

*Diplomado en Asuntos Antárticos
GAIA Antártica
Universidad de Magallanes*

EL AGUJERO DE OZONO
UN PROBLEMA DE CARÁCTER MUNDIAL

Cynthia Loreto Valenzuela M.

Septiembre de 2016

INDICE

<u>CONTENIDOS</u>	PAG
Resumen.....	3
Palabras claves.....	3.
Introducción.....	4
Tendencias del ozono atmosférico.....	5
El “agujero de ozono” antártico.....	6
Causas naturales de la variación de ozono.....	7
Causas antropogénicas de la variación de ozono.....	8
Compuestos que destruyen la capa de ozono.....	9
Consecuencias de la disminución de ozono.....	10
La recuperación del ozono atmosférico.....	12
Conclusiones.....	14
Referencias.....	16

Resumen

En las décadas pasadas han ocurrido una serie de cambios climáticos en el planeta. La mayoría de estas alteraciones se han producido como consecuencias de las actividades humanas. En este sentido, el descubrimiento del “agujero de ozono” durante la primavera antártica representa uno de los eventos atmosféricos más importantes, despertando el interés de toda la sociedad, científicos, políticos y autoridades gubernamentales han mostrado su interés y preocupación por este tema. La mayor prueba de ello, es el acuerdo llamado “Protocolo de Montreal”, donde casi todos los países del mundo se comprometieron a disminuir las emisiones de gases contaminantes que destruyen la capa de ozono. La concentración de ozono de la Antártica, sufre variaciones naturales que se deben principalmente a las condiciones meteorológicas particulares de este continente; pero también hay causas no-naturales, provocadas por el hombre, cuyos efectos biológicos son mucho más importantes. Se ha demostrado que el adelgazamiento de la capa de ozono resulta en un aumento sustancial de la cantidad de radiación UV-B que alcanza la superficie de la Tierra, especialmente aquella que es más activa biológicamente. Varios estudios científicos han demostrado los efectos perniciosos de esta radiación y no hay dudas del impacto en los organismos vivos, humanos, plantas, animales y microorganismos. Estas alteraciones se deben principalmente a la fuerte absorción de ácidos nucleicos y proteínas que son las principales moléculas involucradas en las respuestas fisiológicas y morfológicas a esta radiación. Afortunadamente, durante los últimos años se ha comenzado a revertir esta situación y los científicos han informado que el planeta ha comenzado a “sanarse”. En efecto, los datos de mediciones satelitales y sondas aerostáticas, demuestran que a partir del año 2000 existe una tendencia de aumento de la cantidad de ozono en la atmósfera. Esta reversión en el deterioro de la capa de ozono, se ha atribuido a la disminución de compuestos halogenados de carbono, acordada en el Protocolo de Montreal. Sin duda que esto demuestra que es posible lograr soluciones cuando, la “vida” de nuestro planeta está en peligro, y los esfuerzos mundiales se dirigen hacia soluciones derivadas de conductas concretas.

Palabras claves. Adelgazamiento de la capa de ozono, Antártica, ozono, causas antropogénicas, clorofluorocarbonos, medio-ambiente.

1. Introducción

El objetivo de esta monografía es reunir y analizar la información acerca del adelgazamiento de la capa de ozono en la Antártica, conocer sus causas, las principales consecuencias de este fenómeno y determinar si la tendencia a la disminución de este “escudo protector” de la radiación ultravioleta solar se ha revertido. Para ello, se han revisado páginas Web, versiones electrónicas de periódicos internacionales, libros y literatura científica que reúne los principales hallazgos e investigaciones relacionadas con esta temática.

Desde el comienzo de los tiempos, el hombre se ha asombrado por el sol, esa estrella brillante de nuestra galaxia, que es fuente de todas las clases de radiación que existen en la naturaleza. A través de su viaje por el espacio, esta radiación interactúa con los componentes estratosféricos antes de alcanzar la superficie de la Tierra. La radiación solar consiste de dos componentes: uno directo, a lo largo del vector del sol, y otro difuso que se produce por la dispersión a través de los gases atmosféricos y aerosoles. Además de la cantidad de ozono atmosférico, dispersantes y absorbentes de origen natural y antropogénico, hay otros factores como cambios en la distancia Tierra-sol (Barker, 1968), ángulo solar, elevación sobre el nivel del mar, y albedo (porcentaje de radiación reflejada) (Green et al, 1974), los cuales cambian la calidad y cantidad de radiación que llega al suelo. Según Frederick et al (1989), la distribución espectral de la radiación solar, va desde los rayos ultravioleta, a la radiación visible e infrarroja (cerca del 90% del total). Esta es la radiación solar que se emite hoy en día. Pero, seguramente, cuando la vida se originó en la Tierra la radiación solar debe haber sido muy diferente. Cabe preguntarse, ¿cuál era la naturaleza e intensidad del flujo solar hace 4.5 billones de años atrás?, y también, ¿cuál era la radiación disponible para la síntesis de compuestos orgánicos? Del mismo modo, hay que recordar que la atmósfera primitiva de la Tierra, era altamente reductora y se formó aproximadamente hace mil millones de años atrás cuando el oxígeno y el ozono estaban ausentes (Sagan, 1961). Según esto, la radiación que reciben actualmente los organismos vivos debe ser muy distinta a aquélla que estaba presente en la superficie de la Tierra, cuando comenzó la vida.

Desde los años 70, los estudios del ozono atmosférico han despertado un considerable interés por los científicos. En particular, se han desarrollado estudios acerca de los cambios atmosféricos relacionados con las actividades humanas, especialmente, después que se postuló que el cloro liberado desde los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs) puede destruir el ozono atmosférico (Cicerone et al, 1975; Rowland y Molina, 1975). El descubrimiento del “agujero de ozono” sobre la Antártica (Farman et al, 1985; Stolarski et al. 1986) fue otro evento que aumentó considerablemente este interés.

Existe evidencia tanto de mediciones satelitales (Reinsel et al, 1994; Bojkov et al. 1990) como de registros terrestres (Hill et al, 1984; Reinsel et al, 1988) que han confirmado una destrucción acelerada de ozono. Estas mediciones satelitales muestran que la ruptura de ozono ha superado la disminución predicha, basada en

los efectos de la inyección continua a la atmósfera de compuestos clorados y otros productos químicos que destruyen el ozono (Reinsel et al, 1994). Según Ziska et al (1992), las tendencias futuras del ozono resultaban difícil de predecir, a pesar de mantener un control estricto con respecto a estos productos químicos. En el año 1993, tampoco se esperaba un descenso significativo en la velocidad de adelgazamiento de la capa de ozono en los próximos 15 años (UK-SORG, 1993). Se esperaba que esta reducción del ozono estratosférico resultase en un aumento sustancial en la cantidad de radiación que alcanza la superficie de la Tierra (NASA, 1988), particularmente en aquéllas de longitudes de onda más cortas, las cuales son conocidas por ser las más activas biológicamente (Madronich, 1992).

La relevancia de este fenómeno, ha alcanzado niveles importantes dentro de la sociedad, tanto a nivel científico como escolar. Esto se demuestra en la gran cantidad de literatura especializada que existe sobre el tema y la publicación de cuentos tales como: “Ozonita una capa mágica”, “La historia del ozono”, “Conociendo sobre la capa de ozono” y “Ozonita, un sueño en el espacio”. Este material pretende difundir el tema dentro del ámbito escolar e integrar a la población infantil en el cuidado del ambiente de nuestro planeta, disminuyendo en lo posible el uso de productos que liberen agentes químicos que destruyan la capa de ozono que protege a todos los seres vivos de la dañina radiación ultravioleta (UV) proveniente del sol. La función de este compuesto gaseoso es absorber la radiación UV-C y UV-B, actuando como un filtro solar natural, un verdadero “escudo protector” para las personas, animales y plantas (OMM, 2016). La radiación UV solar, está formada por tres tipos, clasificándose según la longitud de onda que la conforma. Así, es posible distinguir la radiación UV-C (menor a 200 nm), UV-B (280-320 nm) y UV-A (320-400 nm). La radiación UV-A, no es absorbida por el ozono (ACS, 2016).

1.1 Tendencias del ozono atmosférico

La capa de ozono está situada 8.4 km arriba de la superficie terrestre y tiene sólo 0.32 cm de espesor, con una presión de 0.14 atm x cm, bajo condiciones normales (Shettle y Green, 1974). La columna de ozono está sujeta a cambios naturales relacionados con la distancia Tierra-sol, ángulo solar, latitud y longitud (Frederick et al, 1989). Se piensa que los efectos biológicos de estas variaciones naturales cíclicas son menos importantes que aquéllos producidos por el adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico provocado por el hombre. El contenido en ozono se mide en unidades Dobson (siendo 1 UD= 2.69×10^{16} moléculas/cm² ó 2.69×10^{20} moléculas/m²). Tras analizar computacionalmente una colección de datos satelitales, Herman et al (1993), encontraron que las mayores velocidades de disminución de ozono ocurren en el hemisferio sur, en conjunción con el “agujero de ozono” sobre la región antártica. Por ejemplo, en la región más austral de Sudamérica, la velocidad de adelgazamiento de ozono varía desde 7-15% por década en el paralelo 45° S.

Asimismo, Cassicia et al (2003) y Stolarski et al (1991) encontraron valores similares para esta zona. Sin embargo, según observaciones satelitales esta rápida disminución del ozono no ocurre fuera del vórtice polar (Komhyr et al. 1988). Se ha encontrado que durante la primavera antártica ocurre una gran disminución de la concentración de ozono, más de un 50% del habitual en la zona. En algunos años, durante la década del 2000-2010, los niveles de ozono sobre la Antártida han descendido a niveles inferiores de lo normal entre agosto y finales de noviembre, es decir, menos de 220 UD de ozono entre la superficie y el espacio. Los niveles normales para esta región son de 300 UD, que descienden a 150 UD o menos, en casos extremos (Echarri, 1998). La explicación a por qué existen diferencias en la velocidad de destrucción del ozono tanto dentro como fuera del vórtice polar se pueden encontrar en las bajas temperaturas, la presencia de partículas y las condiciones especiales de la estratósfera antártica. Otros autores, como Bojkov et al (1990), han sugerido factores distintos que posiblemente influyen en el estado de la capa de ozono, tales como, armas nucleares lanzadas a la atmósfera en los años 60, erupciones volcánicas, que liberan a la atmósfera partículas que contienen dióxido de azufre (SO_2) y reducen el ozono atmosférico, y la corriente de El Niño (ENSO).

1.2 El “agujero de ozono” antártico

El agujero de ozono es un fenómeno descubierto en la primavera antártica en el año 1985 (Farman et al, 1985; Stolarski et al. 1986). Se denomina “agujero de la capa de ozono” a la zona de la atmósfera terrestre donde se producen reducciones anormales de la capa de ozono. Es por ello que el término “agujero” no es correcto ya que es más bien una disminución de la cantidad de ozono, o bien, un adelgazamiento de la columna que lo contiene. Este fenómeno anual es reversible, ya que al descenso registrado durante la primavera en las regiones polares, lo sigue una recuperación durante el período de verano.

Se ha registrado principalmente sobre la Antártida, pero también puede presentarse en otras zonas, donde existan condiciones meteorológicas que favorecen las reacciones destructivas del ozono junto con la llegada de la luz solar en la primavera del hemisferio sur. Las dimensiones del “agujero” son bastante grandes: su superficie es parecida a la de Estados Unidos de América y la columna alcanza una altura similar al Monte Everest. Argentina, Chile y Uruguay son los países más afectados en Sudamérica.

Durante la década de 1978-1987 este adelgazamiento aumentó tanto en extensión como en profundidad. Pero este efecto no fue permanente, observándose una serie de fluctuaciones. Por ejemplo, en 1988 hubo una gran disminución en el adelgazamiento de la capa de ozono. Entre los años 1989-1991, la concentración de ozono disminuyó tanto como en 1987, y entre los años 1992-95 este descenso fue aún mayor. En 1987 y 1989-95 la extensión del “agujero” de ozono era tan grande que cubría todo el continente antártico, incluyendo parte del

océano que lo rodea. Asimismo, en algunas pocas ocasiones llegó a afectar al extremo de Sudamérica, Australia y Nueva Zelanda (Atmósfera, 2016). En el año 2011, ocurrieron importantes sucesos en la disminución del ozono antártico: la NASA informó que el 12 de septiembre alcanzó su máximo anual. La superficie se extendía a 10,05 millones de km², el noveno mayor “agujero de ozono” en la historia. Asimismo, el 9 de octubre de ese año, este adelgazamiento sobre el polo sur, llegó su punto más profundo de la temporada, el décimo inferior en 26 años (NASA, 2011). De acuerdo a Paul Newman, del Centro Goddard de esta agencia espacial, “las temperaturas más frías que la media en la estratósfera causaron este año un agujero de ozono más grande que el promedio”.

1.2.1 Causas naturales de la variación de ozono

Tal como se ha mencionado, además de los efectos generados por la acción antropogénica, existen variaciones naturales en la concentración de ozono en la estratósfera de la Antártica, producidas por las condiciones meteorológicas especiales que se encuentran en la región. En el Ártico la situación es diferente; el adelgazamiento de la capa de ozono es mínimo en relación a la Antártica. Allí el invierno boreal no es tan frío como el austral, puesto que la extensión de la masa de hielo, 14 millones de km², es muy superior a la del Ártico, formada por grupos de hielos flotantes polares. Sin embargo, también se han registrado pérdidas de ozono en Canadá, Siberia y el norte de Europa (Atmósfera, 2016).

Los científicos han descubierto que las bajas temperaturas y las condiciones extremas del clima antártico causan este adelgazamiento (NASA, 2011). Durante la época de invierno, una gran masa de aire muy frío cubre el polo sur, lo que hace descender las temperaturas a valores extremos: -40° en la superficie, bajando aún más en la atmósfera superior -80°C (Atmósfera, 2016). Se pueden citar 2 factores naturales que explican la variación del ozono estratosférico de la Antártida:

- i. *El vórtice polar.* Durante el invierno el aire de la Antártida se enfría, lo que produce su descenso. El movimiento descendente de esta masa de aire produce un fenómeno físico llamado efecto Coriolis (Efecto Coriolis, 2016) que forma una fuerte corriente en dirección oeste alrededor del polo (vórtice polar). Esto mantiene el aire de la Antártida “atrapado” durante la época invernal. A pesar de que con la llegada de la primavera el aire comienza a calentarse, permanece el vórtice polar hasta noviembre.
- ii. *Nubes polares estratosféricas.* Normalmente en la capa de ozono de la atmósfera superior no hay cubierta de nubes. Pero en el vórtice de los polos, especialmente en el hemisferio sur, se ha encontrado un tipo de nube, conocida como la “nube estratosférica polar”, que están compuestas principalmente de ácido nítrico y agua cristalizados. Estas nubes se forman en el frío extremo del invierno polar, donde las temperaturas en la parte baja de la estratósfera llegan a menos de -80° C. A medida que la

primavera avanza, la temperatura del aire comienza a subir y el proceso de deterioro de la capa de ozono disminuye. Sin embargo, estas nubes, que están compuestas por partículas químicas congeladas, son las que aceleran el proceso de destrucción de ozono (Echarri, 1998).

1.3 Causas antropogénicas de la variación de ozono

Además de las variaciones naturales en la capa de ozono, existen otros factores que han contribuido a aumentar el deterioro de este “escudo protector”, situado en la atmósfera superior de la Tierra. Esta disminución es una consecuencia de actividades humanas que liberan agentes químicos que provocan directa e indirectamente la destrucción de este gas. Los registros obtenidos desde los años 70, tanto por mediciones satelitales (Reinsel et al, 1994; Bojkov et al. 1990) y terrestres (Hill et al, 1984; Reinsel et al, 1988), indicaban una disminución importante de la concentración de ozono, especialmente en la Antártida. Este fenómeno se atribuyó al aumento de emisiones de gases contaminantes, de origen antropogénico, como los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs), que aumentan la concentración de cloro y de bromo en la estratósfera (Cicerone et al, 1975, Rowland y Molina, 1975).

Obviamente, los países desarrollados, que mayoritariamente se encuentran en el hemisferio norte de América y Europa, generan la mayor cantidad de gases contaminantes de la atmósfera. Los altos índices de emisiones de estos gases, se deben al tipo de combustible que utilizan y a los procesos industriales que realizan. Contrariamente a lo esperado, el adelgazamiento de la capa de ozono no castiga a los países industrializados, verdaderos culpables de las emisiones que destruyen la capa de ozono, sino que ocurre en el hemisferio sur, en torno al polo. Dada la gran permanencia y estabilidad de estos agentes químicos, ellos circulan a través de la atmósfera por todo el planeta, acumulándose en los polos, principalmente en la Antártida, dadas las condiciones meteorológicas explicadas en párrafos anteriores.

La destrucción del ozono ocurre mediante una serie de reacciones químicas donde sustancias como los CFCs y otras, sufren fotólisis (ruptura de enlaces por acción de la luz), formando cloruro de hidrógeno (HCl) o nitrato de cloro (ClONO_2). Dichas moléculas no reaccionan con el ozono directamente, pero se descomponen lentamente formando átomos de cloro (Cl) y moléculas de monóxido de cloro (ClO) que son las que aceleran la destrucción del ozono. Estas reacciones ocurren sobre la superficie de las partículas que forman las nubes polares estratosféricas. Como resultado de este proceso se forma ácido nítrico (HNO_3), que permanece en las nubes, las que a su vez facilitan reacciones entre H_2O y HCl y los óxidos de nitrógeno (NO_x), formando más HNO_3 , el que permanece en las nubes. Además de las mencionadas, existen otras reacciones que participan en este proceso. Entre ellas las más importantes son:

- a. Sedimentación y desnitrificación. Las nubes crecen y descienden de la estratósfera, arrastrando el HNO_3 (desnitrificación). La desnitrificación aumenta la denoxificación (disminución de óxidos de nitrógeno).
- b. Fotólisis de los compuestos de cloro. El gas cloro (Cl_2) y el ácido hipocloroso (HOCl) producidos en las nubes estratosféricas polares, se rompen, ya que absorben rayos UV-A y visibles. Esta ruptura genera los radicales libres Cl y ClO .
- c. Destrucción catalítica del ozono por el átomo de cloro (Cl). Tanto el Cl y el ClO destruyen de manera eficaz el ozono. En estas reacciones participan de manera importante átomos de oxígeno. Sólo en la alta estratósfera y no en la parte baja, existe la cantidad suficiente para explicar el proceso de destrucción del ozono (Echarri, 1998; Atmósfera, 2016).

1.4 Compuestos químicos que destruyen el ozono

Las reacciones mencionadas en el punto 1.3, estarían involucradas en cerca del 70% de la pérdida del ozono. Otros mecanismos en los que participan átomos de cloro y bromo darían cuenta del resto del porcentaje de destrucción. Los agentes químicos contenidos en una serie de productos utilizados por el hombre, se pueden agrupar de la manera siguiente:

- a. Hidroclorofluorocarburos (HCFC)

Estos compuestos están formados por hidrógeno (H), cloro (Cl), flúor (F) y carbono (C). Se utilizan para reemplazar a los CFCs como gases refrigerantes. Poseen varias propiedades similares pero tienen la ventaja de ser menos dañinos para el ozono, ya que poseen una vida media más corta y liberan menos átomos de Cl. Sus potenciales de disminución del ozono están entre 0.01 y 0.1 (Ecured, 2016). Dado que siguen siendo dañinos para la capa de ozono, se consideran sólo una solución provisional y su uso ha sido prohibido en los países desarrollados a partir del año 1930 (Ecured, 2016).

- b. Halones (gases usados para extinguir incendios)

Estos compuestos están formados por bromo (Br), F y C. Generalmente se utilizan para fabricar extintores, dada su capacidad para apagar incendios. En muchos países su fabricación y uso están prohibidos, por la acción destructora del ozono. Posee un alto grado destructor ya que contiene Br, un elemento muy reactivo y efectivo, tanto que destruye más ozono que el Cl. Así, el halon 1301 (bromo-trifluorometano; Wikipedia, 2015) y el halon

1211 (bromo,cloro-difluormetano; Wikipedia, 2015) tienen potenciales de destrucción del ozono de 13 y 4 respectivamente (Ecured, 2016).

c. Bromuro de metilo (CH_3Br)

Este compuesto es utilizado en plaguicidas. Por su alta eficacia es utilizado para fumigar suelos y muchos cultivos. Al igual que los halones, también posee Br, aunque en menor cantidad. Su potencial de destrucción del ozono de 0.6. En muchos países se han fijado fechas alrededor del 2000, a partir de las cuales se prohibió usarlo (Ecured, 2016).

2. Consecuencias de la disminución de ozono

Durante mucho tiempo se especulaba que la reducción del ozono estratosférico resultaría en un aumento sustancial de la cantidad de radiación ultravioleta que alcanzaba la superficie de la Tierra (Teramura, 1986; NASA, 1988), particularmente en aquella radiación de longitud de onda más corta, conocida por ser la más activa biológicamente (Madronich, 1992). Todas estas suposiciones han sido corroboradas por la NASA y por mediciones en distintos lugares de la Tierra. Por ejemplo, registros obtenidos en octubre del año 2002 para la Región de Magallanes, encontraron una disminución de 42%, lo que produjo un aumento sustancial de radiación UV-B de un 80% (Casiccia et al. 2003). En general, se estima que cada 1% de reducción en la concentración de ozono, se produzca entre un 1.3-1.8% de aumento en la cantidad de esta radiación que alcanza la biósfera (Hollós, 2002).

No existen dudas acerca de los efectos dañinos de esta radiación en los seres vivos. Especialmente afectadas son las plantas, las que por su condición de organismos sésiles, no se pueden desplazar para evitarla. Tal como los otros organismos, las plantas “sienten” y responden a esta radiación. Se espera que cuando los niveles de radiación UV-B (280-320 nm) sean más altos que aquéllos encontrados en ambientes naturales, se produzcan una serie de alteraciones en las plantas. Existen numerosos trabajos científicos que han demostrado los efectos de esta radiación. Estos se extienden desde síntomas visibles en las hojas (descoloración, pérdida de pigmentos) hasta cambios importantes en procesos morfológicos y fisiológicos tales como, crecimiento (Miles, 1993), fotosíntesis (Middleton y Teramura, 1994) y floración (Flint y Caldwell, 1984). Las plantas pueden responder a este estrés aumentando la reflexión y la dispersión en la superficie de la hoja, o, absorbiendo parte de esta radiación dañina y así evitar su transmisión a los tejidos internos.

Obviamente, el interés por conocer los efectos de la radiación UV-B en la salud humana ha despertado el mayor interés. Los rayos UV-A y UV-B constituyen sólo una pequeña parte del espectro de la emisión solar: representan el 6.3% y

1.5% respectivamente, del total de la radiación del sol (Frederick et al. 1989). A pesar de ello, son la causa principal de los efectos dañinos sobre la piel. Los rayos UV-B son absorbidos por los ácidos nucleicos (Giese, 1964). Esto produce una gran cantidad de fotoproductos de ADN (Sancar y Sancar, 1988). La lesión del ADN más conocida y estudiada es la formación de dímeros de pirimidina (un tipo de bases nitrogenadas que forma el ADN). En estudios separados, los autores Mc Lennon y Eastwood (1986) y Pang y Hays (1991), encontraron que la formación de estos dímeros constituyen el 75% del daño total al ADN. Todos los cambios físicos en la estructura del ADN pueden conducir y propiciar una serie de mutaciones.

El mayor daño que provoca en la salud humana la radiación UV son los cánceres de piel, que comienzan cuando esta radiación afecta el ADN de los genes que controlan el crecimiento de las células de la piel. El factor principal en estos casos es la exposición excesiva y/o prolongada, ya sea de luz solar o de las lámparas y camas bronceadoras. Las personas que se exponen mucho a los rayos UV procedentes de estas fuentes tienen un mayor riesgo de cáncer de piel (ACS, 2016). Pero también hay otros efectos: envejecimiento prematuro de la piel, arrugas, pérdida de la elasticidad de la piel, manchas oscuras (pecas, algunas veces llamadas “manchas de envejecimiento” o “manchas del hígado”) y cambios precancerosos de la piel (tal como áreas ásperas, secas y escamosas llamadas *queratosis actínica*), afecciones a nivel ocular (cataratas). Los rayos UV son los causantes de las típicas quemaduras por exposición prolongada al sol (Wikipedia, 2016). En cantidades moderadas se activan los melanocitos (pigmentos de la piel humana), produciendo una coloración marrón en la piel (“bronceado”).

Además de los efectos en los seres humanos y las plantas, el aumento de la radiación UV ha tenido efectos negativos en todas las formas de vida y ecosistemas en la Tierra. Rozema (1999) ha reunido una gran cantidad de estudios científicos acerca de los efectos del aumento de la radiación UV en los ecosistemas ártico, antártico, sudamericano, mediterráneo, entre otros. Asimismo, los rayos UV son capaces de penetrar en diferentes tipos de agua afectando a los organismos que viven allí, especialmente al fitoplancton, un productor primario que es clave en los ciclos de la naturaleza. Una completa revisión de estos y otros efectos en los ecosistemas acuáticos se encuentra en Hader (1997).

También esta radiación afecta a los virus, bacterias y otros tipos de microorganismos. Aunque la resistencia y efectos dependen del tipo de microorganismo, las mutaciones en el ADN se incluyen dentro de las alteraciones. Cuando las bacterias, los virus y los protozoos se exponen a las longitudes de onda germicidas de la luz UV, se vuelven incapaces de reproducirse e infectar. Se ha demostrado que la luz UV es eficaz frente a microorganismos patógenos, como los causantes del cólera, la polio, la fiebre tifoidea, la hepatitis y otras enfermedades bacterianas, víricas y parasitarias (BVSDE, 2007).

Dado el efecto germicida de los rayos UV se utiliza en diferentes lugares para la esterilización de agua, materiales o gabinetes de trabajo (laboratorios y otros). La dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los

microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas, etc.) varía entre 6.000 y 10.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. La mayoría de los equipos de desinfección ultravioleta utilizan una exposición mínima (en el agua) de 30.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Esto es adecuado para inactivar las bacterias y virus patógenos, pero quizá no sea suficiente para ciertos protozoos patógenos, quistes de protozoos y huevos de nemátodos, que pueden requerir hasta 100.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ para su inactivación total (BVSDE, 2007).

3. La recuperación del ozono atmosférico

El aumento del deterioro de la capa de ozono creó una preocupación mundial en la sociedad. Esto llevó a científicos de todo el mundo a aunar esfuerzos, conocimientos y estrategias, desde las perspectivas de aquellas disciplinas involucradas en el estudio de este fenómeno, para intentar dar una solución o aminorar las causas a este grave problema ambiental. Esta preocupación traspasó el ámbito científico alcanzando círculos políticos, que culminaron con el llamado “Protocolo de Montreal” (PNUMA, 2000). En este acuerdo, los gobernantes de casi todos los países del mundo firmaron la prohibición de usar productos químicos cuyas emisiones de gases destruyen el ozono atmosférico. Este tratado internacional es considerado el acuerdo medioambiental más importante y exitoso.

Han pasado tres décadas desde la firma de este acuerdo y hoy los científicos presentan evidencias de que la causa principal de la recuperación ha sido el protocolo de Montreal, es decir, la prohibición de los CFCs que se usaban en la limpieza en seco, la refrigeración y los aerosoles como desodorantes y lacas. La sustitución de estos compuestos por otros igual de eficaces pero inocuos para la atmósfera ha resultado, por tanto, de importancia capital. Pero durante este tiempo hubo épocas de gran incertidumbre, especialmente, cuando el adelgazamiento de la capa de ozono antártico batió un récord, alcanzando su máximo histórico desde el año 2000: 25 millones de km^2 , en octubre de 2015. Este episodio récord, que fue atribuido por los científicos a la erupción del volcán Calbuco, en el sur de Chile (WMO, 2015) hizo surgir dudas acerca de si es posible identificar signos de “cura” en las regiones polares.

Desde el año 2000 existe evidencia de la recuperación de la capa de ozono (WMO, 2014) y esto ha sido relacionado con la reducción halocarbonos (Hofmann et al. 1997). Los datos incluyen: la cantidad de ozono; cambios en la composición vertical de la columna de ozono y la disminución de la extensión del “agujero”. Sin embargo, esta recuperación no depende exclusivamente de la disminución de los halocarbonos, ya que también existen factores meteorológicos que pueden influir en las tendencias de reducción del “agujero” de ozono (Livesey, 2015). Asimismo, desde los años 90, luego de la erupción del volcán Pinatubo, se ha informado de la influencia de las erupciones volcánicas en la disminución de ozono (Hofmann y Oltmans, 1993; Vernier et al. 2011).

Por otra parte, según la WMO (2014) y Newman et al (2006), la cantidad de gases halogenados que destruyen el ozono no ha aumentado en la estratósfera polar desde fines de los años 90, como resultado del Protocolo de Montreal. De acuerdo a estas mismas fuentes, el problema del adelgazamiento de la capa de ozono no puede considerarse resuelto hasta que la disminución no aparezca en octubre, mes durante el cual fue detectado por primera vez (Farman et al. 1985). En la Antártica, este mes presenta la mayor disminución de ozono que cualquier otro. Además, está sujeto a una gran variabilidad debido a fluctuaciones estacionales de temperatura, transporte, y aerosoles volcánicos.

Utilizando una serie de datos de ozono antártico total de octubre, posteriores al año 2000, obtenidos por satélites y en la estación Polo Sur, aplicados a cálculos de modelos matemáticos y, considerando factores como: modelos climáticos, interacciones químicas, temperatura, viento, química del ozono polar, propiedades de los aerosoles, emisiones de SO_2 de fuentes volcánicas, Solomon et al (2016), registraron la variabilidad en octubre, año a año. Ellos encontraron que la tendencia positiva en la recuperación de ozono no tenía certeza estadística. En contraste, otros meses con menor disminución y variabilidad que octubre, particularmente septiembre, mostraron una tendencia positiva de los datos en la recuperación de ozono, entre los años 2000-2014, los que son estadísticamente significativos.

Siguiendo la misma metodología comentada en el párrafo anterior, los autores analizaron las tendencias de los datos registrados por sondas para las estaciones Syowa y Polo Sur del mes de septiembre, entre los años 2000-2015. El análisis de los datos indica que existe un notorio aumento de ozono a partir del año 2000. Según los autores, estos datos deben tomarse con cautela, por un corrimiento del vórtex antártico pero son un claro signo de que la “cura” está ocurriendo. Las simulaciones obtenidas con los modelos matemáticos están de acuerdo con estos resultados y además, sugieren una contribución negativa de las erupciones volcánicas, en la destrucción química del ozono. Sin duda que estos resultados son consistentes con la idea general de que la reducción de sustancias halogenadas que disminuyen el ozono en la tropósfera, llevará a una recuperación del ozono polar que está observándose, a través del tiempo.

El estudio también indica que se espera que una disminución del área de extensión del “agujero de octubre” ocurra durante el siglo XXI, a medida que la destrucción por agentes químicos disminuya. Lo anterior no ha sido posible observarlo, en parte, por la variabilidad interanual y por las grandes dimensiones del suceso de octubre de 2015. Sin embargo, las observaciones mensuales de septiembre, muestran un “encogimiento” de 4.5 millones de km^2 , entre 2000-2015. Del mismo modo, de acuerdo a las simulaciones con modelos matemáticos, si la temperatura, condiciones dinámicas e influencia volcánica se mantuvieran como en 1999 hasta ahora, el “agujero de septiembre” se podría encoger cerca de 3.5 millones de km^2 , como resultado de la reducción de Cl y Br. Esto indica claramente el efecto que tiene la reducción de estos gases.

Los autores concluyen que luego de considerar factores como dinámica, temperatura y actividad volcánica, los resultados indican que una recuperación del “agujero” antártico está ocurriendo desde la aparición del Protocolo de Montreal. También destacan la importancia de usar datos combinados de bases terrestres y satélites, mediciones del aerosol volcánico y modelos clima-química en estos estudios acerca de la recuperación de la capa de ozono.

Sin duda que este hallazgo no ha dejado indiferente a nadie. La alegría y entusiasmo de los autores se puede apreciar en las declaraciones de la investigadora Susan Solomon, una geóloga del MIT (Massachusetts Institute of Technology, en Boston) al diario “Excelsior”, de México: “Ahora podemos confiar en que las cosas que hemos hecho han puesto al planeta en el camino de la curación”, dice. “Eso dice bastante de nosotros, ¿no? ¿No somos asombrosos los humanos, que creamos una situación tras la que decidimos colectivamente, como mundo, que íbamos a eliminar esas moléculas? Las eliminamos, y ahora estamos viendo que el planeta responde”. Sus declaraciones también fueron publicadas en el diario “El País”, de España (El País, 2016): “No es solo que el paciente esté en remisión”, comentó Solomon. “En realidad está mejorando. El paciente se enfermó de gravedad en la década de 1980, cuando bombeábamos todo ese cloro a la atmósfera”. Agregó: “Creo que es una tremenda causa de esperanza, para arreglar otros problemas ambientales, tales como el cambio climático provocado por el hombre”. “Sin embargo, los científicos dijeron que tomaría tiempo antes de que el problema se solucionara. Ahora la situación está mejorando, no solo estabilizándose, con base en nuevas observaciones con distintos métodos para medir la capa de ozono”, dijo Solomon.

El mundo científico tampoco quedó impávido, Mario Molina (Universidad de California en San Diego), que recibiera el Premio Nobel de Química en 1995, por sus aportes al estudio del adelgazamiento de la capa de ozono, elogió el estudio: “Hay una sensación de ´misión cumplida`” (El País, 2016).

4. Conclusiones

Las actividades humanas están afectando seriamente el planeta. El aumento de la destrucción del ozono atmosférico originado por la liberación de compuestos clorofluorocarbonados que se desprenden de productos utilizados para limpieza en seco, la refrigeración y los aerosoles como desodorantes y lacas es una muestra fehaciente de ello. A las causas naturales de la variación de ozono, tales como la temperatura, nubes estratosféricas, vientos, erupciones volcánicas que liberan gases azufrados al ambiente que tienen un efecto negativo en la capa de ozono, se le sumaron las de origen antropogénico y los efectos no demoraron en llegar. La disminución de ozono conllevó a un aumento sustancial de la radiación UV-B, conocida por ser muy activa biológicamente. Su absorción por proteínas y ácidos nucleicos trajo una serie de enfermedades y mutaciones en los seres humanos, además de otras alteraciones que sufrieron los demás

organismos vivos. En la primavera antártica (agosto y septiembre), el sol comienza a subir de nuevo después de varios meses de oscuridad, manteniendo el aire frío (vientos polares) atrapado sobre el continente. Todo esto provoca reacciones con la luz del sol, en las nubes de hielo y en los productos químicos hechos por el hombre, agotando considerablemente la capa de ozono. Esta situación se mantuvo durante décadas hasta que a partir del año 2000, se pudo revertir la tendencia destructiva. Para la esperanza mundial y la “salud” del planeta, el tratado internacional “Protocolo de Montreal”, firmado por casi todos los países del mundo tuvo éxito, y la disminución de emisiones de gases hacia la atmósfera impactó de manera positiva en el medio ambiente. Esto puede ser el principio de una nueva etapa, donde exista confianza por parte de la sociedad en la capacidad de los científicos y los acuerdos colectivos para solucionar problemas de carácter mundial.

5. Referencias

1. Barker, J. R. Jr. (1968). The availability of solar radiation below 290 nm and its importance in photomodification of polymers. *Photochem. and Photobiol.*, 7, 275.
2. Green, A.E.S., Sawada, T., y Shettle, E.P. (1974). The middle ultraviolet reaching the ground. *Photochem. and Photobiol.*, 19, 251-259.
3. Frederick, J.E., Snell, H.E., y Haywood, E.K. (1989). Solar ultraviolet radiation at the earth's surface. *Photochem. and Photobiol.*, 50, 443-450.
4. Sagan, C. (1961). On the origin and planetary distribution of life. *Radiation Res.*, 15, 174-192.
5. Cicerone, R.J., Stolarski, R.S., y Walters, S. (1974). Stratospheric ozone destruction by man-made chlorofluoromethanes. *Science*, 185, 1165-1167.
6. Rowland, F.S., Molina, M.J. (1975). Chlorofluoromethanes in the environment. *Rev. Geophys.*, 13, 1-36.
7. Farman, J.C., Gardiner, B.G., Shanklin, J.D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctic reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature*, 315, 207-210.
8. Stolarski, R.S. Krueger, A. J., Schoeberl, M.R., Mc Peters, R.D., Newman, P.A., Alpert, J.C. (1986). Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. *Nature*, 322, 808-811.
9. Reinsel, G.C., Tiao, G., Wuebbles, D.J., Kerr, J.B., Miller, A.J., Nagatini, R.M., Bishop, L., Ying, L.H. (1994). Seasonal trend analysis of published ground-based and TOMS total ozone data through 1991. *J. Geophys. Res.*, 92, 2201-2209.
10. Bojkov, R., Bishop, L., Hill, W.J., Reinsel, G.C., Tiao, G.C. (1990). A statistical trend analysis of revised Dobson total ozone data over the Northern Hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 95, 9785-9807.
11. Hill, W.J., Oehlert, G.W., Reinsel, G.C. (1986). Trend analysis sensitivity studies of Dobson total ozone data through 1984. *J. Geophys. Res.*, 91, 14515-14520.
12. Reinsel, G.C., Tiao, G.C., Ahn, S.K., Pugh, M., Basu, S., DeLuisi, J.J., Mateer, C.L., Miller, A.J., onnell, P.S., Wuebbles, D.J. (1988). An analysis of the 7-year record of SBUV satellite ozone data: Global profile features and trends in total ozone. *J. Geophys. Res.*, 93, 1689-1703.
13. Herman, J.R., Mc Peters, R., Larko, D. (1993). Ozone depletion of northern and southern latitudes derived from January 1979 to December 1991 total ozone mapping spectrometer data. *J. Geophys. Res.*, 98, 12783-12793.
14. Ziska, L.H., Teramura, A.H., Sullivan, J.H. (1992). Physiological sensitivity of plants along an elevational gradient to UV-B radiation. *Amer. J. Bot.*, 79, 863-871.
15. UK-SORG (1993). United Kingdom Stratospheric Ozone Review Group. Stratospheric ozone. London: HMSO.
16. NASA (1988). National Aeronautics and Space Administration, Executive summary of the ozone trends panel, NASA, Washington DC, USA.

17. Madronich, S. (1992). Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the earth's surface. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 37-40.
18. OMM (2016). Organización Meteorológica Mundial. <http://www.wmo.int/youth/es/ozono>. 30/08/2016.
19. ACS (2016). American Cancer Society. www.cancer.org. 30/08/2016.
20. Shettle, E.P., Green, A.E.S. (1974). Multiple scattering calculation of the middle ultraviolet reaching the ground. *Applied Optics*, 13, 1567-1581.
21. Casiccia, C., Kirchoff, V.W.J., Torres, A. (2003). Simultaneous measurements of ozone and ultraviolet radiation: spring 2000, Punta Arenas, Chile. *Atmos. Environ.*, 37, 383-389.
22. Stolarski, R.S., Bloomfiel, P., Mc Peters, R.D. (1991). Total ozone trends deduced from Nimbus 7 TOMS data. *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1015-1018.
23. Komhyr, W.D., Grass, R.D., Leonard, R.K. (1989). Total ozone, ozone vertical distributions, and stratospheric temperatures at South Pole, Antarctica, in 1986 and 1987. *J. Geophys. Res.*, 94, 11429-11436.
24. Echarri, L. (1998). Agujero de la capa de ozono. En: *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. Libro electrónico. Ed. Teide. <https://didactalia.net/comunidad/materialeducativo/recurso/ciencias-de-la-tierra-y-del-medio-ambiente-luis/3972a401-f117-41ed-b1dd-4fdab5794872>. 30/08/16.
25. Atmósfera (2016). http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/efect/efoz06.htm. 30/08/16.
26. NASA (2011). <http://www.quantum-rd.com/2011/10/nasa-agujero-en-la-capa-de-ozono-el.html#ixzz2gm6FCBVZ>. 31/08/16.
27. Efecto Coriolis (2016). Wikipedia, La enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Efecto_Coriolis&oldid=92589289. 31/08/16.
28. Ecured (2016). Enciclopedia cubana. http://www.ecured.cu/Agujero_de_ozono_ant%C3%A1rtico. 31/07/16.
29. Wikipedia (2015). La enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hal%C3%B3geno&oldid=82134037>. 02/09/16.
30. Teramura, A.H. (1986). Interaction between UV-B radiation and other stresses in plants. In: *Stratospheric Ozone Reduction, Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life*. Worrest, R.C., Caldwell, M.M. (eds.). NATO ASI series G: Ecological Sciences, Springer-Verlag, Berlín, 8, 327-343.
31. Hollósy, F. (2002). Effects of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron*, 33, 179-197.
32. Miles, D. (1993). Ultraviolet-B radiation effects on leaf fluorescence characteristics in cultivars of soybean in photosynthetic responses to the environment. In: *Photosynthetic Responses to the Environment*. Current Topics in Plant Physiology. Yamamoto, H.Y, Smith, C.M. (eds.), American Society of Plant Physiologists, USA, 8, 136-149.

33. Middleton, E.H., Teramura, A.H. (1994). Understanding photosynthesis, pigment and growth responses induced by UV-B and UV-A irradiances, *Photchem. Photobiol.*, 60, 38-45.
34. Flint, S.D., Caldwell, M.M., (1984). Partial inhibition of in vitro pollen germination by simulated solar ultraviolet-B radiation. *Ecology*, 65, 792-795.
35. Giese, A.C. (1964). *Photophysiology*, (Giese, A.C., ed.), 2, 203, Academic Press, New York.
36. Sancar, A., Sancar, G.B. (1988). DNA repair enzymes. *Ann. Rev. Biochem.*, 57, 29-67.
37. Mc Lennan, A.G., Eastwood, A.C. (1986). An endonuclease activity from suspension cultures of *Daucus carota* which acts upon pyrimidine dimers. *Plant Sci.* 46, 151-157.
38. Pang, Q., Hays, J.B. (1991). UV-B-inducible and temperature-sensitive photoreactivation of cyclobutane pyrimidine dimers in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.* 95, 536-543.
39. Wikipedia (2016). La enciclopedia libre.
https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiaci%C3%B3n_ultravioleta&oldid=92826126. 01/09/16.
40. Rozema, J. (1999). Stratospheric Ozone Depletion. The Effects of Enhanced UV-B Radiation on Terrestrial Ecosystems. Rozema, J. (ed.), Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
41. Hader, D.P. (1997). The Effects of Ozone Depletion on Aquatic Ecosystems. Hader, D.P. (ed.), R.G. Landes Company and Academic Press, Austin, USA.
42. BVSDE (2007). Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental.
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/desinfeccion/capitulo4.pdf>. 02/09/16.
43. PNUMA (2000). http://www.mma.gob.cl/1304/articles-49410_Protocolo_Montreal.pdf. 02/09/16.
44. WMO (2015). WMO Antarctic Ozone Bulletins: 2015.
www.wmo.int/pages/prog/arep/WMOAntarcticOzoneBulletins2015.html.
45. WMO (2014). World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme (WMO/UNEP), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 (Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 55).
46. Livesey, N.J., Santee, M.L., Manney, G.L. (2015). A Match-based approach to the estimation of polar stratospheric ozone loss using Aura Microwave Limb Sounder observations. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 9945–9963.
doi:10.5194/acp-15-9945-2015 [CrossRefGoogle Scholar](#)
47. Hofmann, D.J., Oltmans, S.J. (1993). Antarctic ozone during 1992: Evidence for Pinatubo volcanic aerosol effects. *J. Geophys. Res.* 98, 18555–18561.
doi:10.1029/93JD02092 [CrossRefGoogle Scholar](#)
48. Vernier, J.P., Thomason, L.W., Pommereau, J.P., Bourassa, A., Pelon, J., Garnier, A., Hauchecorne, A., Blanot, L., Trepte, C., Degenstein, D., Vargas, F. (2011). Major influence of tropical volcanic eruptions on the stratospheric

- aerosol layer during the last decade. *Geophys. Res. Lett.* 38, L12807.
doi:10.1029/2011GL047563 [CrossRefGoogle Scholar](#)
49. Newman, P.A., E. R. Nash, E.R., S. R. Kawa, S.R., S. A. Montzka, S.A., S. M. Schauffler, S.M. (2006). When will the Antarctic ozone hole recover? *Geophys. Res. Lett.* 33, L12814.
doi:10.1029/2005GL025232 [CrossRefGoogle Scholar](#)
50. Solomon, S., Ivy, D. J. ,Kinnison, D., Mills, M.J., Neely III, R.R., Schmidt, A. (2016). Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, DOI: 10.1126/science.aae0061
<http://science.sciencemag.org/content/early/2016/06/30/science.aae0061.full>
[. 05/09/16.