

TEMA 1.4 CONTAMINACION ANTROPICA

CI41B Ingeniería Ambiental

Profesores D. Rodríguez, R. Muñoz y C. Espinoza
Semestre Primavera 2005

1. INTRODUCCION

Al comienzo de este curso observamos como los avances tecnológicos han contribuido a mejorar el estándar de vida de los seres humanos. Sin embargo, debemos ser realistas y reconocer que una serie de impactos ambientales negativos son también causados por esta tecnología. Por ejemplo, gases contaminantes y productos químicos sintéticos han sido hallados en los más remotos lugares del planeta. Compuestos de plomo, liberados por tubos de escape de autos y otros vehículos, han sido ubicados en glaciales de Groenlandia y Antártica. Los seres humanos como grupo somos los más terribles depredadores del medio ambiente a pesar que nuestra propia salud, y tal vez nuestra propia sobrevivencia, están en juego.

Los océanos muestran claramente el impacto de la contaminación de origen antrópico. Derrames de petróleo proveniente de buques tanque han asolado una serie de puntos específicos a lo largo de las costas y playas en todos los continentes. Tritio (hidrógeno radioactivo, H^3), producto de las pruebas nucleares al aire libre realizadas durante los años 50 y comienzos de los 60, ha penetrado profundamente en el agua del océano. Al menos la mitad de los bosques originalmente presentes en la tierra han sido eliminados para dar cabida a la actividad agrícola. Esta situación ha llevado consigo un incremento en los problemas derivados de la erosión de suelos y la pérdida de parte del carbono originalmente presente en el suelo.

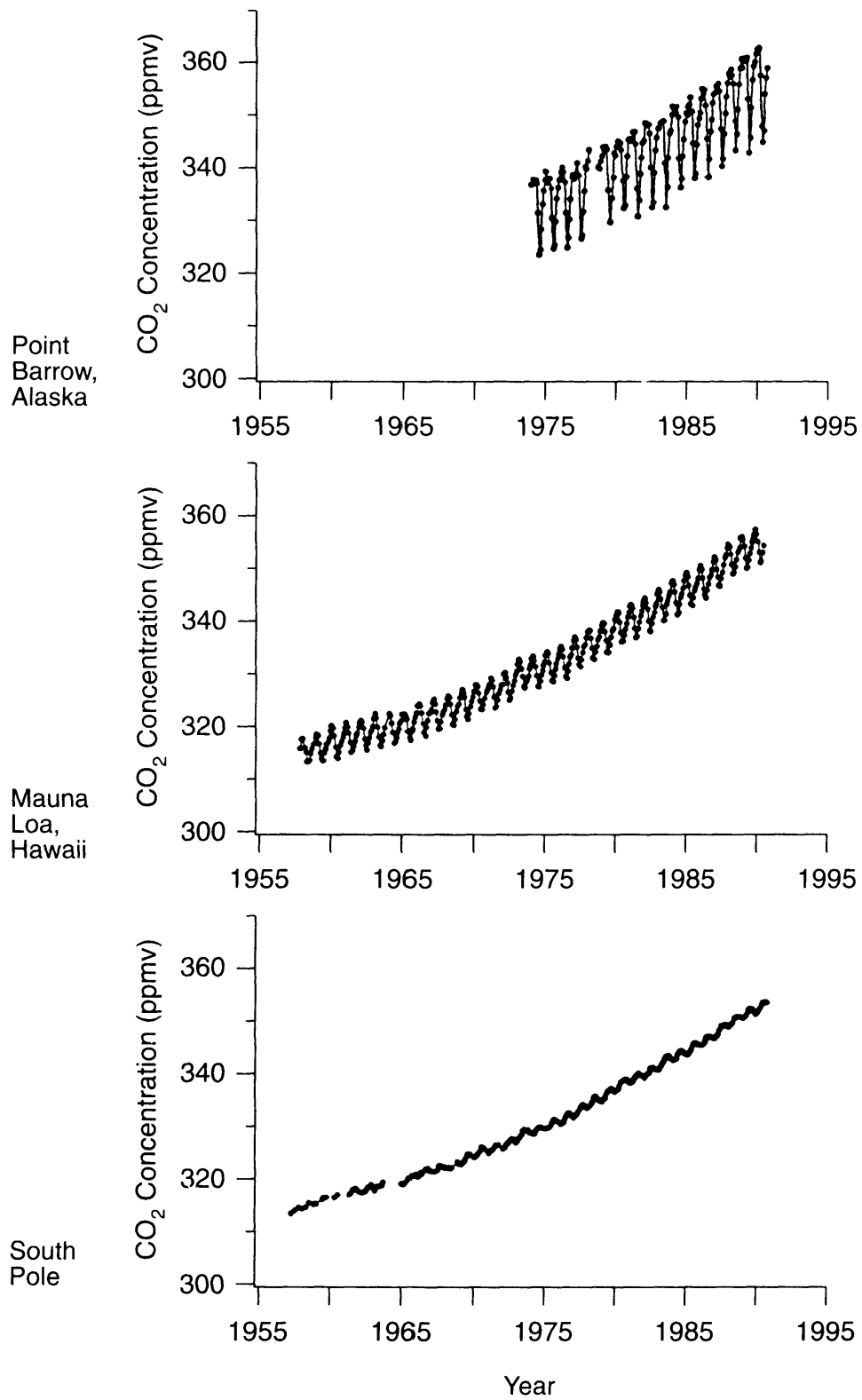
El deterioro del medio ambiente causado por el ser humano tiene dos escalas diferentes. En primer lugar, tenemos una escala local en la cual los daños al medio ambiente se concentran en localidades o sistemas claramente definidos en los cuales los culpables, los afectados y las posibles soluciones son fácilmente identificables. En segundo término tenemos aquellos problemas antrópicos de nivel global, los que afectan grandes regiones del planeta e involucran millones de contaminadores y víctimas. Ejemplos de problemas a escala local y global son la contaminación atmosférica en Santiago y el fenómeno de calentamiento global de la atmósfera (Global Warming), respectivamente. En estas notas del curso describiremos brevemente tres problemas de contaminación antrópica que ocurren a un nivel global: Calentamiento Global de la Atmósfera, Reducción de la Capa de Ozono, y Lluvia Acida.

2. CALENTAMIENTO GLOBAL DE LA ATMÓSFERA

2.1 Generalidades

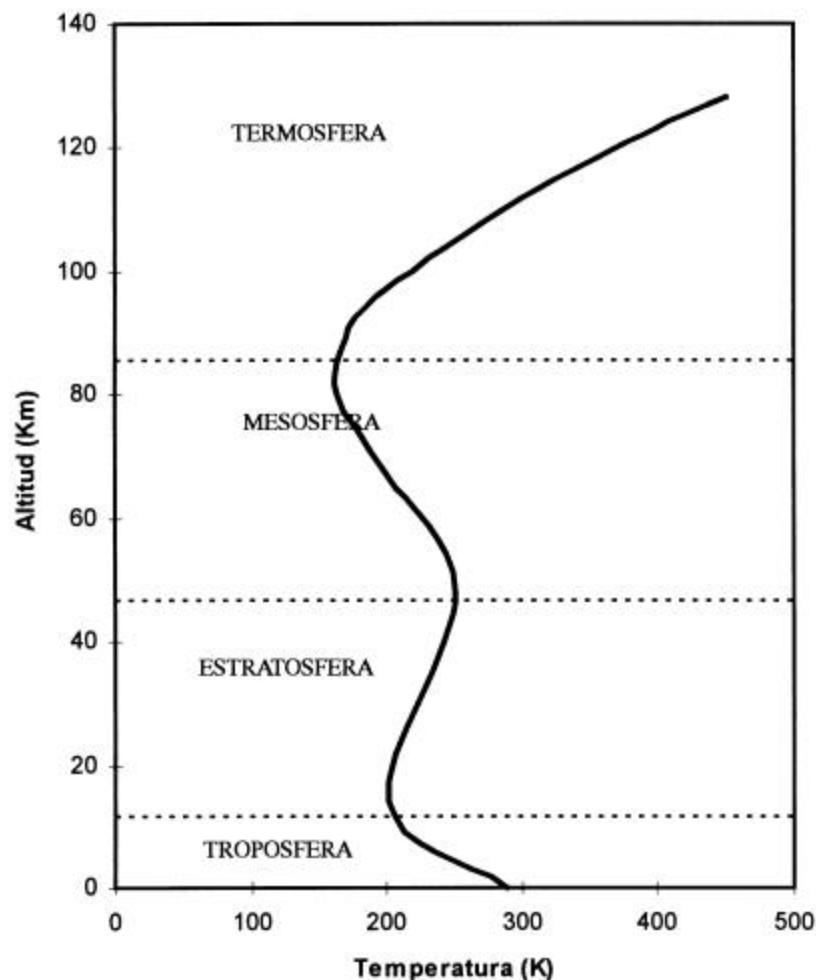
Una de las más importantes alteraciones causadas por los seres humanos al medio ambiente es el denominado Efecto Invernadero, el que se caracteriza por un continuo aumento del dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera como se muestra en la Figura 1. Sin lugar a dudas el aumento de CO_2 proviene de la quema de combustibles fósiles, la tala indiscriminada de árboles y la destrucción de la materia orgánica contenida en el suelo. El principal resultado de este aumento en el contenido de CO_2 es un cambio en el clima mundial que se caracteriza por un continuo incremento de la temperatura promedio. En el largo plazo este aumento de temperatura puede provocar daños importantes a la economía mundial (Global Warming).

Figura 1
Aumento del CO₂ Atmosférico



En la Figura 2 se observa un esquema con la distribución de las cuatro capas o estratos que conforman la atmósfera y la distribución de temperatura y concentración de ozono a través de ellas. Más del 80% de la masa total de la atmósfera y casi todo el vapor de agua, nubes y precipitación ocurren en la primera capa o tropósfera. Esta primera capa es caracterizada por una turbulencia muy elevada lo que produce condiciones para una buena mezcla de contaminantes en ella. Sobre la tropósfera existe una capa estable de aire muy seco denominada estratósfera. Los contaminantes que llegan hasta esta capa permanecen en ella por un período de tiempo muy largo hasta que eventualmente vuelven a la baja atmósfera por depositación o precipitación. En la estratósfera se produce la absorción de rayos ultravioleta de onda corta lo que ocasiona un aumento de la temperatura en la atmósfera. La inversión de temperatura causada por este fenómeno es la responsable de la estabilidad atmosférica de esta capa. Sobre esta capa se encuentra la mesósfera, en la cual también existe una muy buena capacidad de mezcla, y finalmente la termósfera.

Figura 2
Distribución de Temperatura en una Vertical



2.2 Temperatura Global

La historia del clima en la tierra se caracteriza por frecuentes, y en algunos casos bastante imprevistos, cambios de temperatura. En los últimos 2 millones de años ha habido aproximadamente 20 períodos glaciales e interglaciales. Mientras que estos cambios climáticos han sido el producto de fenómenos naturales en la actualidad sabemos que el ser humano tiene la capacidad de cambiar el clima a través de sus propias actividades.

Para modelar el cambio global del clima y estimar el efecto de un aumento de la concentración de CO₂ sobre el clima se requiere de muy sofisticados modelos que deben ser operados en computadoras especialmente diseñados. Sin embargo, es posible mostrar que muy simples modelos conceptuales proporcionan una muy buena aproximación para estudiar el fenómeno de calentamiento global y el efecto invernadero. Este análisis considera el uso de modelos que se concentran en aquellos factores que influyen la temperatura global. Algunos de estos factores son los vientos, las corrientes oceánicas, la lluvia, la humedad de suelo y la nieve, entre otros.

Para comenzar consideremos el caso en que se representa a la tierra como un cuerpo negro. Recordemos la definición de un cuerpo negro:

Cuerpo negro es una abstracción teórica que define a un objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él, y a la vez irradia energía a una tasa máxima constante.

La Figura 3a muestra un esquema en el cual la tierra se representa como un cuerpo negro. En este caso se supone que la tierra recibe la radiación solar de onda corta S sobre una superficie circular y emite energía a través de toda su área superficial (esfera).

Suponiendo que la tierra es un cuerpo negro toda la energía incidente es absorbida, i.e.,

$$E_a = (S) \cdot (\pi R_T^2) \quad (1)$$

en donde E_a es la radiación adsorbida medida en watts por año (W/año), S es la radiación solar de onda corta medida en watts por unidad de área (W/m²) y R_T es el radio de la tierra (en este caso se supuso la tierra como un disco). En el caso de la energía irradiada por la tierra se puede usar la ecuación de Stefan-Boltzmann para escribir:

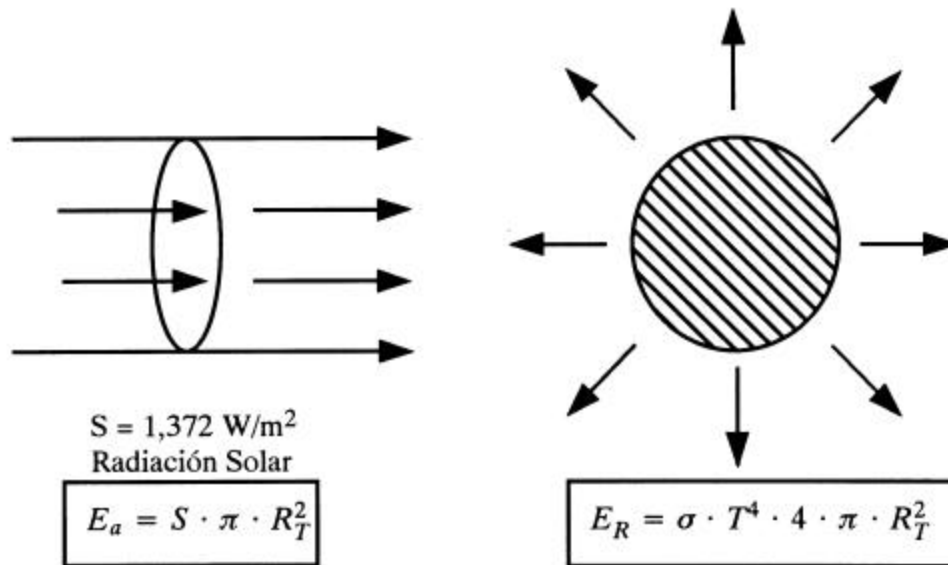
$$E_R = (s \cdot T^4) \cdot (4\pi R_T^2) \quad (2)$$

en donde s es la constante de Stefan-Boltzmann ($s=5.67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴) y E_R es la energía irradiada por el cuerpo negro.

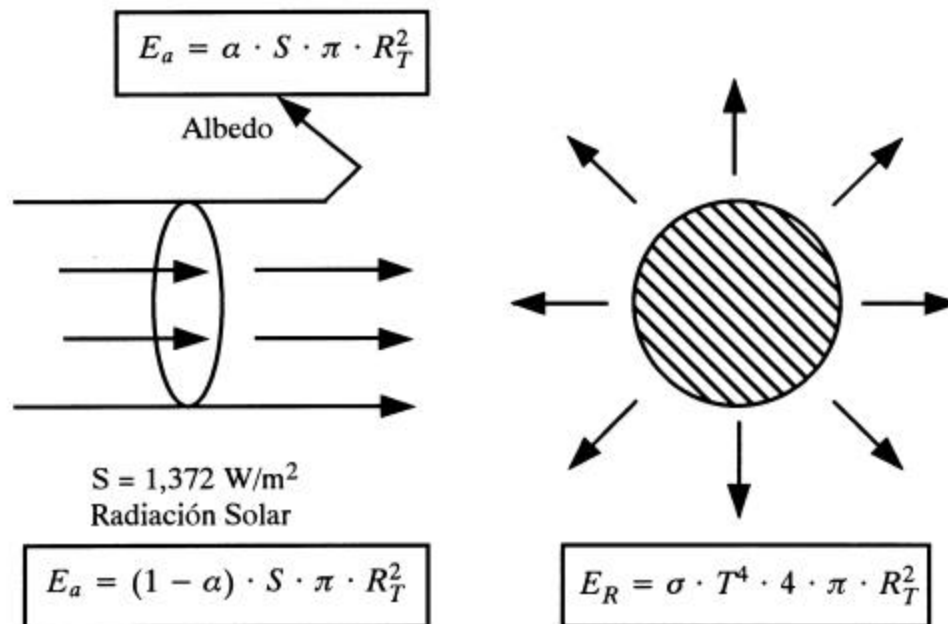
Si consideramos condiciones estacionarias (es decir que no hay cambios en el tiempo) podemos igualar las tasas de absorción e irradiación para obtener:

$$T = \left(\frac{S}{4s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Figura 3
Modelos Usados para Calcular Temperatura de la Atmósfera



a) La Tierra es representada como un Cuerpo Negro



b) Un modelo más realista que incorpora el albedo de la Tierra

Usando el valor para la radiación solar de onda corta presentado en la Figura 3a obtenemos que la temperatura de la tierra es igual a 279 K. Este valor es bastante cercano a la temperatura promedio del aire en la tierra, la que es aproximadamente igual a 288 K (15 C). A pesar de este buen ajuste entre los dos valores (calculado y medido) es importante recalcar que este modelo es muy aproximado y en realidad el que ambos valores sean tan parecidos es producto de una coincidencia más que de la bondad del modelo.

Un modelo más preciso para representar la temperatura global sobre la tierra debe incluir la reflexión de parte de la energía solar antes que alcance la atmósfera. La fracción de la energía reflejada (es decir aquella no aprovechada) se denomina *albedo*, y para la tierra se estima en alrededor de un 30%. En la Figura 3b se presenta un esquema que caracteriza esta situación. De acuerdo con este modelo debemos modificar la energía absorbida dada por la ecuación (1) para escribir:

$$E_a = (S) \cdot (1 - a) \cdot (p R_T^2) \quad (4)$$

en donde a es el albedo. Igualando las tasas de absorción e irradiación obtenemos:

$$T = \left(\frac{S \cdot (1 - a)}{4 \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

la que al ser evaluada nos da una temperatura promedio sobre la tierra igual a 255 K.

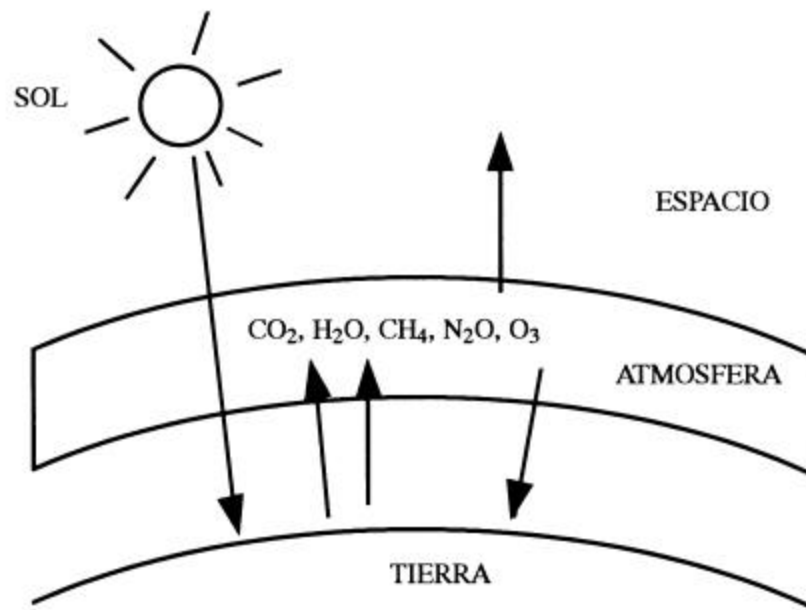
En este caso observamos que la corrección realizada al incluir el efecto de albedo ha hecho nuestra nueva predicción peor que la original. La razón por la diferencia observada entre la temperatura predicha y el valor medido de la temperatura está dada en el hecho que nuestro modelo no incluye las interacciones entre la atmósfera y la radiación que es emitida por la superficie de la tierra. Este simple elemento se denomina *Efecto Invernadero*.

2.3 Aumento del Efecto Invernadero debido a Acciones Antrópicas

Al realizar los cálculos anteriores nos dimos cuenta que la temperatura real de la tierra es 33 K (o 33°C) más alta que la predicción realizada con el modelo más completo. Dicha diferencia corresponde a un efecto no incorporado en nuestro modelo y que se relaciona con la habilidad de ciertos gases de absorber radiación ultravioleta. Al absorber esta radiación la atmósfera experimenta un aumento en su temperatura interna, la que en promedio alcanza a los 33°C indicados anteriormente. En la Figura 4 se presenta un esquema que ilustra la situación planteada en esta sección. En dicho diagrama observamos que un grupo de gases (CO_2 , H_2O , CH_4 , N_2O y O_3 , entre otros) son los principales responsables del *Efecto Invernadero*.

Como ha sido anteriormente presentado el aumento de las emisiones de algunos de los gases responsables del *Efecto Invernadero* está provocando un aumento en la temperatura promedio de la tierra. Este efecto es el que se conoce popularmente como *Calentamiento Global de la Atmósfera* y es inducido por acciones humanas. Mediante el uso de simples (o a veces muy sofisticados) modelos dedicados al análisis del cambio climático global se han podido establecer diversos escenarios que predicen cambios o consecuencias positivas y negativas sobre el medio ambiente. Entre las positivas podemos mencionar:

Figura 4
Gases Responsables del Efecto Invernadero



- una disminución en los costos de calefacción debido a más cálidos inviernos. Esta consecuencia positiva podría verse afectada por un aumento en los costos de aire acondicionado producto de la mayor temperatura en verano.
- una mayor temporada de crecimiento para los cultivos.
- navegación se haría más simple, especialmente en los mares ártico y antártico.

Como efectos negativos podemos destacar:

- condiciones más secas en zonas originalmente de secano obligaría a aumentar la inversión en obras de riego.
- derretimiento de nieves eternas en el ártico y antártico lo que provocaría un aumento del nivel del mar. Esta situación sería especialmente preocupante para aquellas poblaciones ubicadas en las cercanías del mar.

La Figura 5 muestra una visión general para la discusión del cambio climático global. En esta figura se indica que el aumento de la población, el crecimiento económico y la tecnología usada para producir bienes y servicios en nuestra sociedad son los principales responsables de este proceso. En la misma se identifica dos enfoques complementarios que podrían ser usados para hacer frente a este problema: adaptación y prevención.

Como complemento a este análisis se presenta la Tabla 1 en la cual se identifica los más importantes gases causantes del *Efecto Invernadero* y sus principales características.

Figura 5

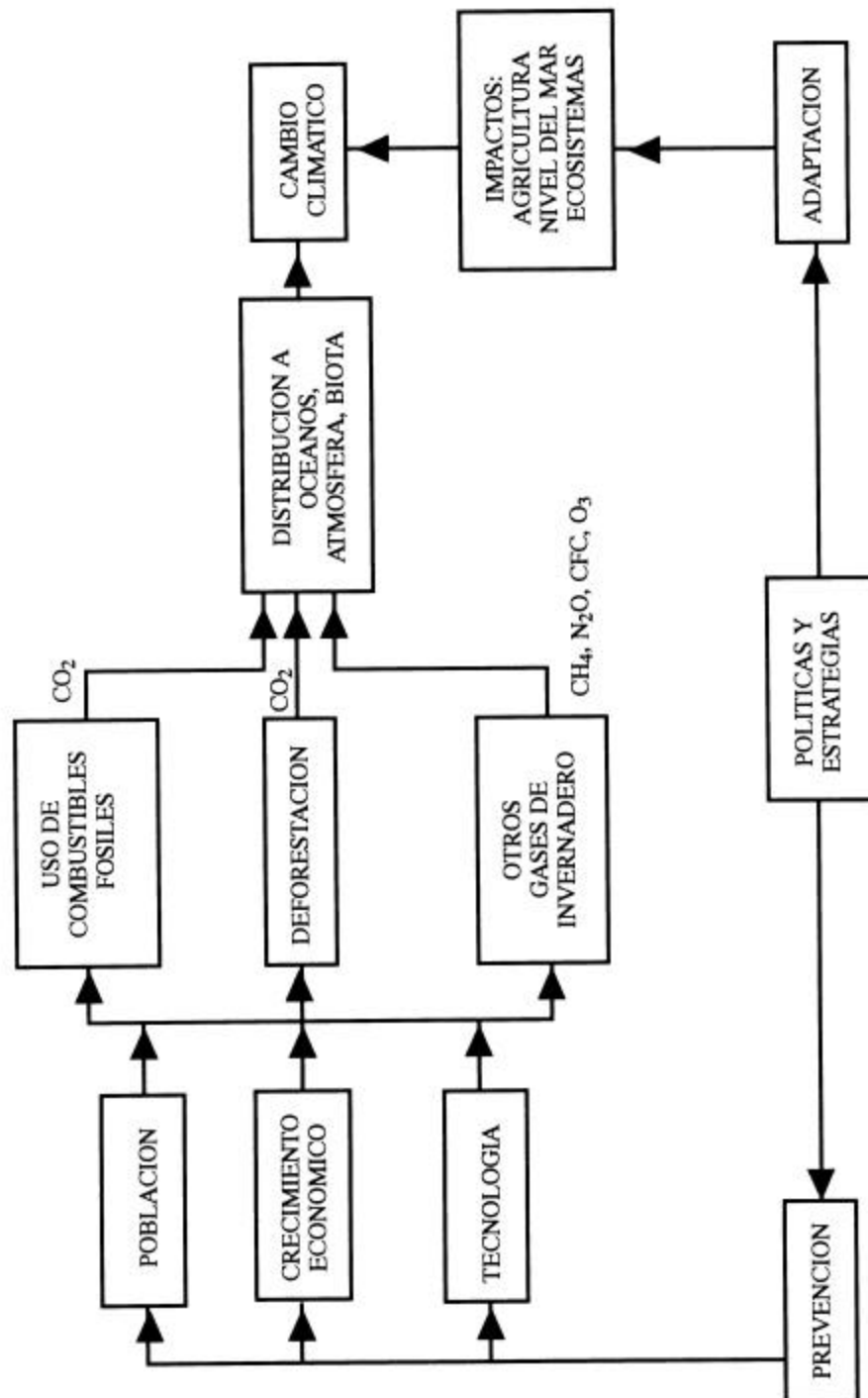


Tabla 1
Gases Más Importantes Causantes del efecto Invernadero

GAS	Concentración Atmosférica (ppm)	Incremento Anual de la Concentración (%)	Eficiencia Relativa de Efecto Invernadero (CO ₂ =1)	Contribución Actual al Efecto Invernadero (%)	Principales Fuentes de Gas
CO ₂	351	0.4	1	57	Combustibles fósiles, deforestación
CFCs	0.00225	5	15.000	25	Espumas, aerosoles, refrigerantes, solventes
Metano (CH ₄)	1.675	1	25	12	Pantanos, arrozales, animales, combustibles fósiles
N ₂ O	0.31	0.2	230	6	Combustibles, fertilizantes, deforestación

3. DISMINUCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

Los cambios ocurridos en la capa de ozono ubicada al nivel de la estratósfera están ligados directamente al problema de *Efecto Invernadero* discutido anteriormente. Muchos de los mismos gases están incluidos: clorofluorcarbonos (CFCs), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Aparte de estos gases existen otros nuevos como el metilcloroformo, carbóntetracloro y halones (fluorcarbonos que contienen átomos de bromo).

3.1 Producción de Ozono

El ozono en la atmósfera se produce por la acción de los rayos solares (radiación ultravioleta) sobre las moléculas de oxígeno, O₂. La energía provista por los rayos solares es capaz de romper una molécula de O₂ en dos unidades individuales de oxígeno, las que eventualmente se combinan con moléculas inalteradas de oxígeno produciendo ozono, O₃. Las reacciones químicas que caracterizan este proceso se presentan a continuación:



en donde la radiación ultravioleta ($h\nu$) tiene una longitud de onda menor que 242 nanometros (nm). El oxígeno atómico reacciona rápidamente con un oxígeno molecular para formar ozono:



en donde M representa un tercer elemento (N₂ o O₂) que es usado para tomar la energía liberada en esta reacción química.

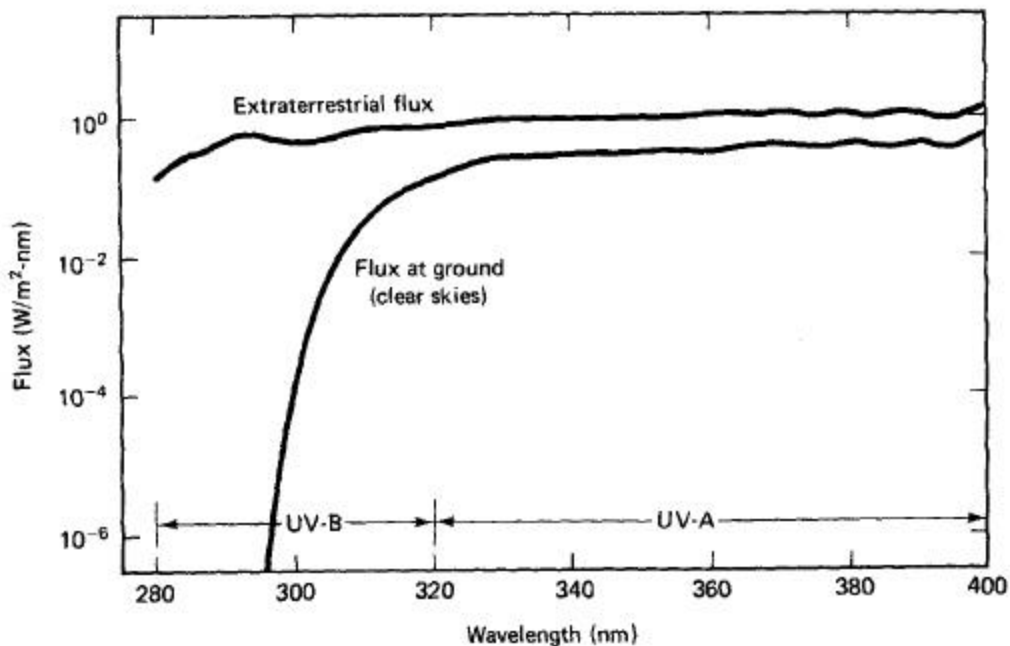
3.2 Destrucción Natural del Ozono

En oposición al mecanismo de formación de ozono tenemos su remoción debido a una reacción de fotodisociación, en la cual radiación ultravioleta entre 200 y 300 nm es adsorbida por ozono:



El efecto combinado de estos dos grupos de reacciones es la creación, en la mediana atmósfera, de una capa o estrato de ozono que absorbe la radiación ultravioleta de baja longitud de onda que dañan el ADN en la piel humana provocando quemaduras y, eventualmente, cáncer a la piel. La eficiencia de estas reacciones, en remover estas radiaciones ultravioletas, es indicada en la Figura 6. Esta figura muestra la comparación entre los flujos de radiación UV incidente a la tierra y aquella resultante de la acción filtrante del ozono.

Figura 6
Flujo de Radiación UV



A pesar de la producción continua de ozono los niveles de éste en la atmósfera no son muy elevados debido a que es atacado por otros gases que se difunden hacia la parte alta de la atmósfera (estratósfera). El más importante de estos gases es el óxido nitroso (N_2O), el que se produce naturalmente en el suelo y en algunos procesos industriales. En la estratósfera el óxido nitroso se oxida muy rápidamente a NO el que ataca fuertemente al ozono. Este y otros procesos provocan un equilibrio natural para el ozono en la atmósfera: es creado por la acción de los rayos ultravioleta y es destruido por otros procesos naturales.

3.3 Destrucción Artificial del Ozono

El ser humano ha producido una serie de compuestos químicos que han contribuido a la destrucción de la capa de ozono. En particular podemos mencionar a los compuestos de cloro, por ejemplo el clorofluorcarbono (CFC), usado para refrigeración. En la baja y mediana atmósfera estos compuestos son disociados lo que permite a los cloros libres el ataque del ozono. El ataque al ozono permite la creación de dióxidos de cloro (ClO_2), los que son eventualmente disociados liberando nuevamente las moléculas de cloro, las que repiten el ciclo

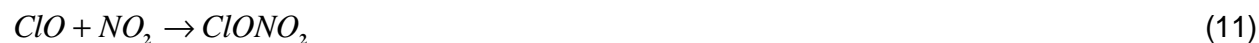
de destrucción del ozono. Un ejemplo de una reacción química que involucra una molécula de CFC-12 se presenta a continuación. En primer término una molécula de CFC-12 es rota por radiación ultravioleta liberando una molécula de cloro la que queda disponible para otras reacciones químicas:



El cloro liberado en la reacción anterior es un catalizador en las reacciones posteriores ya que actúa en ellas pero no es afectado. La molécula de cloro interactúa con el ozono formando monóxido de cloro:



que reacciona con dióxido de nitrógeno para formar un compuesto relativamente inerte denominado cloro-nitrato:



Este compuesto inerte se almacena en forma inactiva impedido de destruir más ozono. Sin embargo, durante el invierno antártico una condición atmosférica conocida como *vórtice polar* crea una situación especial en la cual este compuesto es atrapado sobre el polo sur y reacciona con moléculas de agua cristalizadas:



Tan pronto como el sol aparece sobre la antártica en agosto la molécula de cloro almacenada en el HOCl es liberada por fotólisis:



Una vez que la molécula de cloro es liberada existe un número de posibles reacciones químicas que pueden destruir ozono:



El efecto neto de este grupo de reacciones químicas es la destrucción de ozono y producción de oxígeno molecular:

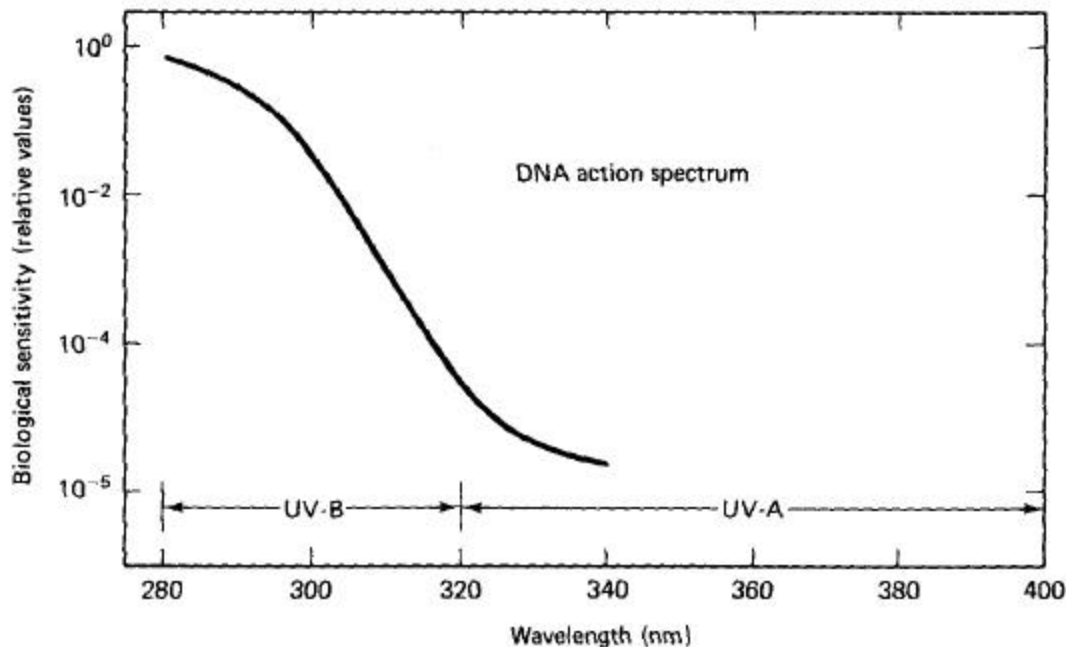


La destrucción de ozono es especialmente importante en aquellas zonas cubiertas por nubes estratosféricas. Estas nubes se encuentran de preferencia en las zonas polares (norte y sur) lo que ocasiona que el proceso de destrucción de ozono se desarrolle en forma más intensa en aquellos dos lugares del planeta. En el caso de la zona sur de nuestro país el proceso de

destrucción del ozono alcanza sus niveles más altos en la época primaveral (octubre y noviembre) durante la cual se detectan los niveles más bajos de ozono. Esta disminución en la concentración de ozono es lo que comúnmente se conoce como el *hoyo en la capa de ozono*.

Existe importante evidencia sobre el efecto negativo de la reducción en la capa de ozono, el que se caracteriza por la producción de cáncer a la piel en el caso de seres humanos. La Figura 7 muestra el efecto de la radiación UV sobre el ADN humano.

Figura 7
Efecto de la Radiación UV sobre el ADN Humano



4. LLUVIA ACIDA

La lluvia ácida es un subproducto, no deseado, de las emisiones de dióxido sulfuroso (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) a la atmósfera. Después que el SO_2 y NO_x son liberados hacia la atmósfera ellos se transforman en moléculas de sulfato y nitrato que, luego de combinarse con vapor de agua, se transforman en versiones débiles de ácido sulfúrico y nítrico. Finalmente, estas moléculas de agua vuelven a la tierra en forma de lluvia, nieve o niebla.

La lluvia normal es levemente ácida, con pH 5.6, debido al equilibrio existente entre el agua de lluvia y el CO_2 en el aire. Hoy en día se ha detectado la existencia de precipitación con un pH cercano a 4.0 y en algunas ocasiones 3.0. La preocupación, con este fenómeno, estriba en su efecto sobre la vida acuática, el daño potencial sobre cultivos, y la acelerada destrucción de edificios. Otro problema potencial de la lluvia ácida es su probable incorporación en el agua subterránea lo que provocaría un incremento en la solubilidad de algunos metales tóxicos.

El más importante de los efectos de la lluvia ácida sobre sistemas acuáticos es la declinación de la población de peces, lo que indirectamente provoca daños importantes en la economía de los países debido a la disminución del turismo. Otro efecto negativo potencial es la ingesta, por seres humanos, de peces que presenten un elevado contenido de metales tóxicos en su piel y

la destrucción de ciertos grupos de algas y plancton lo que distorsiona la cadena alimenticia en lagos. Algunos estudios han mostrado que variedades tales como la trucha o el salmón son especialmente sensibles al pH del agua. Los daños a la vida acuática debido a la reducción en pH se deben a la acción tóxica de altas concentraciones de aluminio sobre los peces. En el caso de anfibios (por ejemplo ranas y salamandras) el mayor daño se produce debido al efecto del pH sobre el desarrollo de huevos y pequeños embriones. Finalmente, en el caso de moluscos el efecto del pH se traduce en la descalcificación de sus conchas lo que interfiere con su desarrollo.

En el caso de los sistemas terrestres podemos identificar dos grandes problemas. Por una parte existe una acción directa de la lluvia ácida sobre las hojas de los árboles y en segundo lugar el bajo pH del agua hace que los árboles y cultivos sean más vulnerables al ataque de insectos y enfermedades.