que reciben aguas residuales de núcleos de población importantes pueden llegar a tener niveles de contaminación tan altos que imposibiliten su uso para abastecimiento público aunque se sometan a tratamientos mas completos. Por otra parte, puede deducirse también, que la calidad del agua empeora hacia la desembocadura a medida que se incorporan residuos urbanos e industriales.

Los informes presentados en 1990 por la Consellería de Ordenación del territorio y Obras Públicas sobre el estado de saneamiento de las cuencas de Galicia costa e intercomunitarias indicaban que entre un 85% de la población en el primer caso y un 80% en el segundo vierten sus residuos fecales sin ningún tipo de tratamiento o con un tratamiento poco efectivo; siendo este fenómeno mas acusado cuanto mas pequeño sea el núcleo de población. Por ello no es sorprendente que se detecte contaminación fecal en aguas superficiales ya que la mayor parte de los núcleos de población de Galicia están formados por pocos habitantes y a la vez dispersos.

## LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

“El suelo es uno de los bienes más preciosos de la Humanidad. Permite la vida de los vegetales, de los animales y del hombre. Es un recurso limitado que se destruye fácilmente; por ello debe ser protegido contra la erosión y la contaminación” (Principio 1,2,5 y 6 de la *Carta Europea de los Suelos* aprobada por el Consejo de Europa en junio de 1972).

El suelo es un medio receptivo por excelencia, ya que interacciona químicamente con la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera, y además recibe el impacto de los seres vivos, que pueden alterar los equilibrios que existen en el mismo. Sin embargo, debemos destacar que el suelo posee una gran capacidad de autodepuración, principalmente en su superficie. Esto le permite asimilar una cierta cantidad de contaminantes. Esta capacidad autodepuradora se basa en:

- 1) una amplia actividad biológica que hace posible la descomposición parcial o total de la materia orgánica
- 2) una actividad química que desencadena una serie de reacciones químicas de hidrólisis, oxidación-reducción etc,
- 3) una capacidad de filtración que retiene contaminantes por procesos de adsorción e intercambio iónico.

Los contaminantes del suelo se pueden clasificar en dos grupos: **contaminantes endógenos**, si provienen del mismo suelo y **contaminantes exógenos** si son externos al mismo. Un ejemplo de contaminación endógena se produce como consecuencia de la lluvia ácida sobre determinados suelos de tipo arcilloso, provocando la movilización de iones aluminio,  $Al^{3+}$ , debido a la capacidad intercambiadora de estos tipos de suelo, produciendo efectos tóxicos para la vegetación y aumentando los niveles de aluminio (elemento tóxico para el hombre) en las aguas potables. Los contaminantes exógenos se producen por la acumulación de residuos, o por el uso abusivo de productos químicos en las prácticas agrícolas.

En la segunda mitad del siglo XX la producción agrícola ha aumentado considerablemente, a pesar de que ha disminuido la superficie dedicada al cultivo. Si ello ha representado un indudable beneficio, debido básicamente a la introducción de nueva maquinaria y a la aplicación de fertilizantes inorgánicos y de pesticidas químicos, ha provocado por otra parte nuevos problemas ambientales relacionados especialmente con la eliminación de residuos orgánicos y el uso de productos químicos.

### 1. Los fertilizantes

Los fertilizantes contienen nitrógeno, fósforo y potasio bien por separado, o en productos formados por mezclas de dichos elementos, estos han sustituido mayoritariamente al clásico abonado con estiércol, ya que proporcionan los nutrientes antes citados en

forma fácilmente utilizable. Pero así como cuando estos elementos se encuentran en el humus pasan al suelo muy lentamente y son absorbidos por las plantas, lo abonos inorgánicos principalmente el nitrato, cuando se añaden en grandes cantidades sobre suelos húmedos y en época de lluvias son lixiviados del suelo y pasan a contaminar las aguas. El problema ambiental más grave lo origina el exceso de nitratos utilizados ya que los fosfatos forman compuestos insolubles con iones como el Fe(III) y Al(III) en medio ácido y con Ca(II) en medio alcalino; solo existe un estrecho rango de pH (alrededor de 6,5) en el cual el fosfato se mantiene soluble y puede pasar del suelo a las aguas. Sin embargo, las sales de nitrato son muy solubles, con lo que la posibilidad de que se produzca la lixiviación de los mismos es alta. Por otra parte se debe tener en cuenta que en el balance de nitratos en el medio los fertilizantes no son las únicas fuentes de nitratos para el suelo. El ciclo del nitrógeno que se encuentra en la figura 4 es un ciclo muy complejo, está constituido por una serie de reacciones químicas, en la mayoría de las cuales intervienen los microorganismos. De todas ellas la desnitrificación (o proceso de reducción del ion nitrato a nitrógeno molecular) es la que produce un retorno de nitrógeno a la atmósfera. Este proceso tiene lugar en varias etapas, en las que se forman los óxidos nítrico y nitroso, NO y N<sub>2</sub>O, como productos intermedios, pudiendo difundirse a través de los poros del suelo a la atmósfera.

El problema ambiental más importante es la acumulación de los nitratos en el subsuelo ya que por lixiviación pueden incorporarse a las aguas subterráneas o bien ser arrastrados hacia los cauces y reservorios superficiales. En estos medios, los nitratos también actúan de fertilizantes de la vegetación acuática, de forma que si existen altas concentraciones puede originarse la *eutrofización* del medio. Esto tiene como consecuencia el rápido desarrollo de algas y de otras plantas verdes que recubren la superficie, originándose un elevado consumo de oxígeno del medio acuático y al mismo tiempo se dificulta la incidencia de la radiación solar, produciéndose una disminución de la capacidad autodepuradora del medio y de la capacidad fotosintética de los organismos vivos acuáticos.

Por último, otro impacto ambiental debido al abuso de los fertilizantes es la generación de óxido nitroso. Este gas es muy estable y se difunde a la atmósfera donde permanece muchos años pudiendo alcanzar las capas altas de la atmósfera e introducirse en la estratosfera. En esta región debido a ciertos procesos fotoquímicos ya comentados, se transforma en óxido nítrico, NO, el cual participa en reacciones de eliminación del ozono estratosférico.

Es preciso sin embargo ir a la reducción de todas las formas de contaminación de los suelos agrícolas para salvaguardar los suministros de agua y alimentos. Es necesario el estudiar los niveles de nutrientes en el suelo para aplicar solamente la cantidad de fertilizante que sea necesaria. Esto incluso conduciría a un ahorro de energía ya que reduciría el consumo innecesario de fertilizantes artificiales. Por otra parte, la adición indiscriminada de abonos no siempre resulta beneficiosa ya que estos pueden contener impurezas tóxicas o resultar ellos mismos perjudiciales. Los fosfatos naturales contienen metales pesados y uranio radioactivo. Las plantas que tienen un exceso de nitrato florecen mal,

con disminución de la productividad de frutos y granos; la acumulación de ácido nitroso en las plantas conduce a la síntesis de nitrosaminas cancerígenas.

## 2. Los pesticidas

Un pesticida es un compuesto químico utilizado para combatir los agentes que constituyen plagas, como hongos, insectos, maleza, etc. Según el tipo de especie que se quiera combatir se distinguen básicamente tres tipos de pesticidas: **insecticidas, fungicidas y herbicidas**. Los pesticidas se han venido usando con intensidad variable desde 1850, a escala local y en cantidades relativamente pequeñas, que en principio no causaron efectos perniciosos detectables. Se utilizaron a menudo productos naturales con principios activos como la nicotina, la piretrina y la rotenona, que aún utilizadas en la actualidad se consideran pesticidas seguros. También usaron compuestos inorgánicos, como el sulfato de cobre y combinaciones con mercurio, plomo, cinc y azufre que producen residuos estables que pueden acumularse en el suelo. No obstante estos productos inorgánicos no se consideró que fuesen contaminantes mayores de suelos y aguas (1). Pero a partir de 1940 el desarrollo de numerosos compuestos orgánicos sintéticos cambió las bases y la operación de control de pesticidas. Con el descubrimiento del diclorodifeniltricloroetano conocido como DDT se llegó a pensar que se había conseguido el completo control de las plagas. Sin lugar a dudas el DDT ayudó a mejorar el rendimiento de las cosechas, así como las condiciones sanitarias de muchos lugares. Pero ya en 1960 se demostró que ningún pesticida es capaz de eliminar completamente a toda la población de una especie responsable de una cierta plaga, por ello se continuaron las investigaciones de desarrollo de nuevos pesticidas para conseguir un control más efectivo. En este sentido cabe señalar que en la actualidad, existen del orden de 100.000 formulaciones distintas que implican 1500 principios activos distintos (54).

Los pesticidas pueden entrar en las plantas de varias maneras. Cuando se rocía el follaje con un insecticida orgánico, algo del compuesto es absorbido por las hojas y puede persistir en ellas cuando es recogida la cosecha para la alimentación animal o humana. Por otra parte, hasta el 50% de lo rociado puede ser arrastrado por las lluvias o riegos y pasar al suelo. Otros productos químicos pueden rociarse directamente sobre el suelo para el control de malas hierbas o de plagas que surgen de él, o ser esparcidos por el mismo como acondicionadores de semillas. De este modo se introducen en los suelos y plantas productos químicos potencialmente contaminantes. Una vez dentro del ecosistema su efecto depende de los subsiguientes cambios que se pueden producir. Algunos pesticidas se describen ya como estables y persistentes, por lo que la cantidad de ellos crecerá en el ecosistema al realizar reiteradas aplicaciones. Otros en cambio no son estables y son biodegradados por los micro-organismos del suelo. Los animales incorporan los pesticidas con su alimento, y algunos permanecen almacenados en órganos o tejidos específicos, como el hígado o el tejido adiposo no siendo excretados, de manera que si la absorción continúa puede llegar a alcanzarse la dosis letal para la especie.

El uso de los pesticidas supuso la aparición de dos importantes problemas. En primer lugar se comprobó que la eliminación de plagas produce inevitablemente cambios que llevan al desequilibrio de los ciclos naturales, y las redes alimentarias dentro de los ecosistemas, así por ejemplo la dura lucha química contra el escarabajo de la patata diezmó la población de golondrinas. Por otra parte, lo que parecía un logro, que era la elevada resistencia de los pesticidas a su destrucción, se convirtió pronto en un arma de doble filo, ya que debido a su persistencia en el ambiente estos productos tienen un amplio espectro de acción bioquímica como tóxicos de plantas y de animales, pudiendo producir cambios en la fertilidad, así como en la acción de hormonas y enzimas.

En el año 1972 aparece la primera prohibición del uso del DDT, después de haberse descubierto su persistencia en el ambiente encontrándose en los pingüinos de la Antártida y comprobando los daños causados a pájaros, mamíferos, insectos, así como la creciente cantidad de DDT encontrada en la grasa humana. Por el relativamente corto espacio de tiempo durante el cual se ha usado el DDT no hay evidencias de las acciones perjudiciales específicas sobre el cuerpo humano, pero sí se ha comprobado su efecto pernicioso a largo plazo sobre mamíferos experimentales. Los pesticidas se han descrito entonces como paliativos a corto término pero con potenciales peligros humanos a largo plazo. Es por lo tanto necesario que en el futuro se reduzcan los tipos y cantidades de pesticidas usados. Las sustancias no selectivas y persistentes deben ser desterradas, debido a que son innegablemente contaminantes con un elevado potencial de toxicidad para el hombre.

Es necesario investigar y vigilar cuidadosamente los efectos de los pesticidas y nunca deben ser usados sin justificación. Los compuestos químicos se deben utilizar solamente si tienen una acción muy específica, si son muy eficaces, si necesitan bajas concentraciones, y un número mínimo de aplicaciones.

En la actualidad el problema más importante es que no existe control ni en la venta ni en la aplicación de los diversos pesticidas que pueden ser adquiridos libremente en cualquier cantidad. La población en general no es consciente del peligro que puede suponer para su propia salud el uso abusivo de pesticidas y menos aún la importante contaminación del suelo y posteriormente de las aguas y de toda la cadena trófica que estos producen.

### 3. Los residuos agrícolas

La tendencia actual a la explotación intensiva de aves y ganados, manteniendo a gran número de animales en ambientes cerrados con temperatura, pienso y condiciones sanitarias controladas, consiguen el rápido engorde, o la máxima producción de huevos, pero a su vez produce una gran cantidad de residuos orgánicos que han de ser acumulados y eliminados. La propia práctica del ensilado (defectuoso) en el verano, da lugar, por acción bacteriana sobre la hierba recién cortada, a grandes volúmenes de efluentes de olor persistente, alto contenido orgánico, y un pH ácido, que pueden dar lugar a numerosos casos de contaminación de suelos y aguas.

En la mayoría de los casos los residuos animales no son tratados antes de su vertido. Lo más usual es esparcirlos sobre el terreno, lo cual parece lógico porque así son devueltos al suelo o reciclados los nutrientes y la materia orgánica que se había tomado del mismo. Sin embargo, los purines pueden contener gran cantidad de agua, nitrógeno, fosfatos y pesticidas orgánicos procedentes de los piensos pudiendo causar contaminación de las aguas. Este tipo de residuos en el futuro también deben ser tratados antes de producirse su vertido. Como ya se puso de manifiesto al hablar de la contaminación de las aguas subterráneas, la contaminación de las mismas es debida principalmente a las prácticas agrícolas.

#### 4. Los residuos domésticos y los vertederos

Los residuos domésticos representan el mayor porcentaje de los originados por las actividades humanas. Hasta hace relativamente poco la gestión de estos residuos no ofrecía ningún problema grave para el entorno. Sin embargo, el aumento de la población urbana, el cambio en los hábitos de consumo y el consiguiente incremento en el ritmo de la generación de residuos ha hecho necesario la búsqueda de métodos que permitan la reducción del volumen de residuos generados.

Cada gallego genera a diario un kilo de basura, siendo la composición media de basura la siguiente: materia orgánica: 54,9 % ; papel 19,2 %; plástico 10,9 %; vidrio 6,4 %, metales 3,5 % y otros (textil, madera, caucho, pilas,..) un 5,1 %.

El método mas común para deshacerse de los residuos sólidos urbanos, RSU, es su colocación en un **vertedero**, que no es más que un gran agujero o depresión en un terreno, que una vez llenado se cubre con suelo y/o arcilla. En el pasado los vertederos eran simplemente “agujeros en el terreno” creados por la actividad de extracción minera. En muchos casos se producía lixiviación que contaminaba los acuíferos situados justo por debajo, especialmente en aquellos vertederos que utilizaban canteras de arena, ya que el agua pasa fácilmente a través de la arena. Estos vertederos no eran diseñados, ni controlados, ni supervisados y aceptaban además todo tipo de residuos peligrosos. Los vertederos municipales modernos están mucho mejor diseñados y construidos, y deben emplazarse en lugares donde el impacto ambiental sea mínimo.

Durante el tiempo en el cual los residuos municipales se van descomponiendo en el vertedero —primero aeróbicamente y después anaerobicamente— el agua de lluvia, el líquido de los propios residuos y el agua subterránea que se filtra al vertedero percolan a través de la basura produciendo un líquido que se llama **lixiviado**. Este líquido contiene contaminantes microbianos que son extraídos de los residuos sólidos, además de ácidos orgánicos volátiles, ácido acético, bacterias, metales pesados y sales de iones inorgánicos. El CO<sub>2</sub> liberado de la descomposición de la materia orgánica puede acidificar el lixiviado facilitando su capacidad para disolver mas metales. El volumen del lixiviado es alto en los primeros años observándose una disminución en los años posteriores. El control del lixiviado puede hacerse de dos maneras diferentes:

- a) eliminación del lixiviado y sistema de recogida, seguido de tratamiento del líquido
- b) colocación de un revestimiento alrededor de las paredes y en el fondo del vertedero, ya sea sintético (un plástico como por ejemplo el polietileno de alta densidad) ó natural (por ejemplo arcilla compactada).

Inicialmente la descomposición anaeróbica produce ácidos carboxílicos volátiles y ésteres, los cuales se disuelven en el agua que esta presente. El mal olor que emana de los vertederos, es debido probablemente a estos ésteres y tioésteres. En la siguiente etapa de la descomposición se emite gas metano en cantidades significativas a medida que los ácidos se van descomponiendo en metano,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . A menudo el gas se deja escapar a la atmósfera haciéndolo pasar por pozos o por zonas de grava, y en algunas zonas este gas se utiliza, ya que el calor producido en su combustión puede tener aplicaciones prácticas. Esto es especialmente deseable debido al potencial del metano como gas invernadero.

En la actualidad la normativa de la Unión Europea sobre los vertederos controlados exige los siguientes requisitos:

- deben estar vigilados
- deben estar cercados
- la zona debe estar impermeabilizada
- deben tener un control exhaustivo de lixiviados
- deben poseer medios técnicos para canalizar los fluidos tóxicos
- deben tener medios para controlar la emisión de gases
- debe estar perfectamente ordenado el transporte y recogida
- debe educarse a la población para reducir el volumen de basuras

En Galicia existen unos 3000 puntos de vertidos ilegales y casi la totalidad de los vertederos controlados no reúnen las mínimas condiciones exigidas por la legislación. En julio de 1999 en Galicia tan solo dos vertederos cumplían esta normativa, el vertedero de Santiago y el de Cerceda. El resto, casi doscientos están fuera del control de la Administración, esta falta de supervisión tiene efectos muy perjudiciales para el Medio Ambiente. A los vertederos llega todo tipo de residuos y cuando la basura crece demasiado es práctica habitual incendiarla. Esto que es totalmente ilegal y sancionable, produce la emisión a la atmósfera de muchos gases tóxicos, que pueden contener entre otros dioxinas, óxidos de azufre, nitrógeno y carbono. Por otra parte, al no estar impermeabilizados los lixiviados generados contaminan las aguas subterráneas.

La falta de previsión y control de los vertederos originó en 1996 el accidente del vertedero de Bens que pudo haberse convertido en una importante catástrofe. El citado vertedero recogía la basura de la Ciudad de A Coruña con aproximadamente unos 400.000 habitantes. El vertedero estaba construido aprovechando la concavidad de una vaguada del terreno, la superficie cubierta por la basura se compactaba formando diferentes capas entre las cuales se colocaba tierra para presionar a las basuras. Esta com-

pactación acabo por producir la ruptura de uno de los laterales del vertedero precipitándose al mar unas 200 toneladas de basura sepultando las casas del pueblo y matando a una persona.

La otra alternativa al tratamiento de los RSU es la incineración. La **incineración** consiste en la oxidación por medio de la quema controlada de materiales para dar productos simples y mineralizados como dióxido de carbono y agua. Esta combustión puede hacerse en una sola etapa, o en los sistemas mas modernos en dos etapas. En este último sistema los residuos se colocan en una cámara primaria y se queman a una temperatura 760°C. Los gases y las partículas que resultan se queman aún más, a una temperatura superior de 870°C, en una cámara secundaria de combustión. De esta manera se genera una menor cantidad de gases residuales que deben ser controlados pudiéndose recuperar parte del calor generado en el proceso de combustión y convertirlo en vapor, agua caliente o electricidad. Pero los productos que proceden de las incineradoras municipales no solo incluyen los gases finales, sino también un residuo de sólidos que alcanza una **tercera parte** del peso inicial de las basuras. Las **cenizas fijas** es el material no combustible que se recoge en la parte inferior del incinerador, mientras que las **cenizas volantes** son el material sólido finamente dividido que, habitualmente es retenido por una serie de filtros en las chimeneas para impedir que sean liberadas a la atmósfera. La mayor parte de las cenizas corresponde a constituyentes inorgánicos de los residuos los cuales forman sólidos aún estando completamente oxidados. Sin embargo en algunas ocasiones, el residuo sólido, en particular las cenizas volantes pueden contener sustancias tóxicas, principalmente metales pesados que pueden lixiviarse de ellas, o incluso sustancias orgánicas tóxicas como las dioxinas (6).

Aunque no hay datos en Galicia sobre este problema de vertido al ambiente de metales pesados y dioxinas procedentes de las incinerados municipales y hospitalarias, en Estados Unidos se cree que son la mayor fuente antropogénica de mercurio y dioxinas al medio ambiente.

Como se puede ver de todo lo dicho anteriormente no hay una solución ideal para los residuos, por ello en las últimas décadas se ha concluido que lo mejor es conseguir la reducción de la cantidad de materiales descartados como residuos después de utilizarlos una sola vez. Se trata de conservar los recursos naturales a partir de los cuales se producen los materiales y reducir el volumen de material que debe disponerse por vertido o incineración. Las “**cuatro R’s**” de esta filosofía de gestión de los residuos son:

- **reducir** la cantidad de materiales utilizados
- **reutilizar** los materiales una vez formulados
- **reciclar** los materiales mediante la re-fabricación de sus componentes
- **recuperar** la energía contenida en los materiales si no se pueden reutilizar o reciclar

Estos principios se deben aplicar a todos los tipos de residuos, incluyendo los peligrosos

Según la normativa actual de la Unión Europea la mayor parte de los vertederos tradicionales de Galicia deberá desaparecer en unos años y para evitar el problema de búsqueda de nuevos vertederos la Xunta de Galicia creó “ El Plan de Xestión de Residuos Sólidos Urbanos” que entró en vigor el 19 de noviembre de 1998. Para llevar a la práctica esta política se creó la **Sociedade Galega do Medio Ambiente, SOGAMA**. Este plan elaborado teniendo como referencia las directrices de los RSU de la UE, es según SOGAMA (56) el único proyecto medioambiental que recibió de los Fondos de Cohesión mas de 84.522.000 euros. Se define como un plan Global e Integral. Global porque está diseñado para toda Galicia, con la flexibilidad necesaria para adaptarse a las necesidades y singularidades de todos los municipios que deseen adherirse e Integral, porque no se limita al tratamiento final de los RSU sino que incluye y combina complementariamente distintos procedimientos y sistemas de tratamiento, desde la minimización en origen hasta la recuperación y el reciclaje de los materiales por medio de la recogida selectiva. La puesta en marcha de SOGAMA supone que los municipios puedan acceder al Plan de Sellado y Clausura de Vertederos Incontrolados y Puntos Negros puesto en marcha por la Consellería de Medio Ambiente, la regeneración de los correspondientes espacios degradados y la solución para aquellos vertederos próximos a quedar saturados. Además supone la recuperación y el reciclaje de todo aquello de valor que existe en los RSU: vidrio, plástico, metales, papel y cartón utilizando el resto como combustible para generar energía eléctrica.

El tratamiento integral de los RSU propuesto por SOGAMA es el siguiente: el proceso comienza en el lugar donde se generan los residuos, es decir en los hogares domésticos, donde se debe realizar una separación de la basura. Por una parte el vidrio, por otra el papel y el cartón que deben depositarse en los contenedores adecuados para poder ser enviados posteriormente a las correspondientes plantas de reciclaje. Por otra los envases de plástico, latas y bricks recogidos en una bolsa amarilla y el resto de los residuos recogidos en una bolsa negra se trasladan a la ecoplanta por separado. Desde las ecoplantas, la bolsa amarilla y la bolsa negra se envían en contenedores separados al complejo medioambiental de SOGAMA, en donde la bolsa amarilla se deposita en la planta de reciclaje para su selección, clasificación y posterior reciclado y la bolsa negra se depositan en la planta de incineración.

Aunque en la actualidad no hay datos en Galicia sobre los posibles problemas de vertido al ambiente de metales pesados y dioxinas procedentes de las incineraciones municipales y hospitalarias, en Estados Unidos se cree que son la mayor fuente antropogénica de mercurio y dioxinas al medio ambiente, por ello se deben realizar estudios en esta línea.

Aunque la Administración apuesta claramente por el plan de Sogama, existen en la actualidad otras alternativas que son apoyadas por varios Ayuntamientos que consisten en la fabricación de **compost** elaborado a partir de la materia orgánica de la recogida selectiva. No debemos olvidar que aproximadamente la mitad de los residuos generados son materia orgánica, con la cual se puede fabricar el compost para poder ser utilizado poste-

riormente por ejemplo como un abono agrícola ó para tratar suelos degradados por actividades diversas. Este procedimiento consiste basicamente en convertir los residuos orgánicos en humus estable, por la acción de ciertos microorganismos presentes en las mismas basuras. El proceso puede transcurrir en un medio aerobio como anaerobio, aunque el primero es mas usual. En el proceso de compostaje intervienen varios parámetros: la naturaleza de los residuos, los pretratamientos (sobre todo la separación de los residuos), la temperatura, el grado de humedad, el grado de aireación y la duración del proceso. Para realizar este proceso normalmente se añade una cierta cantidad de lodos procedentes de depuradora de aguas, que contienen mas microorganismos especializados en la degradación de la materia orgánica. De esta forma se logra acelerar el proceso de formación del compost y además se añade agua manteniendo la humedad en valores adecuados (55).

Una ventaja del proceso de compostaje es que se logra una reducción del volumen de los residuos, normalmente se obtiene un compost que ocupan entre un 20 a un 40% del volumen inicial de los residuos. El compost debe aplicarse en suelos con déficit de materia orgánica, pero de forma controlada conociendo de antemano los niveles de nitrógeno del compost, su contenido en minerales, la composición química del suelo, así como las especies que se quieren cultivar

Entre los inconvenientes del uso del compost se deben destacar la posible presencia de concentraciones altas de metales pesados debido a la reducción de volumen que experimentan los residuos lo cual puede llevar a problemas de toxicidad en su aplicación. Por otra parte, la presencia de un exceso de iones metálicos ligeros, tales como sodio, calcio y magnesio, que a pesar de que son nutrientes, en gran cantidad pueden acarrear problemas a las plantas mas jóvenes. Este problema puede ser evitado realizando un lavado con agua o bien mezclando el compost con turba en proporciones adecuadas.

## 5. Los residuos industriales

Los residuos industriales son otro problema ambiental importante. En Galicia se generan del orden de 3.700.000 toneladas de residuos de origen industrial de los cuales unas 500.000 toneladas presentan características de residuos peligrosos. Los elementos peligrosos en este tipo de residuos son principalmente: metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos de todo tipo, biocidas, sustancias fitosanitarias y farmacéuticas, amianto y aceites sintéticos, siendo las principales fuentes de los mismos: la industrias químicas, celulosas, metálicas, textiles, cuero y alimentación.

En la actualidad existe el centro de tratamiento de residuos industriales de Galicia dedicado al tratamiento de residuos peligrosos.

Los incineradores que tratan los residuos peligrosos son a menudo mas sofisticados que los que tratan los residuos municipales, ya que es mas importante que los materiales iniciales se destruyan completamente y que las emisiones estén controladas más estrechamente. En algunos casos los residuos no se queman por si mismos (por ejemplo PCB's), y por lo tanto deben añadirse a un horno que ya este en combustión alimentado por otros residuos o por combustible suplementario en forma de gas natural o combusti-

ble líquido. Deben emplearse llamas muy calientes para asegurar la combustión completa y evitar al máximo la liberación de sustancias peligrosas.

La incineración de residuos peligrosos ha llamado la atención de ambientalistas y de la población, debido al peligro de que se viertan sustancias tóxicas a la atmósfera debido a los procesos de combustión incompleta. Lo que preocupa son los **productos de combustión incompleta, PCIs**, que son compuestos orgánicos que se encuentran en los gases y que quedan absorbidos sobre las partículas emitidas por las incineradoras, estos PCIs se forman en la región después de la llama, en zonas más frías donde la temperatura disminuye por debajo de los 600°C. Estos procesos ocurren tanto en fase gas, como sobre las partículas sólidas. Así por ejemplo se forman cantidades traza de dioxinas y furanos a 200-400°C sobre las superficies de las cenizas volantes y del hollín donde los procesos parecen estar catalizados por iones metálicos de transición. El que este tipo de compuestos se produzca a bajas temperaturas es de preocupar en el momento de clausura de las incineradoras o bien cuando se producen fallos en el suministro energético o cuando se producen emisiones fugitivas del sistema (6).

Por otra parte, igual que en el caso de las incineradoras municipales el residuo sólido que se genera a partir de la incineración de los residuos peligrosos puede llegar a alcanzar una tercera parte del volumen del residuo original. Además estos residuos contienen cantidades traza de materiales tóxicos como también los contiene el agua residual procedente de las unidades de lavado de los gases.

El tratamiento de los residuos industriales es un problema no resuelto todavía. La preocupación por los problemas ambientales que generan las incineradoras de residuos es tan real que ha estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías para los residuos peligrosos, tales como la combustión con sal fundida, los incineradores de lecho fluidizado, los incineradores de plasma, el uso de fluidos supercríticos etc.

Para finalizar comentar la existencia de otros tipos de residuos que aunque menos peligrosos no dejan de ser un problema ambiental si no se tratan adecuadamente.

En primer lugar debemos citar los **residuos de la construcción**, se estima que en la actualidad en Galicia su volumen es el doble que el de los RSU. No existen plantas de reciclaje para este tipo de residuos por lo que son vertidos en rellenos o vertederos muchas veces incontrolados aunque cada vez se está controlando más este tipo de vertidos.

Los **residuos de vehículos usados**, existen unos 20 depósitos de este tipo de residuos que recogen más de 50.000 coches por año. Estos depósitos no cuentan con ningún control ambiental y producen la contaminación del suelo, el agua y la atmósfera. Debe destacarse en este caso la contaminación producida por los airbag utilizados como sistemas de protección personal en caso de accidente. Cuando el airbag se activa se produce una reacción química en la cual se genera nitrógeno que llena el airbag y otros compuestos químicos totalmente inofensivos. El problema surge cuando el coche se deposita sin activar el airbag, en este caso permanece la azida de sodio componente principal en la mencionada reacción que es un compuesto tóxico.

Los **residuos hospitalarios** y los procedentes de otras actividades sanitarias, son también un problema ambiental. Algunos de ellos se pueden asimilar a RSU pero otros son residuos peligrosos por lo que deben ser objeto de una recogida selectiva y tratamiento específico. Los residuos considerados peligrosos son incinerados en incineradoras específicas en las cuales se pueden producir los problemas ya comentados anteriormente.

La contaminación del suelo es causada básicamente por la incapacidad humana para eliminar segura y eficazmente los residuos que resultan de todas las actividades humanas y tecnológicas. Las mayores contaminaciones son producidas por los métodos de eliminación de los residuos sólidos y semisólidos, por la presencia de productos químicos peligrosos y por la degradación de la superficie terrestre. Quizás el aspecto más importante es la contaminación química debido a que las sustancias químicas pueden entrar en los ciclos naturales y ecosistemas afectando a los alimentos, a la salud y a la supervivencia de animales y del hombre. Además el suelo no existe aisladamente y su contaminación afecta a los otros medios. Sin embargo, el reconocimiento de la necesidad del estudio de la contaminación del suelo ha sido posterior al de la contaminación de las aguas y del aire y por ello existe mucha menos información.

## BIBLIOGRAFÍA

1. F. Bermejo Martínez, *El deterioro del Ambiente*, Discurso Inaugural de apertura de curso 1982-83, Universidad de Santiago de Compostela, 1982.
2. J. Erickson, *Un mundo en desequilibrio, la contaminación de nuestro planeta*, Serie McGraw-Hill de divulgación científica, McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid, 1993.
3. F. Bermejo Martínez, *El equilibrio roto*, Ed. El Correo Gallego, Santiago de Compostela, 1992.
4. R.D.Bojkov et al, *Journal of Geophysical Research* 100:25867-25876, 1995.
5. J. Shanklim, *British Antarctic Survey*, Cambridge, Reino Unido
6. C. Baird, *Química Ambiental*, Ed. Reverté, Barcelona, 2001.
7. M. Fisher, *La capa de ozono, la tierra en peligro*, Serie McGraw-Hill de divulgación científica, McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid, 1993.
8. <http://www.latu.uva.es/cgi-bin/ozono.pl>
9. J.Erickson, *El efecto invernadero, el desastre de mañana hoy*, Serie McGraw-Hill de divulgación científica, McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid, 1992.
10. J. F. B. Mitchell et al, *Nature* 376:501-504,1995.
11. J.T. Houghton et al, *Climate Change,1994,Radiative Forcing of Climate Change*, Cambridge, United Kingdom, 1995.

12. P. Jacob et al, *Atmos. Environ.* 24 A (2), 377-382, 1990.
13. H. Sakugawa et al, *Envir. Sci. Technol.* 24, 1452-1462, 1991.
14. P. Kettru et al, *Anal. Chem.* 63(21), 1047-1056, 1991.
15. R. Varela, *La deposición ácida por vía húmeda en dos zonas rurales de Galicia: Ames y A Estrada. Impacto de la deposición atmosférica en Pinus Pinaster*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1992.
16. A. Durán López, "La contaminación atmosférica de origen industrial: sistemas de vigilancia y control de las centrales térmicas, 83-99", en *III Congreso del Medio Ambiente del Arco Atlántico, Feria Internacional de Galicia*, Silleda, 7-10 noviembre, 1996.
17. R. Varela Díaz, *Contaminación industrial y residuos*, 73-100, en *25 Anos de Medio Ambiente e Ecoloxismo na Galiza*, ADEGA, Santiago de Compostela, 2000.
18. R. Peña Crecente, *Contribución al estudio de compuestos oxidantes en el entorno de una central térmica*, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 1997.
19. M. R. Méndez et al, "Aplicación de un modelo de calidad del aire en el estudio de la deposición ácida en el norte de Galicia", *XV Encontro Galego Portugues de Química*, A Coruña, 21-23 noviembre, 503-504, 2001.
20. L. Espada Recarey, "Efectos de la lluvia ácida sobre el medio ambiente", 161-179, en *III Congreso del Medio Ambiente del Arco Atlántico, Feria Internacional de Galicia*, Silleda, 7-10 noviembre, 1996.
21. S. Meizoso Permy, "Emisiones a la atmósfera y red de vigilancia y control de la contaminación atmosférica en la Comunidad Autónoma Gallega", 113-142, en *III Congreso del Medio Ambiente del Arco Atlántico, Feria Internacional de Galicia*, Silleda, 7-10 noviembre, 1996.
22. F. Moreno García, "Emisiones a la atmósfera y red de vigilancia y control de la contaminación atmosférica en la Comunidad Autónoma", 143-159, en *III Congreso del Medio Ambiente del Arco Atlántico, Feria Internacional de Galicia*, Silleda, 7-10 noviembre, 1996.
23. F. Fraga Rodríguez, "As Rías", 215- 280, en *As Augas de Galicia*, Consello da Cultura Galega, 1996.
24. F. X. Niell, *Trabajos Compostelanos de Biología*, 7:221-248, 1978.
25. Programa RENCAMG, *Red de control y vigilancia sanitaria da contaminación marítima da Comunidade Autónoma de Galicia*, Consellería de Sanidade, Xunta de Galicia, 1992.
26. A. Carballeira et al, *Estado de conservación de la Costa de Galicia, nutrientes y metales pesados en sedimentos y organismos intermareales*, Universidad de Santiago de Compostela, 1997.

27. Documento de síntesis. *Plan de saneamiento para cinco sistemas de rías en Galicia (Ferrol, A Coruña, Arousa-Umia, Pontevedra y Vigo)*, Consellería de Ordenación do Territorio e Obras Públicas, Xunta de Galicia, 1987.
28. Programa ESCORP 1980-1982, *Estudio de la contaminación de la Ría de Pontevedra*. Mopu y Excma Deputación de Pontevedra, 1982.
29. J. M. Ruiz et al, *Marine Ecology Series*, 164,237-244, 1998.
30. J. L.Gomez Ariza et al, *Chemosphere*, 37: 937-950, 1998
31. R. Anllo Sendín, *Determinación de TBT, DBT y MBT por HPLC-ETAAS y HPLC-ICP-MS. Aplicación al estudio de la contaminación en la ría de Pontevedra*, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 2001.
32. C.Porte, et al, *Biomarkers*, 5(6),436-446,2000.
33. C.Porte et al, *Environ,Sci.Technol.*,34(24),5067-5075, 2000.
34. J.Albaigés et al, "Evaluación de los efectos de derrames de petróleo en el medio marino mediante el uso integrado de indicadores químicos y bioquímicos", *V Simposio Centroamericano y del Caribe de Química Analítica Ambiental y Sanitaria*, Noviembre 2000, La Habana, Cuba
35. I.T.G.E., *Investigación de lignitos en las cuencas limnias gallegas. Cuenca de Rábade-río Miño. Sondeos mecánicos en el río Louro.*, Instituto Tecnológico y Geominero de España, 1982.
36. EPTISA e IDASA, *proyecto del Plan Hidrológico de las cuencas de Galicia Costa*, Xunta de Galicia, 1989-1991.
37. INYPSA, *Estudio sobre Infraestructuras Sanitarias. Abastecimiento y Saneamiento de las Cuencas Intercomunitarias, 1º fase*, Xunta de Galicia, 1989-1990.
38. EPTISA e IDASA, *Estudio de recursos de agua subterránea en Galicia*, en col. Con ITGE, Consellería de Ordenación do territorio e Obras Públicas, Xunta de Galicia, 1991.
39. X.R.Seara Valerio, "As augas subterráneas", 283 - 319, en *As Augas de Galicia*, Consello da Cultura Galega, 1996.
40. M.P.Combarro et al, "Contaminación bacteriana en pozos de zonas rurales de Galicia", *Revista de Sanidad e Higiene Pública*, 62:1561-1569,1988.
41. G.Alvarez Seoane, "Calidad del agua de fuentes públicas y pozos particulares, con especial referencia al término municipal de Vigo.Dictámenes Oficiales", *Revista de Sanidad e Higiene Pública*, 62:1303-1316, 1988.
42. M.Araujo, *Salubridad del agua en Galicia*, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 1993.

43. M.S.Gonzalez, et al, "Salubridad Bacteriológica del agua subterránea en un área con claros indicios de contaminación difusa", *II Jornadas Técnicas de Sanidad Ambiental*, Granada, 1995.
44. J. M. Antelo Cortizas et al, "Características Físico-químicas das augas superficiais", 353-446, en *As Augas de Galicia*, Consello da Cultura Galega, 1996.
45. *Programa de control y vigilancia sanitaria de las aguas de consumo público*, Consellería de Sanidade, Xunta de Galicia, 1992.
46. F.Bermejo Martínez et al, *Acta Química Compostelana*,5:16-24, 1981.
47. G.Alvarez Seoane, *Calidad de las aguas del río Lagares*, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 1980.
48. M.C.Perez Escudero, *Estudio de la contaminación de las aguas de los ríos Sar y Sarela (II)*, Tesina de Licenciatura, Universidad de Santiago de Compostela, 1983.
49. A.Alvarez Devesa, et al, *Acta Química Compostelana*, 7: 1-10, 1984.
50. F.Graña Lomba, *Aislamiento e identificación de la flora microbiana presente en las aguas del río Miño y su estuario*, Tesina de Licenciatura, Universidad de Santiago de Compostela, 1988.
51. J.M. Antelo et al, "Calidad de las aguas del río Xallas, parámetros físicoquímicos y microbiológicos", *Technología del agua*,75:25-32, 1990.
52. M.D.Cores Riveiro, *Indices de calidad de las aguas fluviales.Aplicación de los índices generales de calidad al río Barbuña (Orense)*, Tesina de Licenciatura, Universidad de Santiago de Compostela, 1992.
53. A.Bermejo Barrera, *La contaminación por plomo en la provincia de A Coruña*, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 1980.
54. X.Doménech, *Química del suelo,el impacto de los contaminantes*, Miraguano Ediciones, Madrid, 1995
55. X.Doménech, *Química Ambiental, el impacto ambiental de los residuos*, Miraguano Ediciones, Madrid, 5ªed.2000
56. <http://www.sogama.es/Esdinicio.htm>