Artículos de Investigación

Deterioro de la capa de ozono estratosférico: Una revisión

Romo-Gómez, Claudia; Camacho-López, César; Marmolejo-Santillán, Yolanda; Otazo-Sánchez, Elena María

Claudia Romo-Gómez
claudiar@uaeh.edu.mx
Área Académica de Química, México
César Camacho-López
camachocesar22@gmail.com
Área Académica de Química, México
Yolanda Marmolejo-Santillán
Área Académica de Química, México
Elena María Otazo-Sánchez
Área Académica de Química, México

Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
ISSN-e: 2007-6363
Periodicidad: Semestral
vol. 7, núm. 13, 1-5, 2019
sitioweb@uaeh.edu.mx

URL: http://portal.amelica.org/ameli/journal/595/5952976016/

Autor de correspondencia: claudiar@uaeh.edu.mx

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Resumen: El ozono en la estratosfera forma parte de la capa atmosférica esencial para la preservación de la vida en la tierra, ya que sin su presencia los rayos UV-C llegarían directamente a los seres vivos, generando diferentes problemas de salud a los mismos. La literatura menciona que la capa de ozono ha entrado en una fase de deterioro a causa de la presencia de compuestos derivados de hidrocarburos saturados como los clorofluorocarbonos (CFC´s). Debido a la creciente preocupación de la comunidad científica, se han incrementado estudios con la finalidad de comprender el comportamiento o deterioro que tiene la capa de ozono y proponer medidas de mitigación para detener este fenómeno. El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión bibliográfica del estado actual del deterioro de la capa de ozono y conocer las posibles causas y consecuencias del mismo; asimismo, hacer conciencia sobre el uso de compuestos que contribuyen al deterioro de esta capa.

Palabras clave: Ozono estratosférico, radiación, clorofluorocarbonos, actividades antropogénicas.

Abstract: The ozone in the stratosphere is part of the atmospheric layer that helps the preservation of life on Earth, since without its presence the UV-C rays would reach directly to living things, generating different health problems to them. Scientific literature mention that the ozone layer has entered a phase of deterioration due to the presence of compounds derived from saturated hydrocarbons such as chlorofluorocarbons (CFC´s). Due to the growing concern of the scientific community, studies have been increased in order to understand the behaviour or deterioration of the ozone layer, and to propose mitigation measures to stop this phenomenon. The objective of this work was to make a bibliographical review of the current state of deterioration of the ozone layer and to know the possible causes as well as consequences of the same; likewise, to raise awareness about the use of compounds that contribute to the deterioration of this layer.

Keywords: Stratospheric ozone, radiation, chlorofluorocarbons, anthropic activities.

Notas de autor

claudiar@uaeh.edu.mx

1. Introducción

El ozono estratosférico, mejor conocido como capa de ozono (O_3), está formado por altas concentraciones del mismo (Ball y col., 2018), siendo esta una capa delgada que forma parte de la atmósfera y que cubre nuestro planeta (Figura 1). Actúa absorbiendo la luz ultravioleta proveniente del sol mediante mecanismos de dispersión generada por gases y vapor de agua (González y Salamanca, 2011). De ésta manera, la capa de ozono protege a los seres vivos de consecuencias negativas que podrían causar la exposición prolongada a radiación de los rayos tipo A (UV-A), B (UV-B) y C (UV-C) (Tabla 1) (Ball y col., 2018). Esta capa se encuentra en la estratosfera entre 15 a 50 km de altura desde la superficie terrestre (Figura 1) (Baird y Cann, 2012).

A partir de la década de los ochenta, dicha capa comenzó un proceso de deterioro, adelgazamiento y disminución de sus concentraciones, por lo cual ha sido uno de los temas de mayor interés en cuanto a investigaciones ambientales (Guerra y col., 2003). El deterioro de la capa de O_3 es a causa de la presencia de óxidos de nitrógeno (NO_X) (Denton y col., 2017), bromo (halocarburos) (Salomon y col., 2018) y cloro (Cl) en la atmósfera por el uso de los clorofluorocarbonos (CFC´s) (Baird y Cann, 2012), compuestos considerados dentro del grupo de gases de efecto invernadero (GEI) (Rivas y col., 2011). Los CFC´s destruyen las moléculas de O_3 que se encuentran en el medio ambiente, pues el Cl presente en su estructura reacciona con un átomo de oxígeno de la molécula de O_3 llevándolo hasta su forma molecular: O_2 (Manahan, 2010). También es importante mencionar que el cloro (Cl●) liberado a la atmósfera proviene del uso de sistemas de refrigeración, aire acondicionado, espumas y algunas otras formas que, mediante una serie de reacciones químicas liberan radicales libres de Cl●, estas reacciones se producen principalmente en zonas polares en donde existen cristales de agua (Baird y Cann, 2012). Cabe mencionar, que el uso de sustancias consideradas agotadoras de ozono (SAO) en conjunto con los CFC´s han sido un factor importante para la degradación de la capa de ozono en el mundo, pero en especial en la antártica, donde se ha generado un agujero en la capa, causando el paso directo de la radiación proveniente del sol.

PDF generado a partir de XML-JATS4R

TABLA 1

Tabla 1. Tipos de radiaciones y sus características a diferentes longitudes de onda (Tomado de Palomar 2011; Guerra 2018).

Tipo de radiación	Longitud de onda (λ)	Características
UV-C	<290 nm	Absorbido por la capa de ozono y no es compatible con la vida en la tierra
UV-B	290-320 nm	Principal causante de cáncer, por lo que penetra la epidermis.
UV-A	320-400 nm	Es la menos dañina de las anteriores, y se requieren grandes cantidades para que penetre en la epidermis
Visible	400-700 nm	Estimulan la retina
Infrarroja	700-760 nm	Provocan el calor

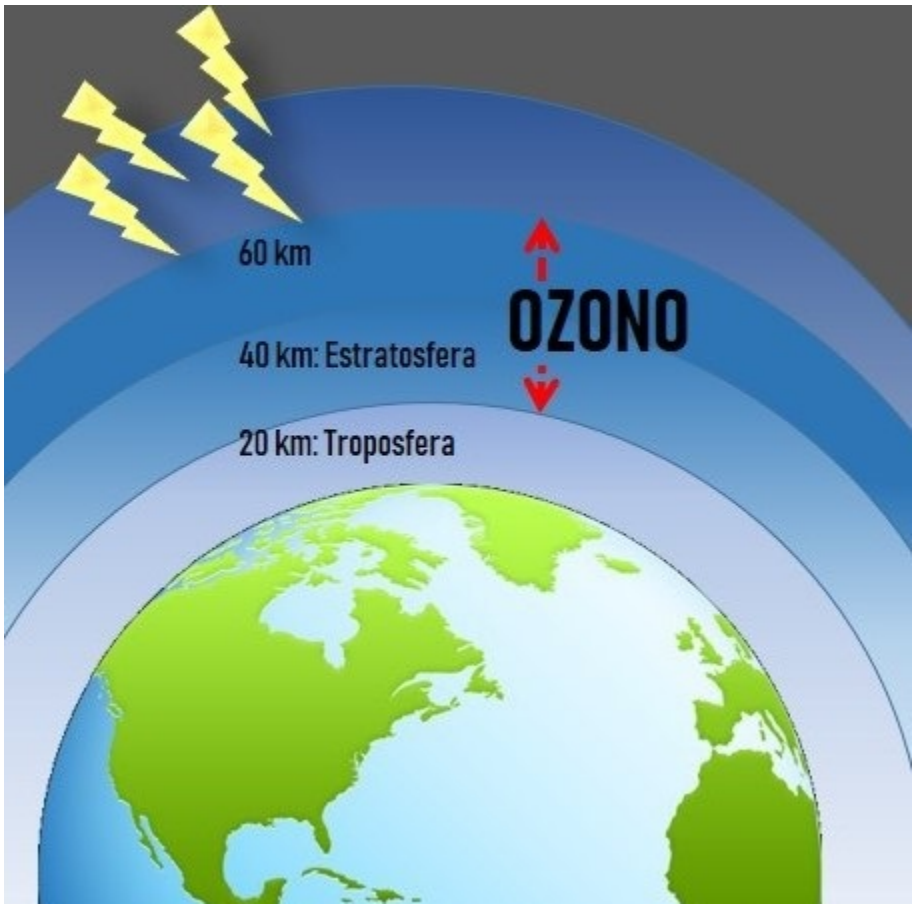

FIGURA 1.
Figura 1. Localización de la capa de ozono (Modificado de Sánchez 2008).

Atendiendo esta problemática, se firmó el convenio de Montreal en 1987 (San Juan y col., 2017). En este documento se estableció una normativa para el control de las emisiones de compuestos clorados a la atmósfera (Baird y Cann, 2012). Asimismo, después del descubrimiento de la destrucción de la capa de ozono, diversas investigaciones se han llevado a cabo, en donde algunos estudios afirman que la concentración global de O_3 registró una importante disminución del año 1979 a 1998, en un promedio de 10% y 15%, y del año 2000 a 2013 se ha regenerado cerca del 1% (Chen y col., 2017). Todo lo anterior es de preocupación a nivel mundial, porque el efecto de la destrucción de la capa de O_3 en los seres vivos que habitamos este planeta puede ser devastador.

2. Reacciones de los CFC´s

Las reacciones o la serie de pasos involucrados en la destrucción de O_3, en presencia de CFC´s, se describen a continuación:

Primeramente, la radiación ultravioleta UV-C incide sobre las moléculas de CFC´s para producir los átomos libres de $Cl\bullet$ (Ecuación 1). Estas especies químicas son muy reactivas, y se caracterizan por presentar un número impar de electrones, por lo que tienen una gran necesidad de completar los orbitales con parejas de electrones.

Una vez generados los átomos libres de cloro, estos se direccionan hacia la destrucción de una molécula de ozono (Ecuación 2), produciendo una de hipoclorito, el cual reacciona con otra de hipoclorito produciendo peróxido de cloro (Ecuación 3) y con ayuda de la misma radiación ultravioleta y las condiciones climáticas

polares reacciona y genera un átomo de cloro (Ecuación 4) y un radical libre de óxido de cloro, este radical más algún cuerpo que absorba energía reaccionan y se vuelve a general un radical libre de $Cl\bullet$ (Ecuación 5); así cada radical libre de $Cl\bullet$ formado destruirá una molécula de O_3, generando un ciclo de producción y destrucción del mismo (Ecuación 6).

$$CF_2Cl_2 \xrightarrow{hv} Cl^\bullet + CClF_2^\bullet \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$Cl^\bullet + O_3 \rightarrow ClO^\bullet + O_2 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$ClO^\bullet + ClO^\bullet \rightarrow ClOOCl \quad \text{(Ecuación 3)}$$

$$ClOOCl \xrightarrow{hv} ClOO^\bullet + Cl^\bullet \quad \text{(Ecuación 4)}$$

$$ClOO^\bullet + M \rightarrow Cl^\bullet + O_2 + M \quad \text{(Ecuación 5)}$$

$$2Cl^\bullet + 2O_3 \rightarrow 2ClO^\bullet + 2O_2 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Dónde *hv* está considerada como la luz solar, M un cuerpo que absorbe energía que puede ser una molécula de N_2 y $\bullet$ indica un radical libre.

La destrucción del O_3 estratosférico es de preocupación mundial, pues el paso de los rayos UV es inevitable y esta causando daño en los ecosistemas terrestres.

3. Actividades antropogénicas y el ozono estratosférico

La problemática de la destrucción del O_3 en la atmósfera, ha generado la necesidad de realizar monitoreos de la misma, para determinar las causas del desgaste y su comportamiento. Por ejemplo, Chen y col. (2017) realizaron un estudio de las concentraciones de O_3 en la meseta de Tíbet, en el sur de China. Esta meseta se caracteriza por ser la más alta y extensa de todo el mundo. Por ello es posible monitorear el comportamiento del aire contaminado y de otros gases como el O_3, se tiene conocimiento que el gas tiende a bajar de la estratosfera a la tropósfera en el verano. El estudio se llevó a cabo mediante datos obtenidos de tres sensores satelitales: Cartografía espectrométrica de O_3 total (TOMS), instrumento de medición de O_3 (OMI) y el espectrómetro de absorción de rastreo de imagen para cartografía atmosférica (SCIAMACH, por sus siglas en inglés). Los satélites utilizados fueron el Nimbus-7 y el Aura.

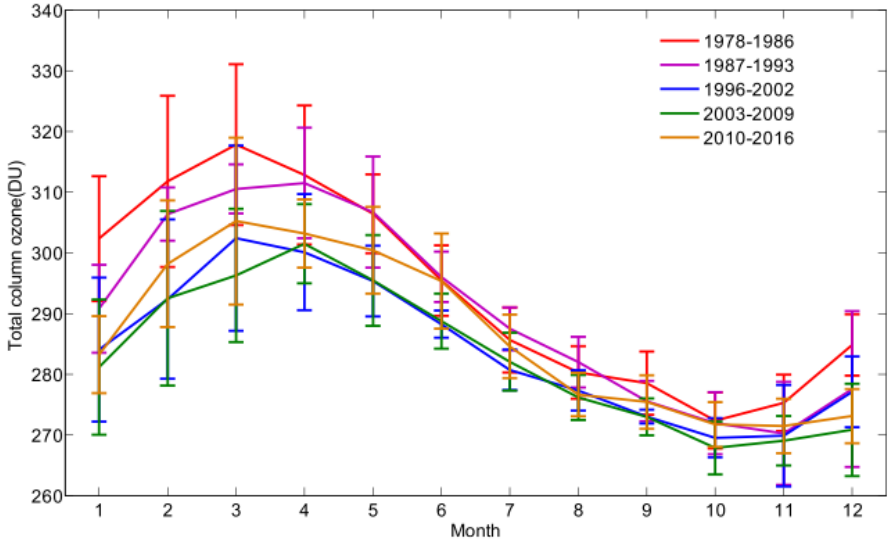

FIGURA 2.

Figura 2. Variaciones de las concentraciones de O_3de 1978 a 2016 (Tomado de Chen, 2017).

Se monitoreo la meseta del Tibet durante el periodo comprendido de noviembre de 1978 hasta julio del 2016. Los resultados revelan que de 1978 a 2016 se presentaron fluctuaciones de mínimas y máximas de O_3, por ejemplo, de 1978 a 2009 la tendencia de las concentraciones fue a la baja, pero de 2010 a 2016 las concentraciones de O_3 aumentaron con respecto a los periodos de 1996 a 2009 (Figura 2).

Un estudio realizado por Rojas y Rivas (2017), demuestra que, en la zona norte de Chile, muy cerca del ecuador, la radiación ultravioleta ha aumentado a causa de la destrucción de la capa de O_3. También el estudio demostró que la capa de O_3 se desgasta en los meses de enero y febrero, pero alcanzan su máximo en los meses de septiembre y octubre (Figura 3), esto se debe a los cambios de clima a lo largo del año, los autores afirman, que el desgaste se debe a factores, como la presencia de CFC´s, la alta nubosidad que se presenta en la temporada invernal y las bajas temperaturas, ya que como se mencionó anteriormente, la presencia de vapor de agua y el clima polar favorece la reacción entre el Cl● y el O_3.

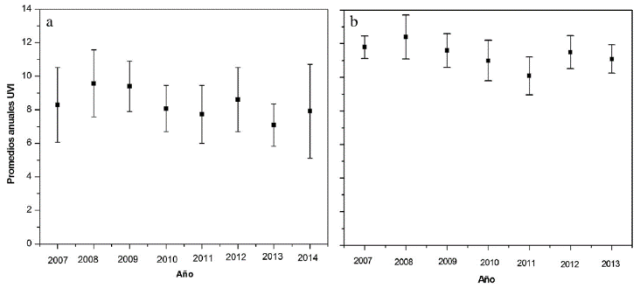

FIGURA 3.

Figura 3. Promedio de valores anuales de UVI a mediodía de 2007 a 2013 (Tomado de Rojas y Rivas 2017). Gráfico a: primavera, b: verano; c: otoño; d: invierno. Importar tabla

De este estudio se puede rescatar que el adelgazamiento de la capa de ozono permite el paso de la radiación ultravioleta caracterizada como la más peligrosa dentro de un rango entre 0 y 11, donde 11 es el valor considerado como el más nocivo para la salud humana. Del total de las mediciones, el 16.6% corresponde a valores entre 8 a 10, y 83.1% corresponde a valores extremos mayores a 11. A consecuencia de esto, la población se ve expuesta a padecer cáncer de piel por el paso de luz ultravioleta.

PDF generado a partir de XML-JATS4R

Algunas investigaciones demostraron que a partir del año 2013 la capa de O_3 se regeneraba (Chen y col., 2017), debido, principalmente al seguimiento del convenio de Montreal firmado en 1987, en el cual se establece la prohibición, producción y uso de CFC´s en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Sin embargo, en años recientes se ha encontrado que el O_3 de nueva cuenta se está agotando. Varias teorías han surgido, a causa de esta problemática, entre ellas la producción clandestina de compuestos clorados por alguna nación, otras como la generación de CFC´s a causa del no tratamiento de desechos de sistemas de enfriamiento como refrigeradores, aires acondicionados, etcétera. China es uno de los países de mayor producción y consumo de estos productos. Por ello, Duan y col. (2018) realizaron un estudio en este país, con el objetivo de demostrar si en verdad es una de las naciones que está contribuyendo mayoritariamente al agotamiento del O_3 estratosférico por las emisiones de CFC´s que van en aumento en la atmósfera. Los autores mencionan que la mala disposición de equipos de refrigeración y aire acondicionado después de su vida útil está causando la generación y emisión de gases clorados, y que pueden existir grandes fugas de los mismos, depositándose en la atmósfera. En la investigación se menciona que la venta y compra de refrigerantes y aires acondicionados (RAC´s) seguirá en aumento en los siguientes años, pero el uso de CFC´s disminuirá de 100,000 Kt (año 2017) a 10 Kt (año 2035), esto es posible por el desarrollo de nuevas alternativas ecológicas, como los compuestos hidrohaloalcanos (Manahan, 2010), cabe, resaltar, que si no existe una regulación clara y ecológica para el reciclaje de estos sistemas, las emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero (GEI) alcanzarán su punto máximo en el año 2025 de 135 ± 18.9 Mt CO_2, lo que significa un aumento de 350% aproximadamente, con respecto al año 2005 (Duan y col., 2018).

Por otro lado, Ball y col. (2018) realizaron una investigación en donde mencionan la dificultad para medir de una manera exacta el cambio en las concentraciones de O_3 estratosférico, pues la atmósfera en general está constituida por una mezcla de gases. Además, el cambio climático ha modificado en gran medida la homogeneidad de todo el medio ambiente dificultando las mediciones en la estratosfera. Los autores afirman que las concentraciones de O_3 en la parte superior de la estratosfera van en aumento, pero no en las partes media y baja. Asimismo, proponen dos teorías para la explicación de este fenómeno: 1) Los nuevos compuestos denominados sustancias de vida corta (VSLS por sus siglas en inglés) como disolventes, decapantes y desengrasantes, han provocado este cambio, ya que contienen cloro y bromo en su estructura, 2) el cambio climático podría estar modificando la dirección de las corrientes de aire que mueven estas masas hacia y a través de la estratosfera a ambientes ideales para la destrucción de la capa de O_3 por CFC´s.

4. Efectos del deterioro de la capa de ozono

La literatura menciona que el paso de los rayos UV a causa del desgaste de la capa de O_3, trae consigo afectaciones en los organismos de la tierra. Por ejemplo, el paso de la radiación UV-B a través de la capa de O_3, podría favorecer la desaparición del fitoplancton que es el alimento principal de la vida marina, esto compromete la biota acuática e incluso se corre el riesgo de su extinción (Viñegla y López-Figueroa, 2009). En cuanto a las plantas es probable que el O_3 tenga efectos adversos en su crecimiento. Asimismo, los organismos patógenos necrotróficos pueden colonizar las plantas, las cuales han sido debilitadas por O_3 a un ritmo acelerado (Manning y Tiedemann, 1995). Del mismo modo, en los seres humanos provoca el aumento en los casos de enfermedades como cataratas y cáncer en la piel, debido a que el DNA celular absorbe la radiación tipo UV-B (Palomar, 2011), en este sentido las personas con color de piel claro que carecen de melanina, se ven más vulnerables a padecer estas enfermedades (Manahan 2010).

PDF generado a partir de XML-JATS4R

5. Conclusiones.

El presente trabajo describe la importancia que tiene la capa de O_3, como escudo protector para la tierra y los seres vivos. Es importante mencionar que no solo sustancias como los CFC´s han contribuido a la degradación de la capa de ozono, sino factores como el cambio climático que ha generado la modificación de las corrientes de aire que llevan el ozono a la estratosfera, contribuyendo a que altas concentraciones de ozono se mantenga en la troposfera donde su toxicidad es muy alta para los seres vivos.

La capa de ozono continúa degradándose desde los años ochenta a la fecha, a pesar de que en el convenio de Montreal se prohibió el uso de sustancias agotadoras de O_3. Esta prohibición ha contribuido positivamente para que en un periodo corto se observara una regeneración de esta capa. Sin embargo, la aparición de nuevos compuestos de vida corta, dificulta su restablecimiento, por lo que debe de realizarse una modificación a los protocolos y convenios, como el de Montreal para que se prohíba la producción de estos nuevos compuestos que degradan la capa de O_3. De igual manera, como sociedad debemos ir incorporando actividades en nuestra vida, tales como usar menos combustibles fósiles, para contribuir a la preservación y recuperación de la capa de ozono.

6. Referencias.

Baird, C. y Cann, M., (2012), *Química ambiental,* Barcelona, España: Reverté, S. A.

Ball, W., Alsing, J., Mortlock, D., Staehelin, J., Halgh, J., Peter, T., Tummon, F., Stubi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R. y Rozanov, E. V. (2018). Evidence for a continous decline in lower stratospheric ozone offsertting ozone layer recovery. *Atmospheric chemistry and physics, 1*(18), 1379-1394.

Chen, S. B., Zhao, L. y Tao, Y. L. (2017). Stratospheric ozone change over the Tibetan Plateau. *Atmospheric Pollution Research, 8*(2017), 528-534.

Denton, M. H., Kivi, R., Ulich, T., Rodger, C.J., Cliverd, M. A., Horne, R. B. y Kavanagh, A. J. (2017). Solar proton events and stratospheric ozone depletion over northern Finland. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 30*:1-10.

Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., Zeng, X., Yu, K., Huang, Q., Zuo, J., Qin, Y. y Li, J. (2018). Chilling prospect: Climate change effects of mismanaged refrigerants in China. *Enviromental science y technology, (52),* 6350-6356.

González, J. C. y Salamanca, J. (2011) Absorción por ozono y dispersión por aire de la radiación solar ultravioleta B. *Revista U.D.C.A Actualidad y divulgación científica, 14*(12), 151-159.

Guerra, A. (2018). Indicaciones y aplicaciones de la fotoprotección. *Protocolos de práctica asistencial, 12*(47), 2811-2814.

Guerra, J. C., Rodríguez, Arencibia, M. T. y Crespillo, M. (2003). El ozono superficial y su papel en el sistema atmosférico. *Información tecnológica, 14*(2), 3-12.

Manahan, S. (2010). Environmental Chemistry. Boca Raton: CRC Press.

Palomar, F. (2011). ¿El cambio climático afectará a la piel?. *Formación dermatológica, 1*(13-14), 8-15.

Rivas, M., Leiva, C. y Rojas, E. (2011). Estudios de series temporales de energía solar UV-B de 305 nm y espesor de la capa de ozono estratosférico en Arica, norte de Chile. *Ingeniare, (19)*2, 168-173.

Rojas, E. y Rivas, M. (2017). Índice solar ultravioleta y espesor de la capa de ozono en Arica norte de Chile. *Interciencia, 42*(2), 115-118.

Manning, W. J. y Tiedemann, A. 1995. Climate change: Potential effects of increased atmospheric Carbon dioxide (CO2), ozone (O3), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Evironmental Pollution*, 88 (2) 219-245. https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)91446-R.

Salomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely III, R. R. y Schmidt, A. (2018). Emergence of healing in the Antartic ozone layer. *Science, 353*(1), 269-274.

San Juan, Y. I., Gómez D., A. L. y Romero R., F .I. (2017). Sistema de gestión de inventario de sustancias agotadoras de la capa de ozono. *Tecnura, 21*(54), 59-67.

Sánchez, M. V. (2008). La capa de ozono. *Biocenosis, 21*(1-2), 65-68.

Viñegla, B, y López-Figueroa, F. (2009). Efecto de la radiación UV solar y artificial sobre la fotosíntesis y la actividad anhidrasa carbónica en macroalgas intermareales del sur de España. Ciencias marinas, 35(1), 59-74. Recuperado en 15 de octubre de 2018 de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802009000100005&lng=es&tlng=es.

Notas

English Summary Deterioration of the stratospheric ozone layer: A review.