

Preguntas y Respuestas acerca de los Efectos de la Disminución del Ozono, la Radiación Ultravioleta y el Clima en los Humanos y el Medio Ambiente

Suplemento del Reporte de Evaluación
2022 del Panel de Evaluación de los Efectos
Ambientales de las Naciones Unidas



Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas
Secretariado Ozono
P.O. Box 30552
Nairobi, 00100
Kenia

Publicado en línea en Enero 2024

ISBN: 978-9914-733-81-5

Coordinación y Edición: Germar H. Bernhard, Roy Mackenzie-Calderón, Rachele Ossola y Janet F. Bornman.

Autores: Mads P. Sulbæk Andersen, Anthony L. Andrady, Alkiviadis F. Bais, Paul Barnes, Germar H. Bernhard, Scott N. Byrne, Anu M. Heikkilä, Rachael Ireland, Marcel A. K. Jansen, Sasha Madronich, Richard L. McKenzie, Rachel Neale, Patrick J. Neale, Rachele Ossola, Qing-Wei Wang, Sten-Åke Wangberg, Christopher C. White, Stephen R. Wilson y Richard G. Zepp.

Autores Colaboradores: Pieter J. Aucamp, Anastazia T. Banaszak, Marianne Berwick, Janet F. Bornman, Laura S. Bruckman, Bente Foereid, Donat-P. Häder, Loes M. Hollestein, Wen-Che Hou, Samuel Hylander, Andrew R. Klekociuk, J. Ben Liley, Janice D. Longstreth, Robyn M. Lucas, Roy Mackenzie-Calderón, Javier Martinez-Abaigar, Catherine M. Olsen, Krishna K. Pandey, Nigel D. Paul, Lesley E. Rhodes, Sharon A. Robinson, T. Matthew Robson, Kevin C. Rose, Tamara Schikowski, Keith R. Solomon, Barbara Sulzberger, Craig E. Williamson, Seyhan Yazar, Antony R. Young, Liping Zhu, Meifang Zhu.

Equipo de Producción: Roy Mackenzie-Calderón y Rachele Ossola (Coordinadores), y Alejandro Pérez-Velásquez (Diseñador Gráfico).

Este documento deberá ser citado como: Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP), Preguntas y Respuestas acerca de los Efectos de la Disminución del Ozono, la Radiación Ultravioleta y el Clima en los humanos y el Medio Ambiente. Suplemento del Reporte de Evaluación 2022 del Panel de Evaluación de los Efectos en el Medio Ambiente de las Naciones Unidas, UNEP; 25pp. UNEP: Nairobi, 2023.

Este documento está disponible en línea en la siguiente dirección:
<https://ozone.unep.org/sites/default/files/documents/EEAP-assessment-report-2022-QA-SP.pdf>

Las imágenes de este documento son de dominio público y pueden ser utilizadas sin permiso. Se insta a la atribución de este documento si es citado en otro.

Portada: Vista desde el Pico Tahquitz, Sur de California, hacia el Este. La radiación de la puesta de sol está atenuada por el humo y la bruma de un incendio; se ilustra el efecto de los aerosoles sobre los rayos ultravioleta y la radiación visible. Foto: Germar H. Bernhard



Preguntas y Respuestas acerca de los Efectos de la Disminución del Ozono, la Radiación Ultravioleta y el Clima en los Humanos y el Medio Ambiente

Coordinación y Edición

Germar H. Bernhard, Roy Mackenzie-Calderón, Rachele Ossola y Janet F. Bornman.

Autores

Mads P. Sulbæk Andersen, Anthony L. Andrady, Alkiviadis F. Bais, Paul Barnes, Germar H. Bernhard, Scott N. Byrne, Anu M. Heikkilä, Rachael Ireland, Marcel A. K. Jansen, Sasha Madronich, Richard L. McKenzie, Rachel Neale, Patrick J. Neale, Rachele Ossola, Qing-Wei Wang, Sten-Åke Wangberg, Christopher C. White, Stephen R. Wilson y Richard G. Zepp.

Autores Colaboradores

Pieter J. Aucamp, Anastazia T. Banaszak, Marianne Berwick, Janet F. Bornman, Laura S. Bruckman, Bente Foereid, Donat-P. Häder, Loes M. Hollestein, Wen-Che Hou, Samuel Hylander, Andrew R. Klekociuk, J. Ben Liley, Janice D. Longstreth, Robyn M. Lucas, Roy Mackenzie-Calderón, Javier Martínez-Abaigar, Catherine M. Olsen, Krishna K. Pandey, Nigel D. Paul, Lesley E. Rhodes, Sharon A. Robinson, T. Matthew Robson, Kevin C. Rose, Tamara Schikowski, Keith R. Solomon, Barbara Sulzberger, Craig E. Williamson, Seyhan Yazar, Antony R. Young, Liping Zhu y Meifang Zhu.

Equipo de Producción

Roy Mackenzie-Calderón & Rachele Ossola (Coordinadores) y Alejandro Pérez-Velásquez (Diseñador Gráfico).

Traducción al Español

Roy Mackenzie-Calderón, Anastazia T. Banaszak, Brenda Riquelme-Del Río, Félix Zamorano-Banda

Tabla de contenidos

Introducción.....	1
Preguntas y Respuestas.....	2
P1 ¿Qué es y por qué nos preocupa la radiación UV?	2
P2 ¿Cómo ha cambiado la radiación UV en el pasado y cuáles son los cambios pronosticados para el futuro?..	5
P3 ¿La disminución del ozono ha afectado al clima y a las condiciones del tiempo?	7
P4 ¿Cuáles son los efectos dañinos de la exposición al sol en la salud humana?	9
P5 ¿Cuáles son los beneficios de exponerse al sol?	12
P6 ¿Cuáles son los efectos de la radiación UV en las plantas y en los ecosistemas terrestres?	14
P7 ¿La radiación UV afecta a los ríos, lagos y océanos?	16
P8 ¿El cambio climático afecta a la radiación UV-B en los ambientes acuáticos?.....	17
P9 ¿Los cambios de radiación UV pueden afectar la calidad del aire?	18
P10 ¿Los químicos que reemplazan a las sustancias agotadoras del ozono provocarán nuevos problemas ambientales?.....	19
P11 ¿Cómo afecta la exposición a la radiación UV a la vida útil de los materiales en el exterior?.....	20
P12 ¿Cuál es la relación entre los microplásticos y la radiación solar UV?.....	22
Fuente de las imágenes	23
Lista de Acrónimos	24
Autores y Colaboradores	25

Introducción

Esta colección de preguntas y respuestas fue preparada por el Panel de Evaluación de los Efectos en el Medio Ambiente (EEAP por sus siglas en inglés) del Protocolo de Montreal bajo el amparo del Programa para el Medio Ambiente de las Naciones Unidas (PNUM). Este documento es un complemento de la Evaluación Cuatrienal 2022 realizada por el EEAP (<https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap>), y provee de información interesante y útil para redactores de políticas públicas, maestros y científicos. Este P&Rs está escrito en un lenguaje de fácil comprensión para el público en general.

El Protocolo de Montreal es un tratado internacional cuyo objetivo es la protección de la capa de ozono, la cual resguarda la vida en nuestro planeta de los daños de la radiación ultravioleta (UV) que proviene del sol. El Tratado fue acordado por todos los estados miembros de las Naciones Unidas y apunta a limitar las emisiones de sustancias químicas a la atmósfera de la Tierra que dañan la capa de ozono. Estas sustancias son llamadas “sustancias agotadoras de ozono” o simplemente SAO. Como parte del Protocolo de Montreal, se establecieron varios entes consultivos para evaluar anualmente los avances científicos más relevantes sobre los cambios en la capa de ozono y cómo éstos pueden afectar la vida en la Tierra; así como evaluar las tecnologías alternativas que pudieran permitir la eliminación de las SAO de la atmósfera. El Panel de Evaluación de Efectos Ambientales de las Naciones Unidas (EEAP-UNEP) es uno de estos entes consultivos que evalúa los efectos medioambientales de la disminución o reducción de la capa de ozono.

En este Suplemento de Preguntas y Respuestas (P&Rs) se aborda la importancia de la radiación ultravioleta para la vida en la Tierra considerando tanto sus efectos dañinos como beneficiosos. También, se describen los cambios de la radiación ultravioleta que han ocurrido en el pasado y que vuelven a suceder en el

siglo 21, algunos relacionados con el cambio climático. Este P&Rs se enfoca en las consecuencias de los cambios en el ozono sobre la salud humana y la vida en los suelos, lagos y océanos.

El lector encontrará que el alcance de este P&Rs refleja las conexiones entre asuntos de la vida que son importantes y variados. Además de tener un rol biológico y una función en la atmósfera, la radiación ultravioleta, el ozono y el cambio climático juegan un papel en la calidad del aire que respiramos. Las dos últimas preguntas y respuestas se basaron en los efectos de la radiación ultravioleta en la contaminación de los plásticos en los suelos y en los océanos.

Las preguntas y respuestas en este suplemento resaltan el papel crucial del Protocolo de Montreal en la protección de la vida en la Tierra. Tomadas en conjunto, las preguntas en este suplemento aspiran a incrementar nuestra comprensión de tal protección, de modo que podamos continuar dedicándonos a encontrar vías innovadoras para mantener la sustentabilidad medioambiental y nuestra calidad de vida.

Janet F. Bornman
Co-Presidente, Panel de Evaluación de los Efectos sobre el Medioambiente

P1

¿Qué es y por qué nos preocupa la radiación ultravioleta?

La radiación solar ultravioleta es parte de la radiación electromagnética originada en el sol. En contraste con la luz visible, la radiación UV es invisible y tiene más carga energética. Debido a su alta carga de energía, la radiación UV puede romper los enlaces químicos de las moléculas como el ADN incluso dentro de las células, una molécula que contiene el código genético de los organismos. Un daño en esta molécula puede resultar en múltiples efectos en la salud, incluyendo algunos tipos de cáncer de piel. Además, puede causar efectos adversos en la agricultura y en la vida acuática, y puede afectar la duración de materiales de exterior como plásticos y pinturas. Sin embargo, bajas dosis de radiación UV es beneficioso para la salud humana, al gatillar la producción de vitamina D en la piel y matar patógenos.

Hay diferentes tipos de radiación ultravioleta. La radiación UV está dividida en UV-C, UV-B y UV-A. La UV-C es el tipo más energético y exponerse a ella es particularmente perjudicial para todo tipo de formas de vida. Afortunadamente, la radiación UV-C es absorbida completamente por las moléculas de oxígeno y ozono a gran altura en la atmósfera terrestre (Figura P1-1). Mucha de la radiación UV-B emitida por el sol es también absorbida por la capa de ozono; sin embargo, una parte de ésta llega a la superficie de la Tierra. En los humanos, la exposición a la radiación UV-B puede causar quemaduras, aumenta el riesgo de cáncer a la piel y cataratas, y suprime el sistema inmunológico (ver P4). La excesiva exposición a la radiación UV-B puede además dañar a las plantas terrestres, incluyendo cosechas (ver P6), ecosistemas acuáticos (ver P7) y a los materiales usados para la construcción y en productos textiles (ver P11). La radiación UV-A es la menos energética y es débilmente absorbida por la capa de ozono, pero aún así puede causar algunos efectos adversos en la salud, como el envejecimiento prematuro de la piel.

El Índice UV es una medida de la cantidad de daño de radiación UV en la salud humana. La intensidad de la radiación solar UV relevante para la salud humana es generalmente cuantificada con el Índice UV, el cual es una medida de la cantidad de radiación que causa quemadura (también llamada "eritema"). El Índice UV se forma a partir de la radiación solar UV-B (90%) y UV-A (10%) respectivamente.

NIVELES DE EXPOSICIÓN	ÍNDICE UV
BAJO	< 2
MODERADO	3 a 5
ALTO	6 a 7
MUY ALTO	8 a 10
EXTREMO	11 +

Tabla P1-2. Relación entre categoría de exposición y rangos del Índice UV.

El Índice UV es una escala reconocida internacionalmente y fue introducido para aumentar la conciencia pública acerca de los efectos perjudiciales de la radiación UV en la salud humana. El índice UV enfatiza la necesidad del uso de medidas personales de protección (Figura P1-2). Por ejemplo, cuando el Índice UV es moderado o alto, la advertencia de la Organización Mundial de la Salud es "busque sombra, use camiseta, aplíquese abundante protector solar, y utilice sombrero". Cuando el Índice UV es muy alto o extremo, la advertencia es evitar permanecer en el exterior durante esas horas; o buscar sombra, y aplicar una crema con alto factor de protección solar.

Varios factores afectan la intensidad de la radiación UV. En días sin nubes, los principales parámetros que determinan la intensidad de la radiación UV en la superficie de la

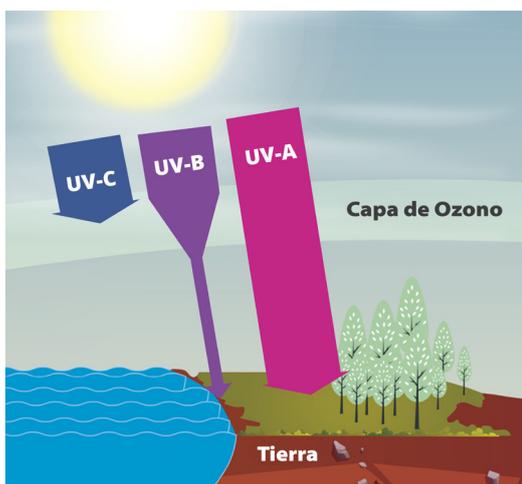
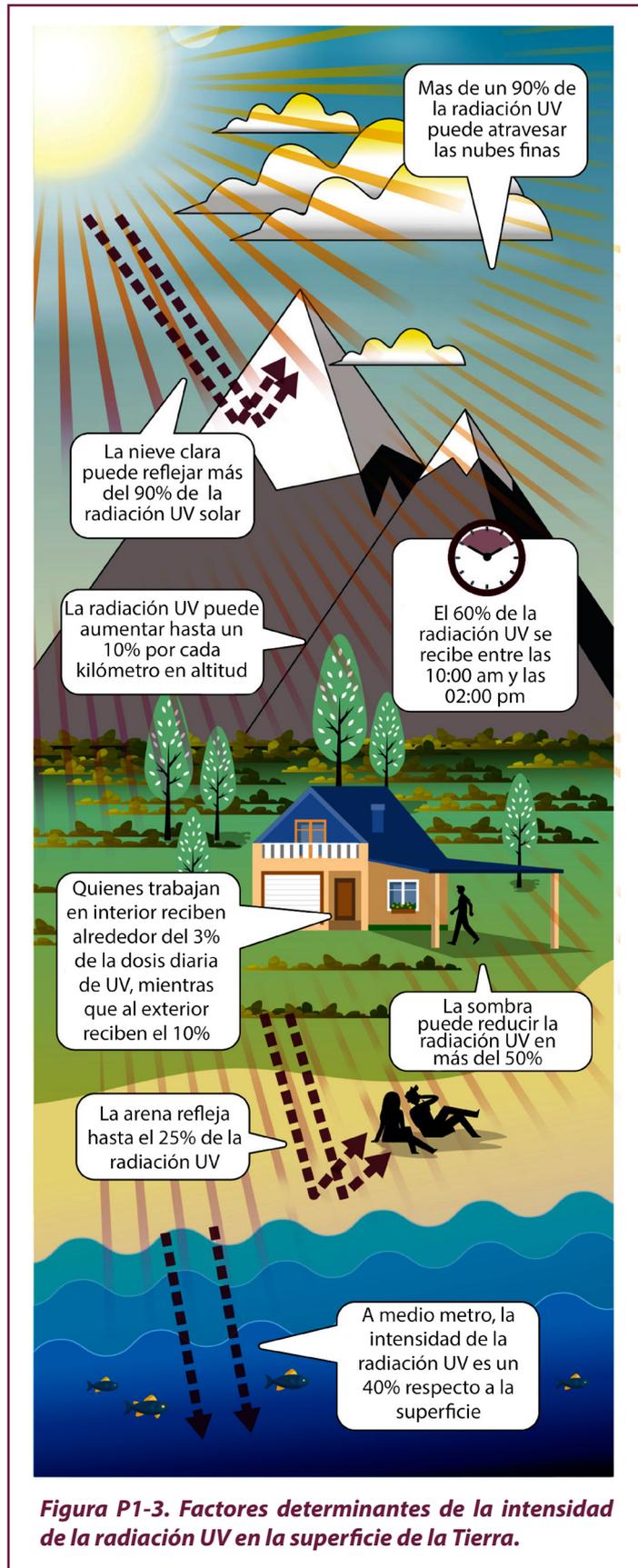


Figura P1-1. La capa de ozono en la atmósfera protege a la superficie de la Tierra de la radiación UV perjudicial. La capa de ozono rodea por completo a la Tierra y está principalmente localizada entre 15 y 40 kilómetros sobre el nivel del mar, en la estratósfera terrestre. La radiación UV-C es absorbida por completo por la atmósfera superior; la radiación UV-B es parcialmente absorbida; y la radiación UV-A y otras ondas de longitud (como la luz visible y la radiación infrarroja) son absorbidas débilmente. La disminución de la capa de ozono aumenta significativamente la cantidad de radiación UV-B. Prevenir la disminución excesiva de la capa de ozono, la cual incrementa la exposición humana a la radiación UV-B, es el objetivo principal del Protocolo de Montreal (Ver P2). La radiación UV es parte de la radiación electromagnética originada en el sol. Los científicos clasifican tres tipos de radiación UV de acuerdo a su longitud de onda, medida en nanómetros (nm): UV-C en rangos desde 100 a 280 nm, UV-B desde 280 a 315 nm y UV-A desde 315 a 400 nm (1 nanómetro equivale a 1 milmillonésimo de metro).

Tierra son la elevación del sol por encima del horizonte y la cantidad de ozono en la atmósfera en una zona específica. En consecuencia, la intensidad de la radiación UV es más alta en los trópicos, donde, al mediodía, el sol está elevado; y donde la cantidad de ozono es menor que en latitudes medias. La radiación UV también es atenuada por las partículas suspendidas en la atmósfera como el polvo, humo, hollín, y la sal del mar, denominadas en conjunto "aerosoles" (ver P9). Las medidas para restringir la contaminación del aire en las ciudades y en las regiones industriales reducen los aerosoles;



por lo tanto, contribuyen a restaurar la radiación UV a niveles equivalentes a los de una atmósfera más limpia (ver además **Figura P2-2**). La radiación UV también se ve influida por la altitud, los cambios estacionales que corresponden a la separación del Sol y la Tierra, y el reflejo del suelo o albedo (**Figura P1-3**). Por ejemplo, la nieve refleja más del 90% de la radiación UV, y una pequeña parte de esta radiación se esparce hacia el suelo. En estas condiciones, el Índice UV puede ser superior al 60% si es que la superficie está cubierta por nieve en comparación con superficies sin nieve. Las nubes pueden reducir hasta el 90% de la radiación UV, pero esta reducción es menor en comparación con la radiación visible. Las nubes delgadas, como los cirrus, tienen menos efecto en la intensidad de la radiación UV que llega a la superficie terrestre. De esta manera, la radiación UV puede causar quemaduras en días nublados. Por otra parte, las nubes que no ocultan el sol pueden conducir a un aumento de la radiación UV que puede exceder la radiación UV en cielos sin nubes. La intensidad de la radiación en la capa más superficial del agua también puede ser alta y depende de la claridad del agua, la cual se ve enormemente afectada por las partículas orgánicas disueltas (ver P7).

La reducción de la capa de ozono conduce al aumento del Índice UV. En una determinada elevación solar, el Índice UV depende considerablemente de la cantidad de ozono en una columna vertical desde la superficie de la Tierra hasta el punto más alto de la atmósfera (**Figura P1-4**). Esta columna se refiere a la llamada "Ozono total" y se reporta en Unidades Dobson (UD). Una UD corresponde a un hipotético nivel de ozono puro con un espesor de 0.01 milímetros cuando está comprimido por la presión en la superficie terrestre. El promedio global de la columna de ozono en la atmósfera es de 300 UD, que equivaldría a un espesor de ozono de 3 mm de espesor a nivel del mar (la altura de dos monedas comunes).

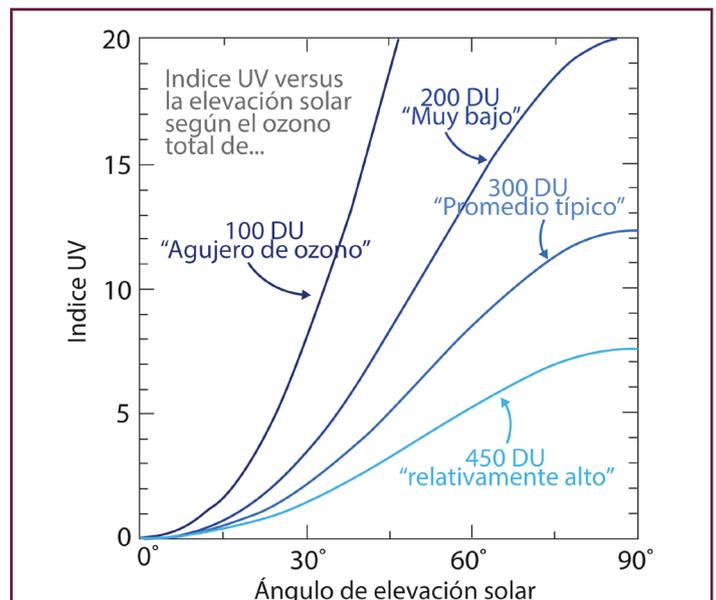
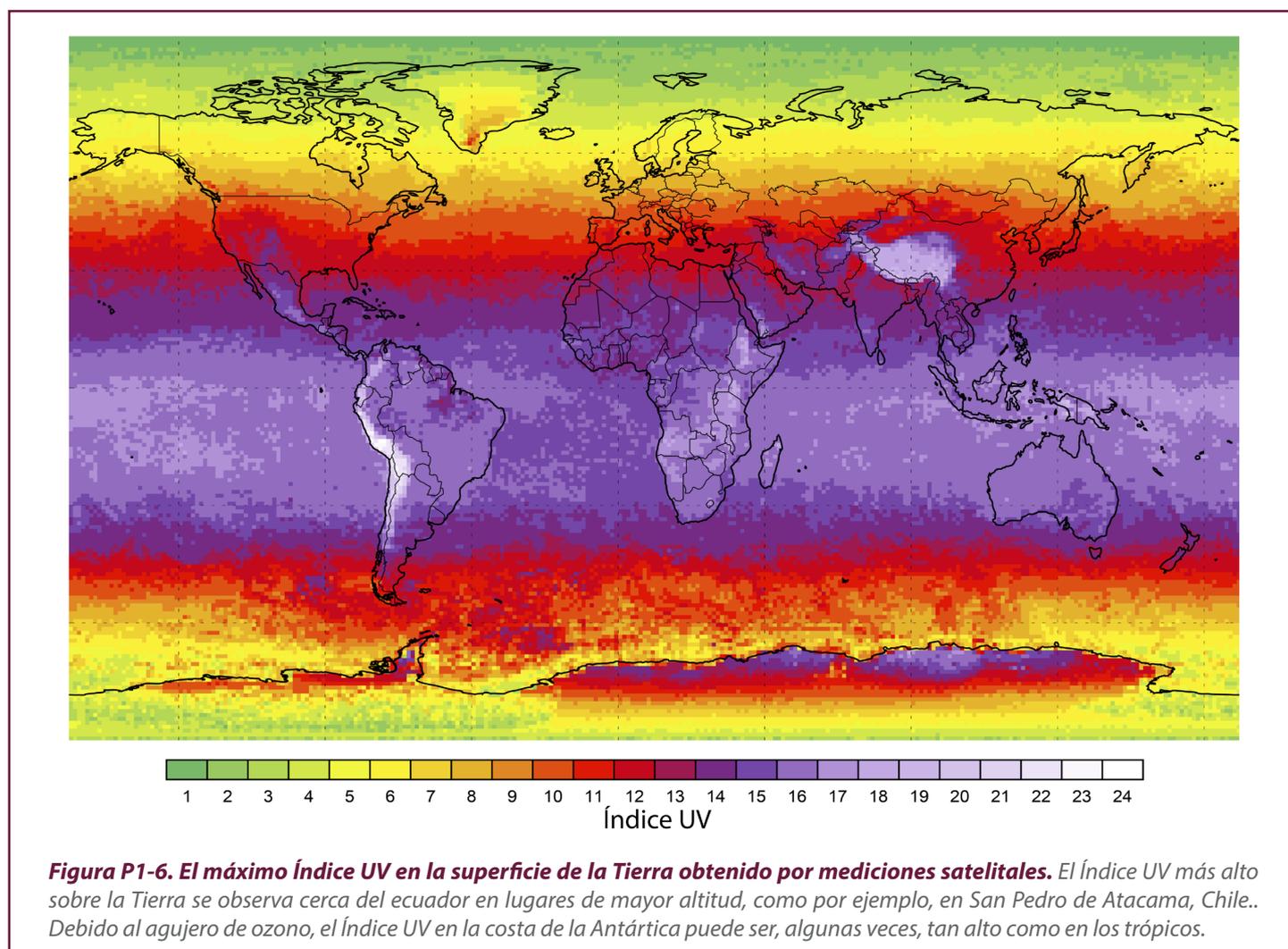
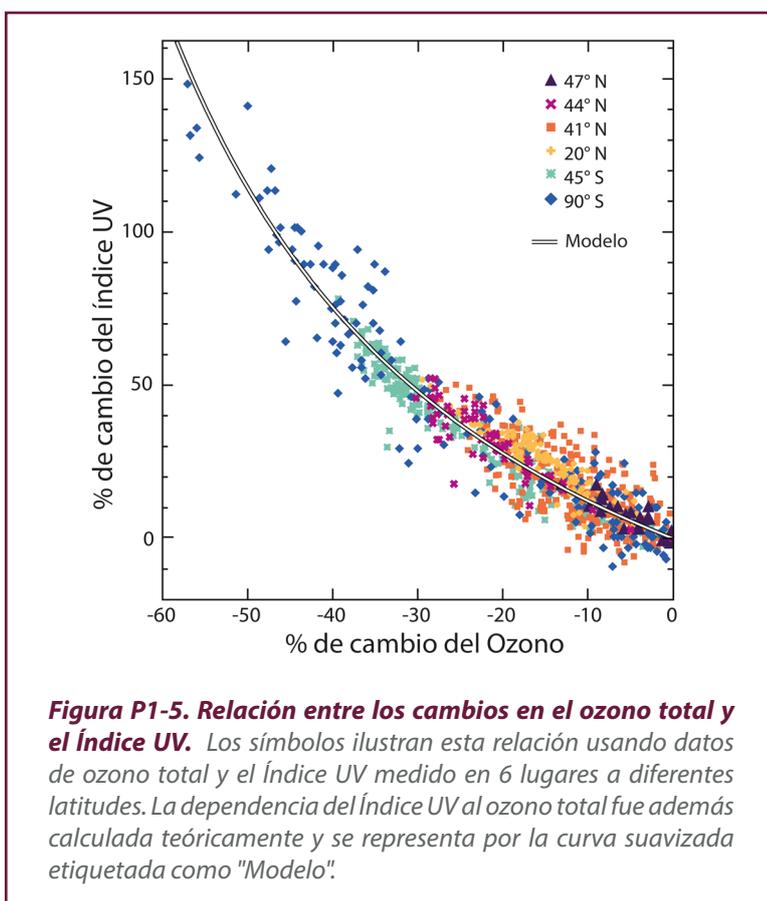


Figura P1-4. Efecto de la elevación solar y el ozono total sobre el Índice UV. En el gráfico se muestra el Índice UV y la elevación solar por encima del horizonte en diferentes concentraciones de ozono total. Un nivel de ozono total de 100 UD es tan bajo que sólo se ha observado bajo el agujero de ozono en la Antártica. El promedio característico de la columna de ozono en latitudes medias es de 300 UD, mientras que una columna de ozono alta, de 450 UD puede darse durante la primavera en latitudes altas.

Una disminución de 1% en el ozono total conduce a un incremento del Índice UV de alrededor de 1,2%. Sin embargo, los cambios en el ozono a gran escala (como por ejemplo, la reducción que ocurre durante el agujero de ozono Antártico), aumenta el Índice UV considerablemente. Así, un 50% de disminución en el ozono total resulta en más del doble del Índice UV (Figura P1-5).

La radiación UV se distribuye de manera desigual en el globo. La Figura P1-6 ilustra el máximo Índice UV alrededor del globo. En los trópicos, el Índice UV puede exceder 16 a nivel del mar y alcanzar 25 en altas latitudes como en el Altiplano en Chile. El Índice UV ha aumentado considerablemente el máximo de verano en el Hemisferio Sur comparado con las latitudes correspondientes en el Hemisferio Norte debido a las diferencias en el Ozono total y la inclinación del eje de rotación de la Tierra. Generalmente, el máximo valor del Índice UV disminuye al aumentar de latitud; sin embargo, la zona polar Antártica, la cual está afectada por el agujero de ozono Antártico, es una excepción notable. En la Antártica es posible registrar valores máximos de Índice UV comparables con los registrados en el trópico (ver Figura P2-1). Más allá de la atmósfera protectora de la Tierra, el Índice UV sobrepasa los 300.



P2

¿Cómo ha cambiado la radiación ultravioleta en el pasado y cuáles son los cambios pronosticados para el futuro?

Las reducciones en el ozono estratosférico entre la década del 1970 y hasta inicios de 1990, fueron causadas por sustancias agotadoras del ozono (SAO) como los clorofluorocarbonos, y éstas han causado el incremento de la radiación UV ligeramente en latitudes medias y en mayores cantidades en la Antártica. Estas SAO causaron el agujero de ozono en la Antártica, observable entre mediados de agosto hasta mediados de diciembre, desde la década del 80, hasta la actualidad. Sin el Protocolo de Montreal y sus enmiendas, la reducción del ozono estratosférico y los consecuentes incrementos en la radiación UV habrían continuado. Debido a la exitosa implementación de este Tratado Internacional, la capa de ozono está comenzando a recuperarse. Los niveles de radiación UV durante los últimos 25 años no han aumentado en la mayoría de lugares y se ven afectados principalmente por variaciones en la cantidad de nubes y aerosoles.

La radiación UV aumenta por encima de los niveles normales entre la década del 70 y principios de los 90.

Se han calculado los cambios a largo plazo usando datos extraídos desde radiómetros localizados en el suelo terrestre e instrumentos instalados en satélites. Desafortunadamente, las estimaciones de los niveles de radiación UV en la superficie de la Tierra anteriores a 1970 dependen principalmente de observaciones satelitales, las que iniciaron en los 70, o en base a reconstrucciones usando las medidas de ozono total y otros datos como la duración de la puesta de sol para caracterizar cambios a largo plazo en la nubosidad. Estas observaciones y reconstrucciones indican que la radiación UV en latitudes medias (25-50°) de ambos hemisferios aumentó entre 3-5% entre la década del 80 y 90. Sin embargo, el aumento debajo del agujero de ozono de la Antártica era

mucho mayor. El Índice UV máximo en Palmer Station, una estación de investigación en la Costa Antártica, tiene más del doble en comparación con el de los años 70, previo a la formación del agujero de ozono. Recientemente, el Índice UV en Palmer Station ha excedido la máxima de San Diego, una ciudad de latitud media, a pesar de que esta última se ubica en una latitud mucho menor comparada con Palmer Station. En contraste, no se ha observado un aumento significativo en la radiación UV en los trópicos. Los cambios en la radiación UV se deben más bien a cambios en las nubes y polución del aire que por cambios en la cantidad de ozono estratosférico (Figura P2-2). Por ejemplo, el rápido desarrollo del este de Asia condujo a más de un 25% de incremento en la radiación UV en comparación con los tiempos pre-industriales.

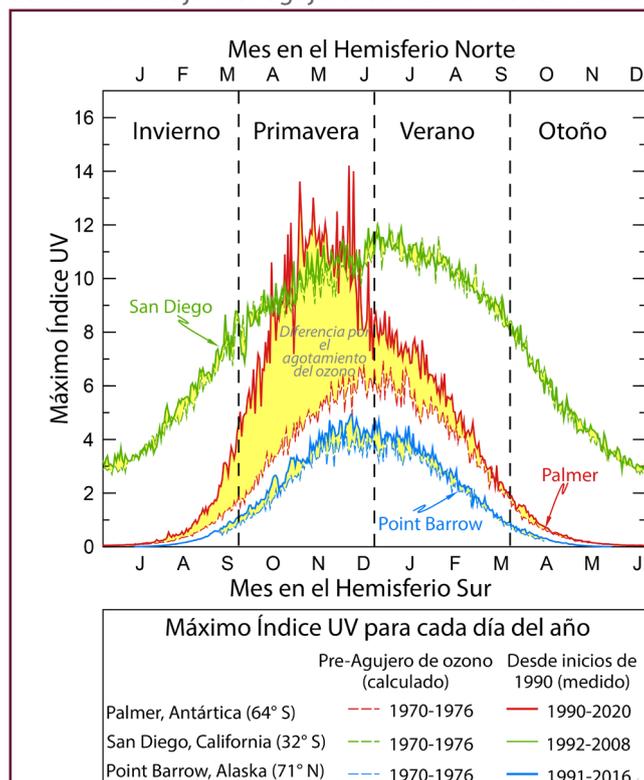


Figura P2-1. Diferencias en el Índice UV en distintas latitudes y estaciones del año.

La figura compara el Índice UV más alto medido en cada día del año en Palmer Station (una estación en la Costa Antártica), San Diego (una ciudad cerca de la frontera entre Estados Unidos y México), y cerca de Point Barrow (el punto más al norte de Alaska) en dos periodos: antes de la formación del agujero de ozono (1970-1976, líneas discontinuas) y el periodo contemporáneo iniciado a principios de los 90, durante el cual el agujero de ozono se desarrolló por completo (líneas sólidas). Las áreas amarillas indican la diferencia entre los dos periodos. Históricamente, el máximo del Índice UV en Palmer Station fue mucho menor que el de San Diego. Por influencia del agujero de ozono, la medida más alta del Índice UV en Palmer Station es más del doble desde los años 70, y actualmente podría exceder la máxima observada en San Diego. En contraste, los puntos máximos de los Índices UV en Barrow son considerablemente menores que en Palmer Station y han cambiado moderadamente (18% en promedio) entre los dos periodos. Este relativamente pequeño incremento puede ser explicado por una reducción más débil del ozono en la primavera del Ártico en comparación con la Antártica. En San Diego, los datos históricos y actuales son muy parecidos. En promedio, los Índices UV aumentaron sólo alrededor de 3% desde la década de 1970.

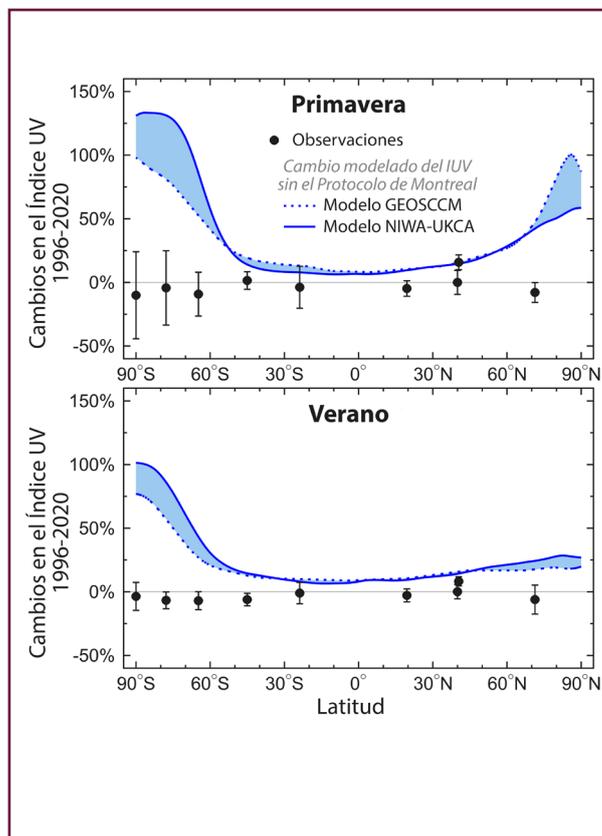


Figura P2-2. Comparación de los cambios observados en el Índice UV entre 1996 y 2020, y los cambios estimados sin el Protocolo de Montreal. Los círculos y las barras verticales indican las mejores estimaciones y sus rangos más probables para los cambios en el Índice UV que han ocurrido entre 1996 y 2020. Estas provienen principalmente de observaciones en lugares no contaminados (nueve estaciones en terreno abarcando en latitud desde el Polo Sur (90°S) hasta Barrow (71°N), Alaska, en primavera (arriba) y verano (abajo)). Las líneas continuas y punteadas en azul son los resultados de simulaciones usando dos diferentes modelos de climas químicos en un mundo sin Protocolo de Montreal, en donde no habría control sobre las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono. Sin el Protocolo de Montreal, el Índice UV se habría incrementado entre 10 y 20% en latitudes medias y más del doble en el Polo Sur en primavera. Exceptuando un sitio urbano ubicado a los 41°N (Tesalónica, Grecia), los cambios observados en el Índice UV han sido pequeños en todos los sitios y menores que en los escenarios pronosticados por los dos modelos climáticos. Estas observaciones confirman que el Protocolo de Montreal ha prevenido grandes incrementos en la radiación UV, particularmente en latitudes mayores a 60° S. Los grandes incrementos del Índice UV en Tesalónica (8%, verano y 16%, primavera), son causados principalmente por reducciones de los aerosoles atmosféricos gracias a las medidas de descontaminación del aire en esta ciudad, lo cual demuestra la importancia de otros factores además del ozono en la determinación de los niveles de radiación UV sobre la superficie de la Tierra (ver P1).

El Protocolo de Montreal ayudó a la capa de ozono a recuperarse.

El Protocolo de Montreal y sus enmiendas ha sido exitoso en la reducción de varias sustancias agotadoras de ozono (SAO). Estas sustancias incluyen gases halógenos como clorurofluorocarbonos (en inglés CFCs) emanados como resultado de las actividades humanas. Debido a que el Protocolo de Montreal fue ratificado por todos los 198 estados miembros de las Naciones Unidas, la producción y consumo de SAO están ahora controlados. Como consecuencia, la cantidad de SAO emitidas a la atmósfera está ahora decreciendo y la capa de ozono estratosférica está comenzando a recuperarse. Sin embargo, el proceso de recuperación es lento, debido a que el ritmo al cual se remueven las SAO de la atmósfera es de dos a tres veces más lento que el ritmo con la cual fueron emitidas en la década de 1980. Por eso, tomará décadas hasta que la capa de ozono se recupere completamente. Es más, las concentraciones de ozono estratosférico dependerán de las futuras emisiones de gases de invernadero, como el dióxido de carbono, el cual enfría la estratósfera. Los modelos recientes de clima predicen que el enfriamiento conducirá a incrementos en el ozono. El ozono estratosférico a finales del siglo 21 probablemente será más alto en comparación con los de la década de 1970, cuando comenzó la disminución del ozono.

La intensidad de la radiación UV ha cambiado muy poco desde los años 90 hasta hoy.

Como la recuperación del ozono es un proceso lento, los niveles de radiación UV observados desde los 90 hasta hoy no han sido constantes en lugares sin contaminación (Figura P2-2). En la mayoría de los sitios, año tras año, los cambios en la radiación UV han sido más bien causa de las variaciones de los aerosoles y nubes que por el ozono estratosférico. Por el contrario, algunos

modelos climáticos sugieren que sin el Protocolo de Montreal y sus enmiendas, el Índice UV se habría incrementado entre 10-20% en latitudes medias entre 1996 y 2020. En el Polo Sur, la reducción de ozono habría continuado y el Índice UV en primavera hubiera sido más del doble que en aquel periodo (Figura P2-2).

Los gases de efecto invernadero y los aerosoles influirán en la predicción de los niveles de radiación UV durante todo el siglo 21.

Para las estimaciones del futuro del ozono total, los aerosoles y las nubes son obtenidos desde modelos de "química atmosférica". Los resultados de estos cálculos son procesados en otros modelos (llamados modelos de transferencia radiativa) que determinan los cambios en la radiación UV en el tiempo. Los resultados más recientes de estas simulaciones sugieren que el alza en la concentración de gases de efecto invernadero impactará en el ozono total (y por ende, el Índice UV) en el futuro. En simulaciones donde la cantidad de aerosoles atmosféricos permanecen fijos en los niveles actuales, se proyecta que el Índice UV en latitudes medias va a disminuir ligeramente desde 2015 a 2090 (3% en el Hemisferio Norte y 6% en el Hemisferio Sur). Se pronostica una disminución del índice UV en latitudes altas debido a que el agujero de ozono Antártico y la disminución del ozono del Ártico descenderán. No se prevén cambios significativos en el Índice UV sobre los trópicos. En regiones afectadas actualmente por contaminación atmosférica, se pronostica un aumento en el Índice UV si se restringen las emisiones de contaminación en el futuro. La magnitud de este incremento depende enormemente de las decisiones en políticas públicas. Por esta razón, no podemos realmente predecir los cambios de intensidad UV en regiones que están fuertemente afectadas por contaminación ambiental.

P3

¿La disminución del ozono ha afectado al clima y a las condiciones del tiempo?

Pese a que la reducción del ozono atmosférico no es la principal causa del cambio climático, sí ha contribuido a cambiar el clima y las condiciones del tiempo en algunas regiones de la Tierra. El mayor efecto se ha visto en el Hemisferio Sur, fuera de los trópicos. La disminución del ozono y el cambio climático se entrelazan porque ambos, el ozono y la mayoría de las sustancias que agotan la capa de ozono, son gases de efecto invernadero. Las variaciones en sus concentraciones, por lo tanto, conducen a cambios en la temperatura del aire cerca de la superficie de la Tierra. Más aún, el agujero de ozono Antártico ha inducido un desplazamiento hacia el sur de las zonas climáticas del hemisferio Sur, con efectos sobre el clima, el tiempo y el medio ambiente.

Las sustancias agotadoras de ozono contribuyen al calentamiento global. Las sustancias agotadoras de ozono (SAO) reguladas en el Protocolo de Montreal (ver Introducción) son también fuertes gases de invernadero. Éstos gases atrapan el calor, calentando el aire cerca de la superficie de la Tierra. En la segunda mitad del siglo XX, la combinación de todas las SAO fue el segundo mayor responsable del calentamiento global después del dióxido de carbono, el gas de efecto invernadero más importante. Al reducir las emisiones de SAO, el Protocolo de Montreal ya ha evitado un calentamiento de entre 0,5 a 1,0° C (0,9 a 1,8° F) en regiones de latitud media de África, Norte de América y Eurasia, y como mucho, de 1,1°C (2,0 °F) en el Ártico. Entre 1955 y 2005, las SAO fueron responsables de alrededor de un tercio del calentamiento a nivel mundial, y alrededor de la mitad en el Ártico. Sin embargo, se espera que estas estimaciones sean revisadas en el futuro. Debido a que el ozono también es un gas de efecto invernadero, la reducción

de ozono causado por las SAO tiende a enfriar la superficie de la Tierra. La magnitud de este enfriamiento como respuesta no ha sido bien comprendida aún.

La reducción del ozono estratosférico influye en el clima y en el tiempo. Mientras las SAO calientan la atmósfera cerca de la superficie terrestre, ejercen también un efecto de enfriamiento hacia arriba, en la estratósfera. Este enfriamiento es más pronunciado dentro del agujero de ozono Antártico y provoca cambios en los vientos que circulan en la Antártica a gran altitud (el vórtice polar estratosférico). Estos cambios en los vientos además afectan las capas bajas de la atmósfera y han causado un desplazamiento hacia el sur de las zonas climáticas del Hemisferio Sur. Como resultado, las precipitaciones cerca de la Antártica han aumentado, y la zona subtropical se ha movido hacia el sur en verano durante las últimas décadas del siglo 20.

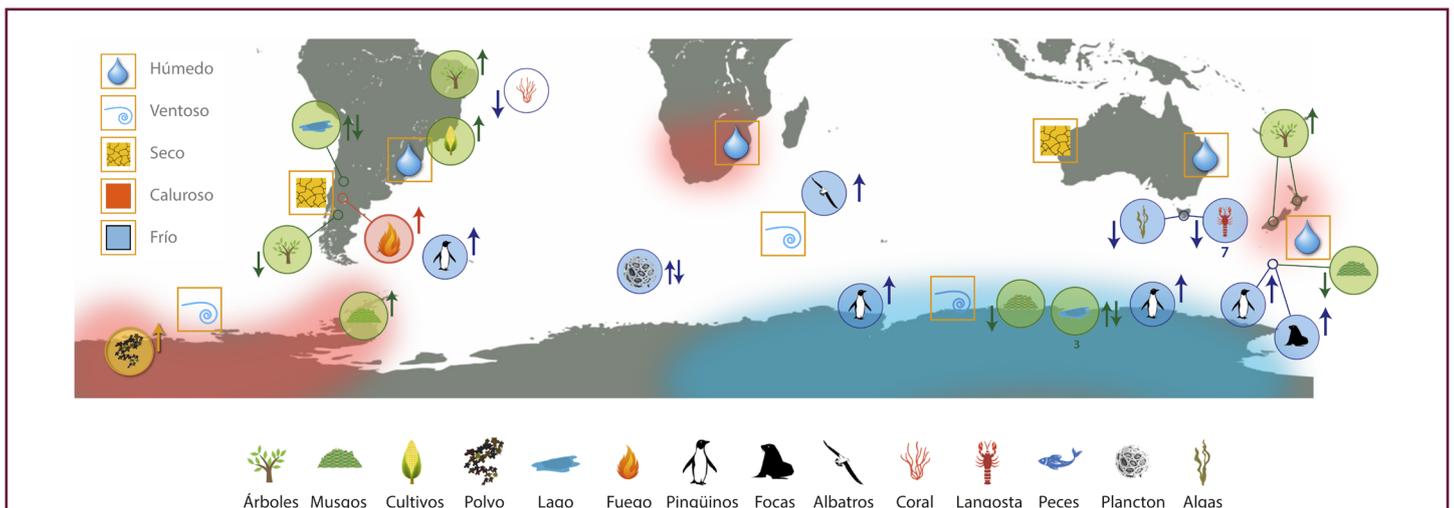


Figura P3-1. Mapa del Hemisferio Sur que muestra cómo la reducción de ozono estratosférico podría haber afectado al clima y al medio ambiente, y los efectos de estos cambios sobre las poblaciones y los ecosistemas terrestres. El mapa muestra asociaciones entre la reducción del ozono estratosférico y los efectos sobre el medio ambiente. Los símbolos representan tipos de organismos, ecosistemas o entidades afectadas (ver leyenda debajo de la figura). Las flechas indican la dirección de los efectos sobre la biodiversidad; arriba = efecto positivo, abajo = efecto negativo. Flechas de doble dirección indican cambios en biodiversidad. El sombreado rojo y azul indica regiones que devinieron más cálidas o más frías, respectivamente. Áreas más húmedas, más ventosas y más secas se indican con los símbolos a la izquierda. El mecanismo por el cual la reducción de ozono interfiere en estos cambios aún no se conoce para todos los indicadores.

Esto se correlaciona con un gran aumento de las lluvias durante el verano en la parte norte de Argentina, Uruguay, el sur de Brasil, Paraguay y las regiones subtropicales del este de Australia; mientras que la zona de Sur América se tornó más seca (**Figura P3-1**). Los cambios observados en la temperatura y las precipitaciones también se correlacionan con la abundancia y distribución de plantas y animales como pingüinos y focas; y afectan a los ecosistemas en el Hemisferio Sur. Los cambios anuales en la profundidad y extensión del agujero de ozono Antártico son fuertemente dependientes de la fuerza y tamaño del vórtice polar, el cual es influenciado a su vez por los cambios en el clima fuera de las regiones polares, como por ejemplo, por la temperatura del Océano Pacífico. Debido a las muchas interacciones entre los factores que modifican el clima, es difícil distinguir el efecto de la reducción del ozono entre los otros factores. Por eso, el efecto de la reducción del ozono sobre los cambios en los patrones regionales del clima del Hemisferio Sur no se ha entendido completamente aún.

La recuperación del ozono revierte las tendencias del clima y el tiempo. Los modelos sugieren que la esperada recuperación del ozono estratosférico sobre la primera mitad del siglo 21, podría revertir el desplazamiento de las zonas climáticas hacia los polos, conduciéndolas en dirección contraria, a moverse hacia el ecuador. Sin embargo, esta inversión está contrarrestada por el aumento esperado de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono. Si las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero continúan al alza, es probable que perdure el

movimiento de las zonas climáticas hacia los polos. En la segunda mitad del siglo 21 — cuando la mayor parte de las SAO sean removidas de la atmósfera y las condiciones estacionales del agujero de ozono dejen de ocurrir — los efectos de los gases de efecto invernadero dominarán, y las zonas climáticas se desplazarán más lejos en dirección a los polos. Aún no está claro cómo este desplazamiento afectaría a los patrones climáticos en Sudamérica, Sudáfrica y Australia debido a las muchas variaciones que se pueden dar en los próximos 50 años (por ejemplo, cambios en los hielos de los mares y las temperaturas de los océanos).

La disminución del ozono estratosférico ha sido menor en el Ártico que en el Antártico. Por esta razón, el efecto de la disminución del ozono del Ártico sobre las condiciones del tiempo en el Hemisferio Norte, están menos establecidas. Sin embargo, hay evidencia de que la excepcional disminución del ozono entre marzo y abril del 2020 contribuyó a las temperaturas anormalmente altas a lo largo de Asia y Europa en los meses que siguieron al evento. Por ejemplo, la temperatura en el pueblo siberiano Verhojansk estableció un nuevo registro de 38°C (100°F) en junio del 2020; es la temperatura más alta documentada cerca del Círculo Ártico.

P4

¿Cuáles son los efectos dañinos de la exposición al sol en la salud humana?



Exponerse a la radiación UV causa daño a la piel y a los ojos. Exponer la piel a la radiación UV causa quemaduras, envejecimiento de la piel, cáncer de piel e inflamaciones de la piel. Exponer los ojos causa condiciones médicas como cataratas y pterigión (crecimiento anormal del tejido conjuntivo). El riesgo es alto en personas de piel clara que vivan en áreas donde la intensidad de la radiación UV es muy alta, como Australia, Nueva Zelanda y Chile.

La exposición de la piel a la luz del sol puede causar quemaduras y cáncer a la piel. La sobreexposición de la piel a la radiación solar UV causa quemaduras, que se presentan como enrojecimiento, ardor y peladuras de piel. Repetidas exposiciones a la luz solar puede llevar al envejecimiento de la piel y distintos tipos de cáncer de piel.

Hay tres tipos de cáncer causados por la exposición a la radiación UV: melanomas, carcinoma de células escamosas y carcinoma de células basales. Los carcinomas de células escamosas y de células basales son ambos llamados cáncer queratinocitos. El melanoma es el tipo de cáncer de piel más fatal. Afecta aproximadamente 325.000 personas en el mundo cada año y causa la muerte de alrededor de 57.000. Se estima que entre el 62 y 96% de melanomas son causados por la exposición de la piel al sol, dependiendo de la intensidad de la radiación UV en un país específico y el método usado para calcular este porcentaje. Los cáncer queratinocitos pueden causar desfiguraciones significativas, particularmente cuando aparecen en la cara, pero raramente son fatales. Sin embargo, pueden ocasionar la muerte en algunas personas, especialmente en aquellas con trasplantes de órganos o en tratamientos que suprimen su sistema inmune. Debido a su frecuencia en algunos países, los cáncer queratinocitos son una carga en los sistemas de salud. Por ejemplo, en Australia éstos son los más costosos de todos los tipos de cáncer.

La exposición al sol puede causar cáncer a la piel al dañar el ADN y suprimir el sistema inmune. Exponerse a la radiación UV causa cáncer de piel a través de múltiples mecanismos (Figura P4-1). La radiación UV-B daña directamente el ADN en las células. La radiación UV-A, y en menor medida, la UV-B pueden dañar indirectamente el ADN al producir especies reactivas de oxígeno en moléculas contiguas. La mayor parte del daño en el ADN es reparado; sin embargo, si la reparación no ocurre antes de la división de las células, la mutación persiste y es pasada a las dos nuevas células que se crean durante la división celular. Cada una de esas nuevas células puede recibir más daño en su ADN y pasar esas mutaciones adicionales a sus células hijas. Si la acumulación de mutaciones continúa, eventualmente las células pierden control de la división celular y devienen en cancerosas. La exposición a la radiación UV suprime el sistema inmune y con ello el reconocimiento y destrucción de células cancerosas. Entonces, la radiación UV causa ambos, el daño que conduce a las células a convertirse en cancerosas, y la inhibición del sistema inmune para encontrar y destruir las células cancerosas.

Se estima que el Protocolo de Montreal ha prevenido la aparición de aproximadamente 11 millones de melanomas y 432 millones de cánceres queratinocitos, que hubiesen ocurrido en personas nacidas en Estados Unidos entre 1890 y 2100.

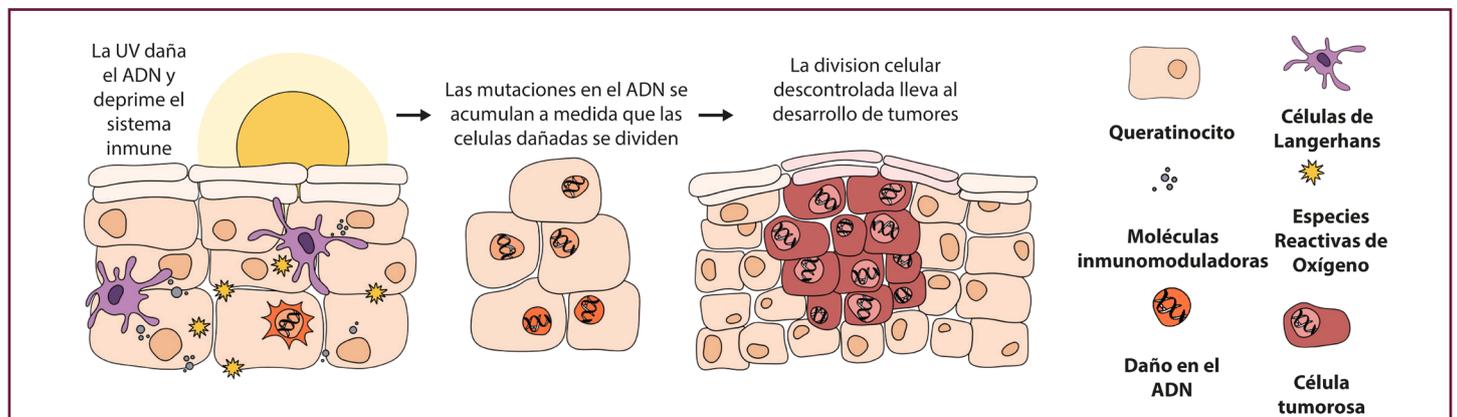


Figura P4-1. La radiación UV provoca cáncer de piel a través de diversos mecanismos. Estos mecanismos incluyen daño directo al ADN, daño indirecto a través de la producción de especies reactivas del oxígeno, e inmunosupresión. Los queratinocitos son células en la capa más externa de la piel (la epidermis). La mayoría de las células en la epidermis son queratinocitos. Las células Langerhans son células inmunocompetentes que residen dentro de la piel. Las moléculas inmunomoduladoras son químicos que son positiva o negativamente regulados por la radiación UV, influenciando la respuesta del sistema inmune a las células mutadas.

La incidencia del cáncer de piel varía en el mundo. Los distintos tipos de cáncer de piel son frecuentes en países donde la intensidad de la radiación UV es alta, y donde hay muchas personas de piel clara. La incidencia es más alta en Australia y Nueva Zelanda; y más bajas en países donde la mayoría de la población tienen la piel altamente pigmentada. La incidencia de melanoma en Australia es 228 veces más alta que en Guinea Ecuatorial, el país con la más baja incidencia en el mundo. En Chile constituye un problema de salud pública significativo, con una incidencia y mortalidad por esta causa en aumento.

La incidencia del cáncer de piel ha cambiado con el tiempo.

La incidencia de cáncer a la piel ha aumentado en las últimas cuatro décadas en todos los países donde hay registros (Figura P4-3). Lo más probable es que esta tendencia sea atribuible a los cambios en los hábitos de exposición al sol a mediados del siglo XX. A las personas nacidas entre 1950 y 1980 se les animaba a broncearse y no se promovía ampliamente el uso de protección solar. A medida que estas personas se hacían mayores, el número de cánceres a la piel se incrementó notablemente. Sin embargo, en algunos países se observa una meseta, o incluso un descenso, en los grupos más jóvenes (Figura P4-3). Esto puede deberse a las campañas de salud pública que han propulsado un mayor uso de estrategias de protección solar, como el uso de bloqueador solar, sombreros y ropa apropiada.

La exposición de la piel al sol provoca afecciones cutáneas inflamatorias.

En algunas personas, la exposición de la piel a la radiación UV provoca una reacción exagerada del sistema inmunitario que conduce a una enfermedad inflamatoria de la piel llamada fotodermatitis. Los síntomas de cada afección varían, pero los síntomas clásicos son dolor en la piel a los pocos minutos de la exposición al sol, picazón intensa, enrojecimiento, ampollas y cicatrices. Estas pueden afectar negativamente a la calidad de vida de las personas, tanto por los síntomas directos como por tener que limitar notablemente sus actividades al aire libre. No se sabe con certeza que tan comunes son estas afecciones porque normalmente no son documentadas en los registros médicos.

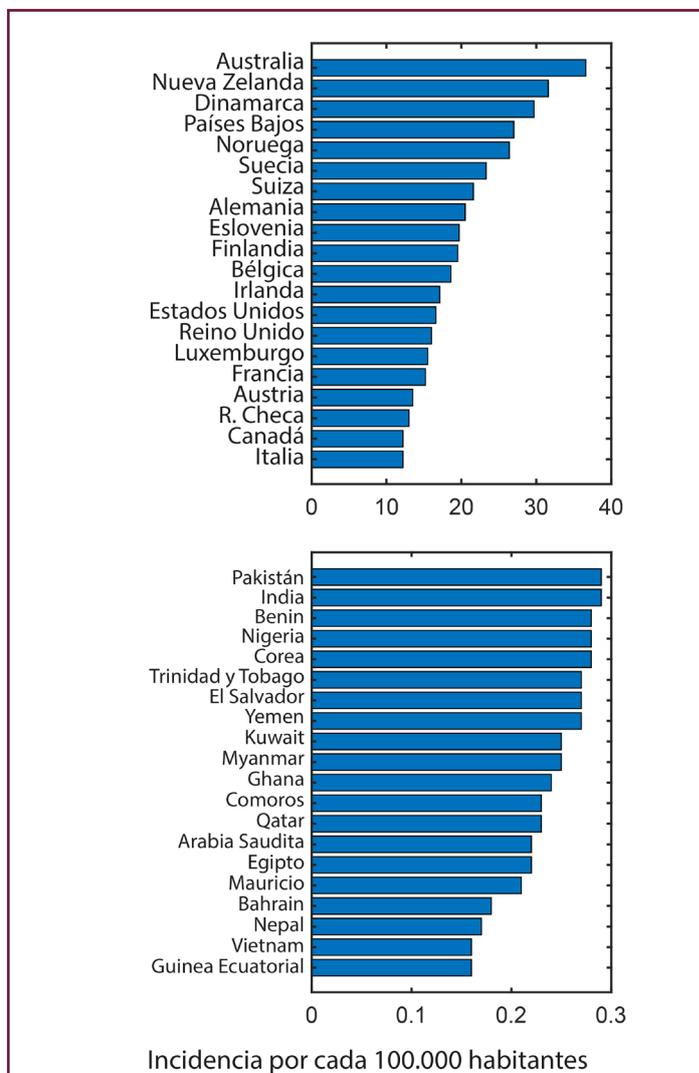


Figura P4-2. Incidencia de melanoma (estandarizada por edad según la población estándar mundial) en los 20 países con la tasa de incidencia más alta (arriba) y más baja (abajo). Los datos se expresan como número de casos por 100.000 personas por año.

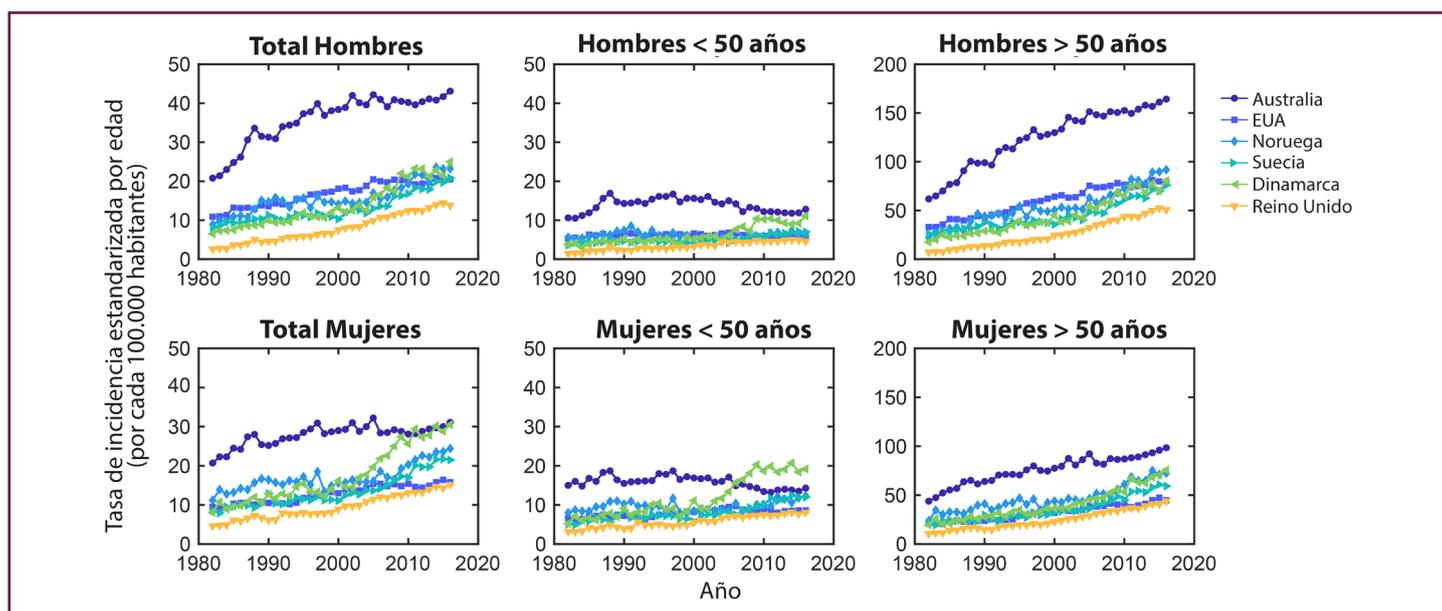


Figura P4-3. Incidencia de melanoma en seis países con predominancia en población de piel clara de acuerdo al sexo y edad entre 1982 y 2016. El eje de "y" indica el número de casos de melanoma por cada 100.000 personas al año (edad tomada como referencia de acuerdo al patrón mundial). Nótese que entre los dos gráficos de la derecha (hombres y mujeres mayores de 50 años) tienen diferente eje "y".

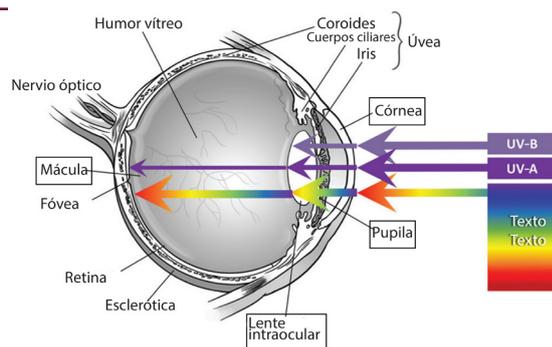
Exponerse al sol causa daño a los ojos. Hay varios daños a los ojos causados al exponerse al sol, como se muestra en la Tabla 1. Además de esos daños, también pueden aparecer melanomas en los ojos, máculas degenerativas (que afectan a la retina por detrás de la pupila y causa pérdida de la visión) y glaucoma (aumento de la presión ocular), por la exposición de los ojos a la luz del sol.

Las cataratas son la causa más común de la pérdida de visión. Se tratan sin problemas al remover el cristalino opaco y reemplazarlo por un lente artificial. No obstante, es la

principal causa de ceguera en el mundo; en 2015 provocó un 35% de ceguera total. Entre 1990 y 2019, la cantidad de personas con algún grado de incapacidad debido a cataratas casi se duplicó. Hay algunos países del este de Asia, sur de Asia y África sub-sahariana, donde la proporción de deficiencia en la visión moderada a severa, cuya causa son cataratas, fue más alta que el promedio mundial. Esto puede deberse a la alta intensidad de radiación UV en esos países, junto al bajo acceso a tratamientos quirúrgicos.

Tabla P4-1. Daños oculares causados por la exposición de los ojos al sol. Arriba a la derecha de la figura se muestra un esquema de la anatomía del ojo humano. Las flechas muestran las diversas penetraciones de UV-B, UV-A y radiación visible (de arriba a abajo) en el ojo.

Condición	Definición
Catarata	Opacidad de los lentes, conduce a la deficiencia de la visión.
Pterigión	Rigurosidad carnosa de tejido conjuntivo grueso (la membrana dentro de los párpados y la cuenca del ojo) que crece a través de la córnea; si aquella crece a través de la pupila, un pterigión puede alterar la visión.
Célula de carcinoma escamoso de la córnea o la conjuntiva	Carcinoma de células escamosas es como el cáncer de piel pero en la superficie del ojo.
Fotoqueratitis/ Fotoconjuntivitis	La Fotoqueratitis, también llamada "ceguera de la nieve", afecta la córnea (la superficie del ojo) mientras que la fotoconjuntivitis afecta a la conjuntiva.
Pinguécula	Una pinguécula es un pequeño y elevado engrosamiento, blanco o amarillento, que está limitado por la conjuntiva; puede aparecer dentro o fuera del ojo.



P5

¿Cuáles son los beneficios de exponerse al sol?

La exposición al sol lleva a la producción de vitamina D, la cual es necesaria para mantener niveles adecuados de calcio en la corriente sanguínea. Un bajo nivel de vitamina D causa debilidad en los huesos e influye en el riesgo de fracturas. La vitamina D puede jugar un rol más amplio en la salud. Otros beneficios de exponerse al sol incluyen la disminución del riesgo a tener enfermedades autoinmunes (como la esclerosis múltiple), presión arterial alta, miopía y depresión.

Aunque exponer la piel y los ojos a la radiación UV causa daños significativos (ver P4), pasar tiempo bajo el sol también ofrece importantes beneficios (**Figura P5-1**). Algunos son mediante radiación UV y otros por largas longitudes de onda como la luz visible. Como las longitudes de onda que causan beneficios y daños están superpuestas, puede ser difícil encontrar el balance óptimo entre exponerse y protegerse del sol.

Exponerse a la radiación UV lleva a la producción de vitamina D. La producción de vitamina D es el mayor beneficio conocido de exponer la piel a la radiación UV-B. Cuando la radiación UV-B penetra en la piel, el 7-deshidrocolesterol, un compuesto químico presente en la piel, se convierte en pre-vitamina D₃ (**Figura P5-1**). Luego, este compuesto se transforma en vitamina D₃, la cual es transportada en el torrente sanguíneo al hígado. En el hígado, la vitamina D₃ se

convierte en otro químico llamado 25-hidroxivitamina D, o 25(OH)D, que tiene una actividad mínima en el cuerpo, pero permanece en el torrente sanguíneo durante mucho tiempo y es un buen indicativo del almacenaje de vitamina D en el organismo. Este químico es lo que los médicos y científicos miden para determinar el estado de la vitamina D en las personas. El 25(OH)D es transportado a los riñones donde es convertido en la forma activa de vitamina D, también llamada calcitriol (**Figura P5-2**). El calcitriol circula en el torrente sanguíneo y es particularmente importante para mantener la adecuada cantidad de calcio en la sangre. El calcitriol permite absorber el calcio de la comida, y reduce su secreción en la orina. La carencia de vitamina D conduce a huesos débiles; en adultos, esto se denomina osteomalacia.

La vitamina D nos mantiene saludables. Además de mantener los niveles de calcio y huesos y músculos sanos, la vitamina D realiza funciones adicionales muy importantes en nuestro cuerpo: controla la manera en que las células se reproducen o mueren; influye en la trayectoria de la sangre en el torrente sanguíneo lo cual controla la presión arterial; y modula al sistema inmune. Cada vez más, la evidencia sugiere que la vitamina D juega un rol en cáncer, en enfermedades infecciosas y deficiencias inmunes como esclerosis múltiple.



Figura P5-1. El Protocolo de Montreal y sus enmiendas han prevenido aumentos excesivos en la intensidad de radiación UV. Esto permite a las personas permanecer más tiempo al exterior, obteniendo los beneficios del sol que de otra manera no sería posible.

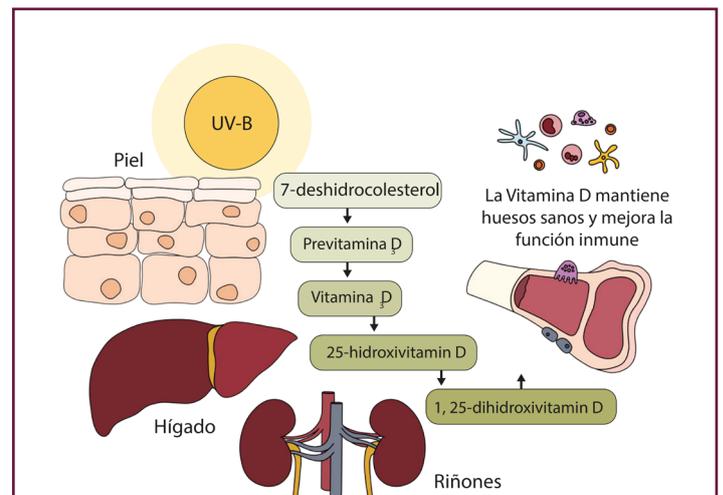


Figura P5-2. Producción de vitamina D en la piel y formación de producto activo en el hígado y los riñones. La radiación UV convierte el 7-deshidrocolesterol en pre-vitamina D₃ en la piel.

P6

¿Cuáles son los efectos de la radiación UV-B en las plantas y en los ecosistemas terrestres?

Dependiendo del tiempo de exposición de una planta a la radiación UV-B, los impactos positivos o negativos en la productividad de ésta varían, afectando la calidad de los cultivos agrícolas y la biodiversidad de los ecosistemas terrestres. La relación entre el cambio climático y la disminución del ozono estratosférico afecta significativamente a la manera en que las plantas responden a la radiación UV, con efectos en la salud de los ecosistemas, sus servicios, y la seguridad alimentaria.

La radiación UV-B tiene varios efectos en las plantas. Las plantas requieren de la luz solar para crecer y reproducirse, pero esto a su vez significa que están expuestas a cantidades significativas de radiación UV-B a lo largo de sus vidas. Altos niveles de radiación UV-B, como habría ocurrido sin el Protocolo de Montreal, pueden dañar moléculas importantes en la célula (como el ADN, proteínas y lípidos) e inhibir la fotosíntesis, el crecimiento y la reproducción (**Figura P6-1**). Estos efectos en las plantas podrían reducir la capacidad de éstas para fijar el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera a través de la fotosíntesis, contribuyendo a un cambio climático más severo. En los niveles actuales de radiación UV-B, la productividad agrícola y la seguridad alimentaria no están en riesgo gracias a que la mayoría de las plantas cuentan con mecanismos protectores para tolerar este tipo de radiación.

Las plantas se adaptan a los cambios de radiación. Las plantas están protegidas de los efectos dañinos de la radiación UV-B a través de varios mecanismos. Uno de los más

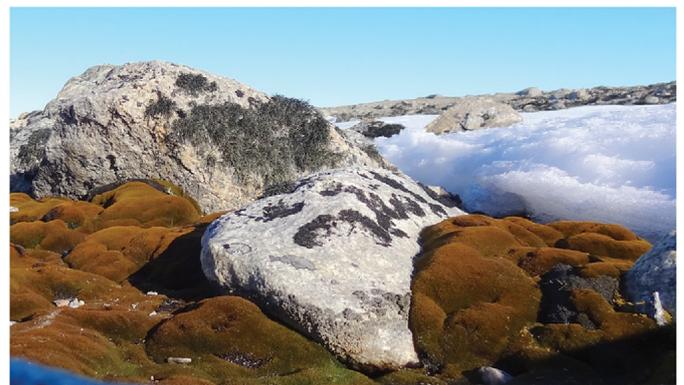
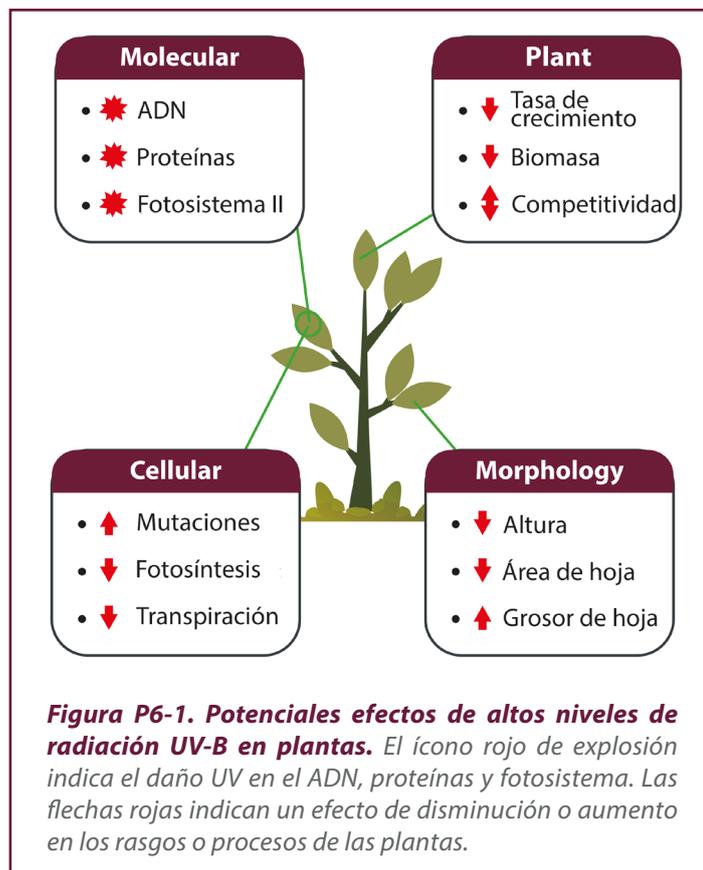


Figura P6-2. Rocas incrustadas en hongos y líquenes cerca de Casey Station en la Antártica Este. A comienzos del verano los musgos antárticos emergen desde debajo de la nieve y pueden quedar expuestos a altos niveles de radiación UV-B. Cuando emergen por primera vez son de un color verde brillante. Los que quedan en lugares protegidos, sumergidos por el derretimiento del agua o en pequeñas depresiones, permanecen verdes; sin embargo, los musgos sobreexpuestos en crestas de montañas acumulan pigmentos protectores solares rápidamente, como se puede evidenciar en el color rojizo de los musgos en la fotografía.



comunes es la producción y acumulación de pigmentos y compuestos fenólicos que sirven como filtros o bloqueadores en sus epidermis (o "piel"), los cuales minimizan la cantidad de radiación UV-B que llega hasta las moléculas sensibles como el ADN. La cantidad de bloqueadores solares aumenta con la exposición a la radiación UV-B, y algunas plantas se ajustan rápidamente a la producción de estos pigmentos en respuesta a las variaciones diarias y estacionales de radiación UV-B (**Figura P6-2**). Otros mecanismos adicionales de protección incluyen el incremento del grosor de la hoja y una reparación eficiente del ADN dañado.

La radiación tiene efectos adversos y beneficiosos en los cultivos agrícolas. La radiación UV-B afecta la composición química de varios órganos de la planta. Estos cambios pueden alterar la calidad de la cosecha y el contenido farmacológico de las plantas medicinales. Algunas de estas variaciones químicas son beneficiosas para las personas y el ganado, mientras que otras reducen la digeribilidad de las plantas (**Figura P6-3a**). Por ejemplo, en algunas cosechas, la radiación UV-B puede aumentar la cantidad de flavonoides, los cuales son beneficiosos para la salud debido a sus

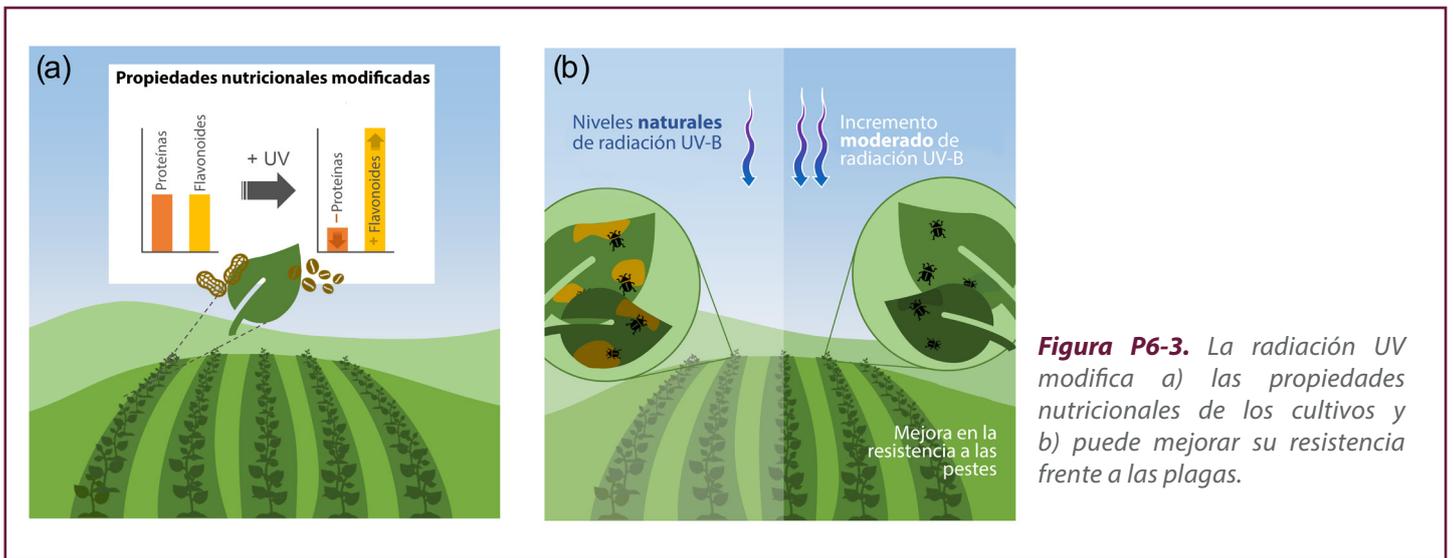


Figura P6-3. La radiación UV modifica a) las propiedades nutricionales de los cultivos y b) puede mejorar su resistencia frente a las plagas.

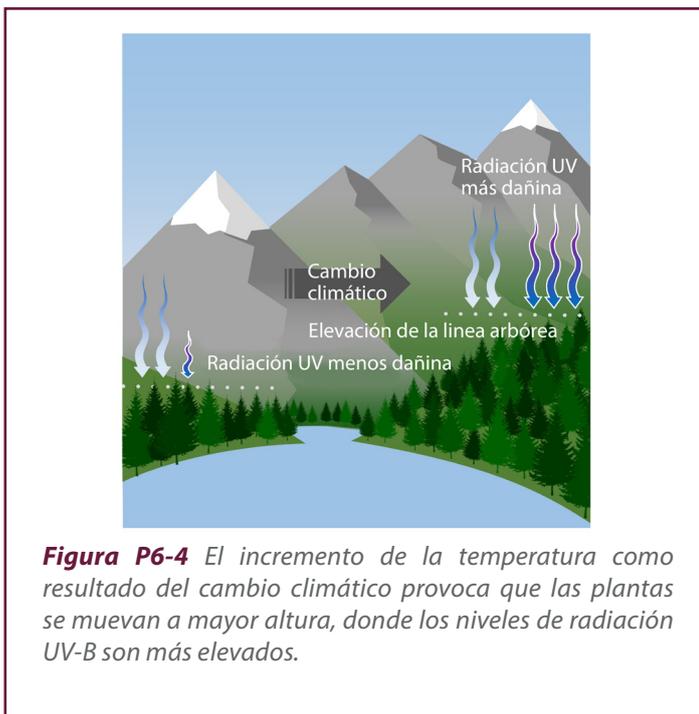


Figura P6-4 El incremento de la temperatura como resultado del cambio climático provoca que las plantas se muevan a mayor altura, donde los niveles de radiación UV-B son más elevados.

propiedades antioxidantes. Estas variaciones en la composición química pueden reforzar la tolerancia de las plantas a las sequías, a las temperaturas extremas y elevar sus defensas contra plagas y patógenos. Estas defensas indirectas a la radiación UV-B son muy importantes en ecosistemas agrícolas (**Figura P6-3b**).

La radiación UV-B impacta los ecosistemas con efectos potencialmente negativos en la biodiversidad. La cantidad de radiación UV-B a la que están expuestos los cultivos y plantas silvestres no se debe sólo al ozono estratosférico, sino que también al cambio climático.

En respuesta al aumento de las temperaturas, muchas especies de plantas se desplazan a mayores elevaciones (es decir, a ambientes con altos niveles de radiación UV-B (**Figura P6-4**)); o hacia latitudes más altas (donde, por el contrario, los niveles de radiación UV-B son más bajos). Estos cambios en la distribución de plantas y otras especies a lo largo y ancho de los ecosistemas puede alterar los patrones químicos y de crecimiento vegetal, afectar la manera como las plantas e insectos interactúan, y cambiar la estructura de la vegetación. En conjunto, estos cambios pueden reducir la biodiversidad.

La mayoría de los organismos pueden adaptarse a altos niveles de radiación UV-B, pero el cambio climático es un desafío de supervivencia. Las regiones polares, las altas montañas y los trópicos son los ecosistemas con más probabilidad de ser impactados por las variaciones de la radiación UV-B inducidas por el cambio climático. Debido a los altos niveles naturales de radiación UV-B, las plantas que viven en los trópicos han desarrollado mecanismos protectores contra la radiación UV. Sin embargo, los efectos combinados de radiación UV-B y cambio climático plantean amenazas significativas a su supervivencia al sobrepasar sus mecanismos de adaptación y aclimatación a los cambios ambientales. Por ejemplo, el cambio climático provoca menos nevadas a altas latitudes y a altas elevaciones. Esto deja expuestas a ciertas especies a la radiación UV-B (que dejan de estar protegidas por un “manto” de nieve) y a las condiciones ambientales desfavorables (la nieve mantiene estable la temperatura del suelo) en ciertos momentos vulnerables del año, cuando pueden estar poco preparadas para responder y aclimatarse a estos cambios. Este fenómeno es evidente, por ejemplo, en algunas áreas de la alta tundra ártica, en algunos lugares de la tundra subantártica de alta montaña y en la Antártica.

P7

¿La radiación UV afecta a los ríos, lagos y océanos?

La radiación UV-B presente en la luz solar puede penetrar las aguas de ríos, lagos y océanos, donde afecta a muchos organismos e interactúa con compuestos químicos. Debajo del agua hay enormes variaciones de radiación UV en función de factores como la latitud, la altitud, la profundidad y la claridad del agua. El efecto neto de la radiación UV-B depende tanto del tiempo de exposición, como de la sensibilidad o composición química del organismo, y de los mecanismos que tienen para protegerse de los daños provocados por la radiación UV. El cambio climático modifica la penetración de la radiación UV dentro del agua al modificar la capa de hielo, la mezcla y la claridad del agua.

La radiación UV-B penetra a través del agua. El color y la claridad controlan la penetración de la radiación UV a través del agua, la que puede diferir completamente en ríos, lagos y océanos. La claridad del agua está controlada en gran medida por la concentración de materia orgánica disuelta, dando un tono pardo similar al té o al café cuando se encuentra en altas concentraciones. En lugares rodeados por bosques y humedales, donde la materia orgánica es alta, la radiación UV-B suele penetrar menos de un metro. En aguas más claras con baja concentración de materia orgánica, la radiación UV-B puede alcanzar profundidades considerables, a veces decenas de metros. En la mayoría de los casos, la concentración de materia orgánica disuelta y la profundidad de penetración de la radiación UV-B varían estacionalmente y con la cantidad de nieve o lluvia.

La radiación UV afecta a los organismos acuáticos y a la química del agua. Cuando los organismos están expuestos a altos niveles de radiación UV-B, algunos componentes celulares importantes como las proteínas, el ADN y los lípidos pueden resultar dañados. A su vez, este proceso puede reducir la reproducción y el crecimiento de los organismos o, en casos más graves, puede provocarles la muerte. Por ejemplo, el desarrollo de embriones de erizos de mar puede verse severamente afectado por la radiación UV, causando un desarrollo anormal (**Figura P7-1**). Altas cantidades de radiación UV-B pueden además reducir la virulencia de patógenos y parásitos o matarlos. Los organismos unicelulares o pequeños organismos sin caparazón o estructuras en la piel,

son especialmente vulnerables. Los huevos de pescado y los alevines (crías de peces) pueden ser además muy sensibles a la radiación UV-B y UV-A. Por otra parte, los peces adultos generalmente no son sensibles a los daños por UV, aunque algunos pueden desarrollar cáncer de piel en ambientes con alta radiación UV. Los organismos que viven en aguas con bajos niveles de radiación UV (como en zonas costeras) son más sensibles a la radiación UV que aquellos que viven en las orillas y están adaptados a niveles más altos de radiación UV.

Los organismos han evolucionado durante miles de millones de años y tienen una gran variedad de adaptaciones a la radiación UV. Algunos organismos acuáticos pueden ver y evitar áreas donde el daño por UV es alto. Incluso, algunos organismos pueden hacer o consumir pigmentos que los protegen del daño UV, igual a cómo la piel humana se oscurece gracias a la melanina cuando es expuesta a la luz solar. Estos atributos y respuestas ayudan a muchos tipos de organismos acuáticos a adaptarse a niveles de radiación UV que podrían, de lo contrario, dañarlos.

Similar al cambio de color de los materiales que quedan en el exterior (ver P11), la exposición a la radiación UV rompe y altera la composición química de aquello que toca. En el agua, la radiación UV conduce a la descomposición de la materia orgánica y puede además descomponer aceites contaminantes, resultando en la liberación de dióxido de carbono al aire. Esto puede estimular a más bacterias descomponedoras, liberando más dióxido de carbono.

Figura P7-1. Efectos de la exposición a la radiación UV en embriones de erizos de mar verde *Strongylocentrotus droebachiensis*. La foto de la izquierda muestra un embrión normal (no expuesto a la radiación UV), mientras que el de la derecha tiene un desarrollo anormal luego de la exposición a la radiación UV.

Sin radiación UV-B



0.1 mm

Con radiación UV-B



P8

¿El cambio climático afecta a la radiación UV-B en los ambientes acuáticos?

El aumento de la temperatura y los desplazamientos climáticos debido a los efectos del cambio climático afectan la forma en que la radiación UV impacta a los ambientes acuáticos. Los científicos han descubierto que son varios factores, incluyendo cambios en las capas de hielo, en la circulación del agua en océanos y lagos, y en la transparencia del agua a la radiación UV.

Las capas de hielo están disminuyendo en lagos y océanos. Cuando esta presente, la capa de hielo protege a la columna de agua de la radiación UV. No obstante, la capa de hielo en los océanos polares y en muchos lagos que se congelaban históricamente en invierno ha disminuido. Por ejemplo, el mínimo anual de la capa de hielo en el Océano Ártico disminuyó de 63% a 41% entre 1996 y 2022. La actual capa está un 25% por debajo de la mediana a largo plazo (**Figura P8-1**). Con el aumento de temperatura, se forman más lagunas sobre la superficie del hielo, lo cual incrementa la penetración de la radiación UV a través del hielo remanente, amplificando más hacia el fondo los niveles de radiación UV en la columna de agua.

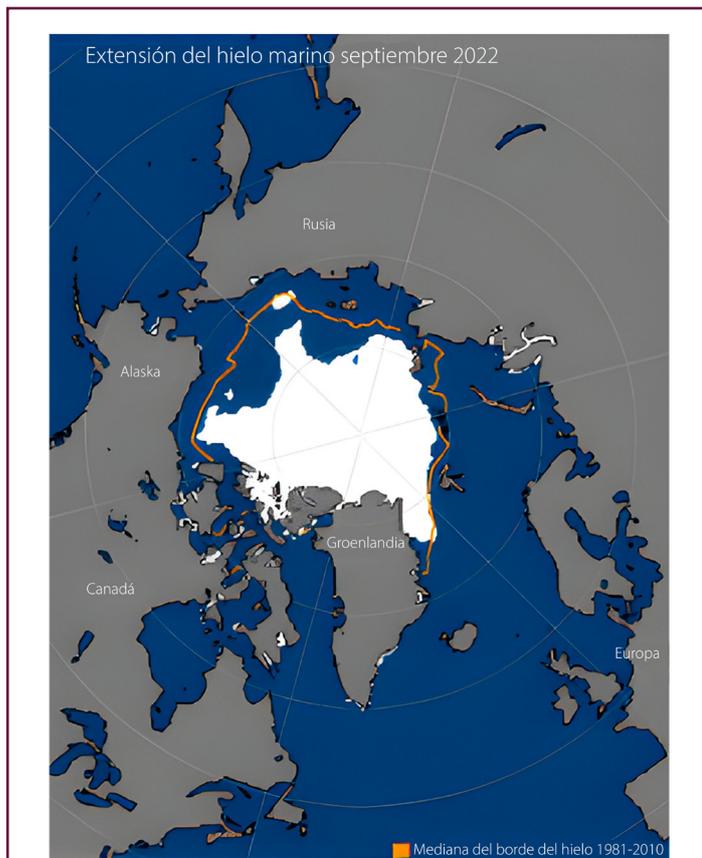


Figura P8-1. Disminución del hielo en el Ártico. Mapa de la cobertura media mínima del borde de hielo en septiembre 2022 (área blanca) comparada a la mediana del borde de hielo en septiembre de 1981-2010 (línea naranja). La radiación UV ahora penetra dentro del Océano Ártico en áreas previamente protegidas de ésta.

La profundidad de la capa mixta está cambiando. Los vientos mezclan las aguas superficiales en la mayoría de los cuerpos de agua. Esta capa de agua se denomina “capa mixta”. Los organismos y sustancias que flotan libremente en esta capa se mezclan también y quedan expuestos a la radiación UV cuando pasan cerca de la superficie (**Figura P8-2**). Una capa mixta más profunda implica menor exposición a la radiación UV-B (en promedio), mientras que una capa mixta más delgada y superficial aumenta la exposición a la radiación solar UV. El cambio climático ha modificado la profundidad de la capa mixta en muchos cuerpos de agua, alterando la exposición a la radiación UV solar. Por ejemplo, en los océanos, la capa mixta ha comenzado a hacerse más profunda en muchas regiones, y por consiguiente, se reduce la exposición promedio a la radiación solar UV en esta capa.

Las concentraciones de materia orgánica disuelta están aumentando. En el norte de Estados Unidos y el noreste de Europa, las concentraciones de materia orgánica disuelta han ido en aumento en muchos cuerpos de agua, disminuyendo la penetración y la exposición a la UV. El aumento de las precipitaciones, de climas cálidos y de eventos extremos, amplifican la cantidad de materia orgánica disuelta y de sustancias que absorben la luz en los cuerpos de agua. Se estima que los cambios climáticos por venir reduzcan aún más la radiación UV subacuática en las próximas décadas.

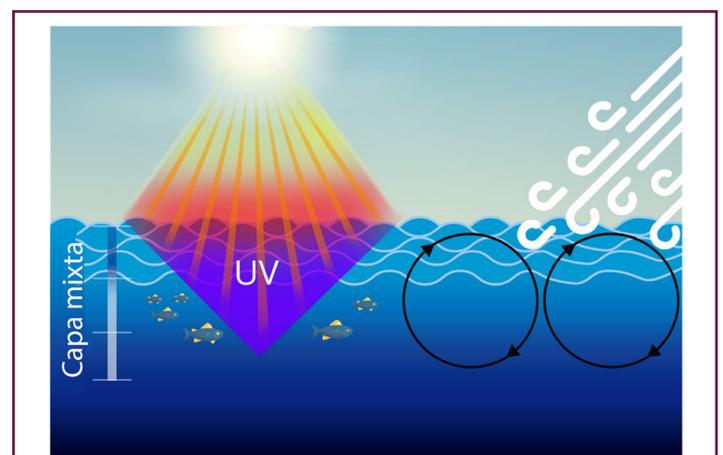


Figura P8-2. Diagrama de un lago o columna de agua oceánica. Círculos en negro indican la profundidad a la cual los vientos mezclan el agua. Los vientos han estado aumentando sobre los océanos, y en muchas regiones las superficies de agua de los océanos se mezclan más profundamente a como lo hacían en décadas pasadas.

P9

¿Los cambios de radiación UV pueden afectar la calidad del aire?

A nivel mundial, se estima que la contaminación atmosférica es la causa de muerte prematura de cerca de 4 millones de personas cada año. Asimismo, puede dañar cultivos, causando una reducción de la producción estimada en más del 10%. El daño generado depende del tipo y cantidad de contaminantes emitidos en la atmósfera, y también de sus interacciones con la radiación UV y con los cambios climáticos. El impacto neto en la calidad del aire depende de los cambios en estos factores.

La mala calidad del aire es un riesgo para a salud. El aire que respiramos contiene una mezcla de componentes que pueden alterarse por la radiación UV. Estos componentes incluyen químicos resultantes de la combustión, como óxidos de nitrógeno (NOx), y componentes orgánicos volátiles (COVs) de orígenes tan diversos como plantas y pinturas. Otros químicos, como el ozono (O₃) y COVs oxidados se forman en la atmósfera en reacciones donde la radiación UV forma parte (**Figura P9-1**). Las variaciones en el ozono estratosférico y el cambio climático impactan en la producción y el destino de estos contaminantes atmosféricos. Las pequeñas partículas en suspensión (PM_{2.5}, partículas menores de 2.5 µm) en el aire contaminado son

la destrucción del ozono a nivel de suelo, un proceso que produce radicales hidroxilos, el principal agente limpiador de la tropósfera. Los radicales hidroxilos reaccionan con compuestos como COVs, NOx, y el dióxido de azufre en reacciones que frecuentemente regeneran el ozono. Este complejo ciclo se ve alterado por cualquier factor que influya en la cantidad de radiación solar UV, como la nubosidad y el O₃ estratosférico.

Cambios en el ozono a nivel del suelo como resultado del Protocolo de Montreal. Se espera que el aumento de la concentración de O₃ estratosférico, como resultado del Protocolo de Montreal y el cambio climático, reduzcan la concentración de ozono a nivel de suelo en las regiones contaminadas, lo que tendería a mejorar la calidad del aire. Por otra parte, se estima que empeore la calidad del aire en áreas menos contaminadas debido a cambios en el ozono a nivel del suelo. La **Figura P9-2** muestra los cambios esperados en el O₃ a nivel del suelo en el este de Estados Unidos debido al incremento en 5% en el O₃ estratosférico. Si bien estos no son insignificantes, es posible alcanzar cambios más importantes reduciendo las emisiones de NOx y COVs.



Figura P9-1. ¿Qué es la calidad del aire? Es una manera de sintetizar cuán saludable es el aire que respiramos. Las actividades humanas emiten muchos químicos a la atmósfera, incluyendo componentes orgánicos volátiles oxidados (COVOs), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (MP). En la atmósfera, la radiación solar UV puede transformar dichos elementos en una variedad de compuestos, incluyendo MP adicionales, NOx y O₃. Luego de un largo tiempo, la radiación solar puede remover estos contaminantes atmosféricos.

consideradas como la mayor amenaza para la salud humana. Los estudios señalan que en Estados Unidos, más de la mitad de la masa de esas partículas se crea en procesos derivados de la radiación solar UV.

Sumado a la formación de partículas en suspensión, la radiación solar UV desencadena muchas otras reacciones químicas que están involucradas en la formación del smog, y especialmente en la generación del ozono a nivel del suelo (también llamado ozono troposférico), el cual además impacta de modo significativo en la salud humana y de las plantas. A su vez, la radiación solar UV-B está involucrada en

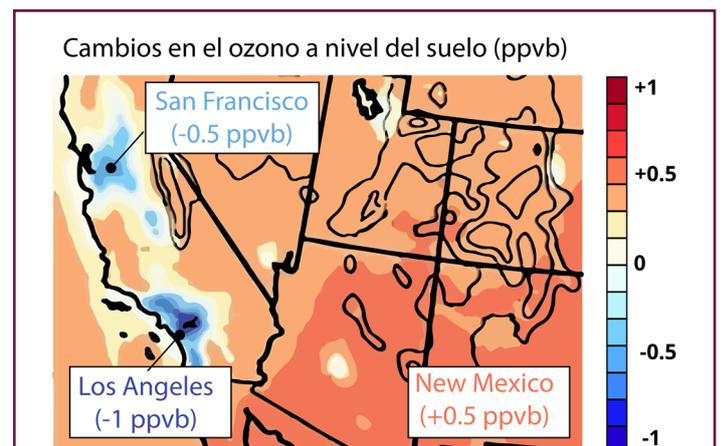


Figura P9-2. Cambio estimado en el ozono a nivel del suelo como resultado de la recuperación del ozono estratosférico.

El aumento en el ozono estratosférico (O₃) reducirá la radiación solar UV sobre la superficie de la Tierra, alterando la producción y destrucción del O₃ a nivel del suelo. La figura muestra que en el este de Estados Unidos, se espera que el O₃ a nivel del suelo (en partes por billón en volúmen, ppbv) disminuya en las grandes áreas urbanas y aumente en otros lugares como resultado de la elevación de 5% del O₃ estratosférico.

P10

¿Los químicos que reemplazan a las sustancias agotadoras del ozono provocarán nuevos problemas ambientales?

Los nuevos químicos que reemplazan a las sustancias agotadoras del ozono (SAO) se evalúan para resguardar la salud humana y ambiental antes de ser aprobadas para su uso, y hasta el momento hay pocos problemas. Sin embargo, debemos evitar la autocomplacencia y poner en práctica un manejo responsable de estas sustancias.

Las sustancias agotadoras del ozono y sus reemplazos tienen un efecto en el clima y en el medio ambiente. En principio, los clorofluorocarbonos (CFCs) y haloalcanos, que eran extensamente utilizados como refrigerantes y en una gran variedad de propósitos, fueron pensados para mantener al medio ambiente a salvo, pero no resultó así. Una vez en la estratósfera, estas sustancias desprenden cloro y bromo, los cuales destruyen el ozono estratosférico. Además, los CFCs son gases de efecto invernadero y contribuyen al calentamiento global. Cuando se propuso sustituir los CFCs utilizando hidrofluorocarbonos (HFCs) en la década de 1980 como una respuesta al Protocolo de Montreal, el potencial aporte al calentamiento global de estos químicos apenas se proyectaba. Cuando finalmente se reconoció su impacto, quedó claro que los HFCs solo podrían ser una solución de corto plazo.

Partes de las sustancias agotadoras de ozono y sus reemplazos pueden acumularse en el medio ambiente. Los actuales reemplazos para los CFCs (como los hidrocarburos e hidrofluoroolefinas) tienen menor efecto sobre el ozono estratosférico y el clima que los HFCs. Esto es porque se degradan antes de llegar a la estratósfera y tienen un bajo potencial de calentamiento global. Sin embargo, el ácido trifluoroacético (TFA), el último de los productos resultantes de la descomposición de estos químicos en la atmósfera (**Figura P10-1, 1**), genera preocupación debido a su persistencia en el ambiente. El TFA es soluble en agua y es lavado desde la atmósfera por las precipitaciones (**Figura P10-1, 2 - 3**).

En la tierra, el TFA se combina con los minerales del suelo y del agua para formar sales de TFA (**Figura P10-1, 4**) las que llegan a cuerpos de agua dulce o a los océanos (**Figura P10-1, 5**). En lugares donde hay poca o nula pérdida de agua y alta evaporación (océanos y lagos salados), la concentración de sales de TFA aumentará en el tiempo. No obstante, en lagos y océanos, los efectos de las altas concentraciones naturales de sales como el cloruro de sodio y otros minerales solubles en agua, son mayores y más biológicamente relevantes que los causados por sales de TFA. Las sales de TFA en el suelo son absorbidas por las raíces de las plantas y se concentran en sus hojas, donde no se han observado efectos. Al comerlas, los animales rápidamente excretan las sales de TFA y no se acumulan ni en sus cuerpos ni en la cadena alimenticia.

Según lo que se sabe hasta ahora, los productos de descomposición no son una preocupación ambiental. Según las estimaciones actuales y los futuros usos de HFCs y otros reemplazos de CFCs, los ingresos adicionales de TFA al océano sólo aumentarán ligeramente (menos de 0,5% anual). Ahora y en un futuro distante, las concentraciones de TFA previstas en aguas continentales y en las cuencas endorreicas son cientos de veces menores a una concentración de preocupación para la salud humana y ambiental. Sin embargo, el TFA también proviene de la descomposición de muchos otros productos como plásticos, pesticidas y fármacos. Al ser persistentes, se subraya la necesidad de monitorear las concentraciones de TFA y de tener en cuenta los potenciales efectos ambientales.

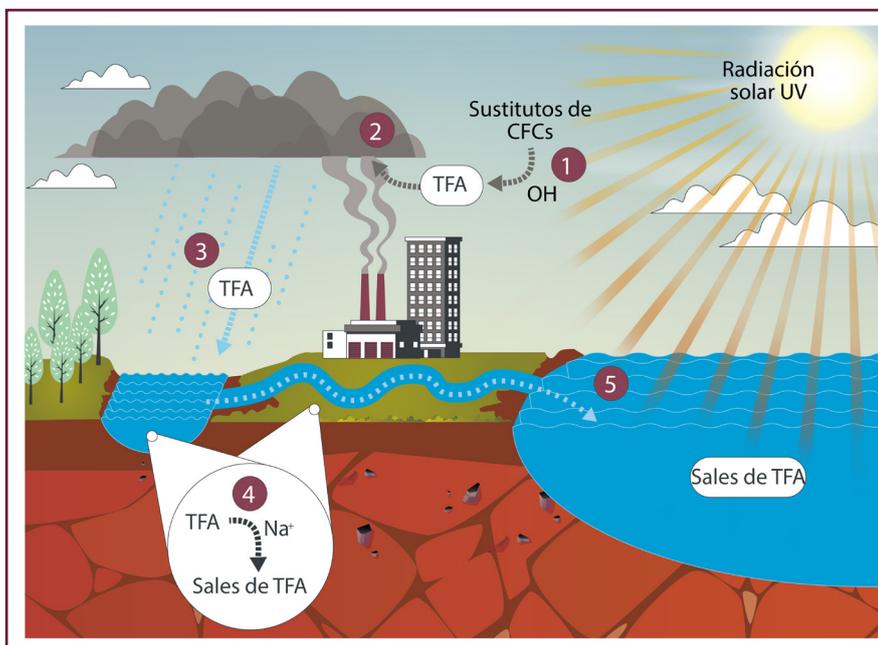


Figura P10-1. ¿De dónde proviene el ácido trifluoroacético (TFA) y hacia dónde va? El TFA se genera por la destrucción de una variedad de gases fluorados en la atmósfera (1). Una vez formado, se disuelve rápidamente en el agua de las nubes (2) y llega a la superficie de la Tierra a través de la lluvia o la nieve (3). Luego del contacto con el suelo o con el agua, se forman sales con iones metálicos como el sodio (4). Luego, estos fluyen con el agua superficial hasta llegar a una cuenca terminal (por ejemplo, lagos salados o al océano) (5). Las concentraciones de sales de TFA son menores en precipitaciones o flotando en las aguas superficiales, un poco mayor en los océanos, y mayores aún en pequeñas cuencas endorreicas donde se acumulan junto a otras sales minerales.

¿Cómo afecta la exposición a la radiación UV a la vida útil de los materiales en el exterior?

Materiales que se utilizan frecuentemente en la construcción, transporte, energía industrial y textilera son expuestos a la luz solar UV rutinariamente a lo largo de su vida útil. La pérdida de sus funciones (como la fuerza mecánica) o características superficiales (como color y aspereza) causados por la exposición a la luz solar determina su tiempo de vida útil al exterior. Para controlar la degradación inducida por la radiación UV, es frecuente el uso de protectores o la incorporación de muy bajas concentraciones de compuestos químicos que actúan como "pantallas protectoras" en el plástico. Aunque son efectivas en controlar la degradación por la radiación UV bajo varias condiciones de exposición, estos aditivos aumentan el costo global de la vida útil de los materiales de exterior. Algunos de estos aditivos pueden filtrarse fuera de los materiales durante su uso o luego de su eliminación y puede dañar al ecosistema debido a su toxicidad.

Los materiales pueden degradarse al estar expuestos a la luz solar. Algunos materiales usados en la construcción y en textiles son polímeros con base de carbono que pueden degradarse al absorber la radiación solar UV. Estos materiales poliméricos incluyen productos de madera y papel, polímeros sintéticos como plásticos y goma, y textiles como lana y poliéster. Estos polímeros tienen grupos químicos específicos (llamados cromóforos) que pueden absorber la radiación solar UV y desencadenar sus respectivas degradaciones. En materiales como la madera, los cromóforos son parte de la estructura de los polímeros; mientras que en otros materiales como el polietileno, son las impurezas químicas las que absorben la radiación solar UV.

La absorción de la radiación solar UV provoca reacciones químicas que frecuentemente conducen a la degradación de los materiales por la interrupción de la cadena que da la estructura a los polímeros. Ya que la fuerza del material y otras propiedades deseables (como su apariencia y características de la superficie) dependen de la presencia de cadenas largas e intactas de polímeros, la absorción de radiación solar UV compromete la utilidad de las propiedades como la durabilidad y la apariencia de la madera y plásticos que se utilizan al exterior. Es más, en aplicaciones prácticas como módulos fotovoltaicos, construcciones de edificios y

recubrimientos orgánicos protectores, esta reducción del tiempo de vida útil requiere de reemplazos más seguidos, aumentando a la larga los costos.

Decoloración, amarillar y resquebrajamiento son signos de degradación fotoquímica. Cuando se exponen los materiales a la radiación solar UV, hay tres signos que indican su degradación. Estos son desteñirse, tornarse amarillo y con la superficie resquebrajada (**Figura P11-1**).

Decoloración. Decolorar es el cambio de color causado principalmente por la exposición a la radiación solar UV, aunque el calor y la luz visible también pueden contribuir a este proceso. Este deterioro del color se observa en pinturas artísticas, productos protectores, textiles y plásticos. La radiación solar UV es más energética, pero menos intensa en el espectro solar que otras longitudes de onda. Sin embargo, la decoloración de telas y revestimientos causada por la radiación solar UV-B es común y con frecuencia limita la vida útil de estos productos. La radiación solar UV-A es menos energética que la radiación solar UV-B, pero en la superficie de la Tierra, la radiación solar tiene una más elevada proporción de UV-A en comparación con la radiación UV-B. Es por eso que la radiación solar UV-A es la principal causa de decoloración en los materiales en el exterior.



Figura P11-1. Signos de degradación en materiales inducida por la luz solar UV.

Amarillear. Al estar expuestos a la radiación solar, los plásticos pueden tornarse de color amarillo, un proceso que generalmente requiere de oxígeno (por lo tanto, de aire) para producirse. El amarilleamiento ocurre porque la oxidación de los polímeros debido a la radiación solar UV forman especies de químicos que son de color amarillo, es por eso que este color es indicativo de su degradación. Los polímeros de PVC cambian a una tonalidad amarilla al permanecer en exteriores, lo cual afecta su vida útil. Este proceso en los polímeros de PVC puede ocurrir incluso sin oxígeno.

Debilidad y resquebrajamiento. Al ser expuestos a la radiación UV, los plásticos presentan cambios químicos que pueden romper las largas cadenas de moléculas poliméricas en fragmentos más pequeños. Estas reacciones también pueden crear nuevas uniones químicas entre cadenas de polímeros haciendo al material más rígido con el tiempo. Ambos procesos debilitan al polímero, que tiende a cruji y partirse en vez de doblarse y ser elástico frente a una tensión mecánica. El debilitamiento de los materiales expuestos a la radiación solar causa una marcada reducción en la fuerza mecánica que puede soportar y su flexibilidad en el tiempo. Una extensa exposición a la radiación solar causa que los plásticos se reduzcan a pedazos al manipularlos. Entonces se dice que el material es resquebrajadizo, un fenómeno que contribuye a la generación de microplásticos en el ambiente (ver P12).

Existen varias estrategias para proteger a los materiales de la radiación solar. Existen varias estrategias para mitigar el daño que la radiación solar causa en la madera, los plásticos y las fibras textiles. Las tres estrategias más comunes son la protección, la estabilización y la remoción.

Protección. Implica la presencia de un aditivo en el plástico que físicamente bloquea la radiación solar e impide que ingrese en el material. Los aditivos más comunes para los plásticos son el carbono negro y el dióxido de titanio. En la madera, una manera común para reducir el daño causado por la luz solar y la humedad implica el uso de productos que recubren y protegen la superficie. Estos recubrimientos consisten en una película opaca que contiene pigmentos inorgánicos (como el dióxido de titanio) que protege a la madera de que la radiación UV penetre al interior.

Estabilizadores. Un segundo método para proteger los plásticos y la madera es usando estabilizadores. Un estabilizador puede ser un compuesto que absorba una gran cantidad de radiación solar UV y así reducir la cantidad de luz que podría degradar el material. Los estabilizadores de UV son efectivos a muy bajas concentraciones, normalmente menos de 0,1% del peso del material. Los estabilizadores mitigan el daño de la radiación solar UV en los materiales, y en la mayoría de los casos, pueden mantener la vida útil de los productos incluso bajo extensas exposiciones a la radiación UV. Sin embargo, estos aditivos añaden costos al material y pueden contaminar el ambiente cuando se filtran fuera del material o de la capa protectora.

Removedores. Una tercera estrategia es detener el progreso de la degradación usando un removedor. La radiación UV normalmente gatilla reacciones de radicales libres, los cuales pueden crear más daño oxidativo a los materiales. Los removedores son moléculas que pueden atrapar a esos radicales libres y detener las reacciones de oxidación en cadena, previniendo así el daño en las cadenas de polímeros. El grupo de removedores más utilizado para los plásticos poliolefina son los estabilizadores de luz a base de aminas impedidas (hindered amine light stabilisers, HALS).

¿Cuál es la relación entre los microplásticos y la radiación solar UV?

Los microplásticos son pequeñas piezas de plásticos comunes y corrientes. Se generan por la fragmentación de grandes cantidades de plástico descartado a través de un proceso que incluye el desgaste por la radiación solar UV. Estas pequeñas partículas de plástico (menor a 5 mm) están esparcidas por todos los ambientes y hay una preocupación considerable sobre sus potenciales efectos en los organismos vivos.

Los microplásticos son ubicuos en el medioambiente. Los microplásticos son pequeñas piezas de materiales plásticos generalmente definidos como partículas inferiores a 5 mm en una sola dimensión. Los estudios demuestran esta ubicuidad en aguas marinas y limpias, en el aire, los suelos, y en los organismos vivos; incluso en áreas remotas, como en el Ártico y en los sedimentos del mar profundo. Aún más preocupantes son los recientes hallazgos de microplásticos en el agua potable e incluso en la sangre humana. Hay una preocupación considerable por el potencial impacto de los microplásticos en los organismos, particularmente en los seres humanos.

La radiación UV es clave en el medio ambiente como factor responsable de la formación de microplásticos. Hay dos preguntas claves respecto a los microplásticos en el medio ambiente: ¿Cómo se forman? y ¿Cuánto van a durar? La mayoría de los microplásticos en el medioambiente se forman por la fragmentación de grandes plásticos descartados como botellas, envoltorios y bolsas. La descomposición comienza con la erosión de los plásticos, un proceso mediado fundamentalmente por la radiación solar UV. La radiación UV comienza erosionando la superficie, y facilitando su ruptura y socavamiento, generando restos de plásticos (ver P11). La fragmentación también requiere que el plástico erosionado quede expuesto a una fuerza mecánica como una turbulencia del oleaje en los océanos, masticada por organismos o raspados por la arena (Figura P12-1). La zona "slush" (en inglés,

agua granizada) de las playas es particularmente significativa, donde el oleaje bate las aguas, la arena, y cualquier desecho plástico, resultando en la formación de microfragmentos de plástico. La radiación solar UV es clave en el desgaste y subsecuente fragmentación de gran cantidad de plásticos descartados. El cambio climático impacta el ritmo de este proceso, al modificar la cantidad y la composición del espectro de radiación UV, la distribución de los plásticos, y las fuerzas mecánicas como el movimiento y energía del oleaje.

La degradación fotoquímica de los plásticos puede emitir dióxido de carbono. Estudios de laboratorio indican que algunos tipos de plásticos se descomponen totalmente en forma de dióxido de carbono después de exponerlos a la radiación solar UV. Aún falta por establecer la relevancia de este proceso para los ecosistemas, ya que podría ser demasiado lento para reducir significativamente la gran cantidad de plásticos descartados en el medioambiente. La implementación del Protocolo de Montreal y la legislación relacionada con éste, pudo haber reducido la formación de microplásticos al disminuir la cantidad de radiación UV que gatilla este proceso. Por otra parte, menores cantidades de radiación UV significa que menos desechos de microplásticos fueron transformados en dióxido de carbono, disminuyendo la remoción de microplásticos del medio ambiente. Por ahora, no hay suficiente información para cuantificar la contribución de estos procesos opuestos y su impacto neto en el ambiente.

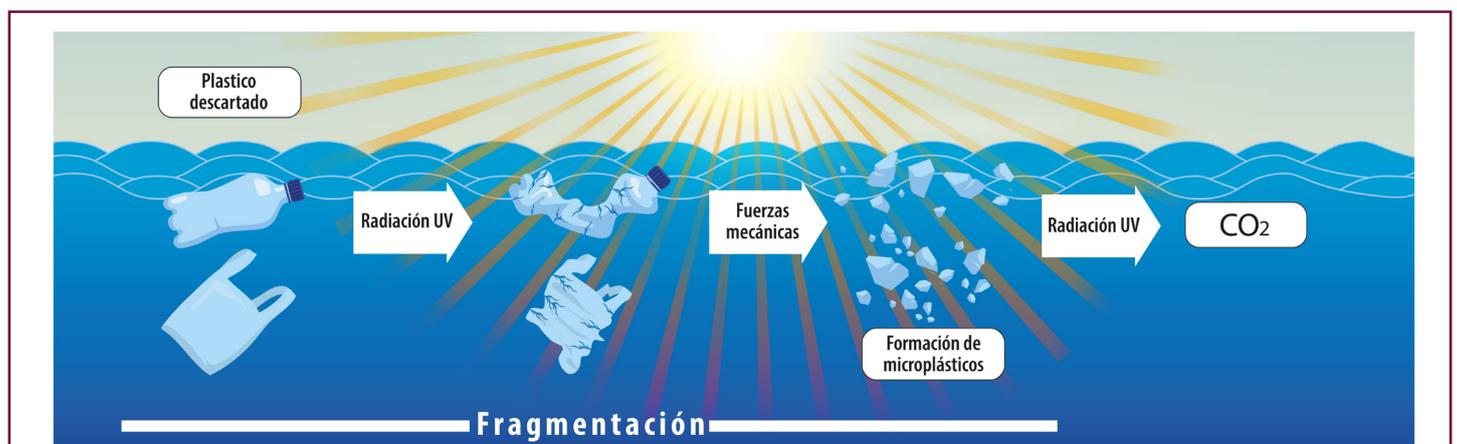


Figura P12-1. La radiación solar UV puede regular la foto-oxidación de los plásticos, causando desgastes en estos y haciéndolos proclives a la fragmentación, un proceso que resulta en la formación de partículas de microplásticos. Aún queda por saber la relevancia de la degradación de los plásticos hasta dióxido de carbono en los ambientes naturales. El clima impacta la foto-oxidación a través de distintos mecanismos, incluyendo efectos directos sobre la radiación solar UV, la dispersión de los plásticos y la formación de fuerzas mecánicas que aumentan la fragmentación, como el oleaje.

Fuentes de Imágenes

- P1-2 Reproducido de WHO, 2002: Índice de radiación global solar ultravioleta: Una Guía Práctica. WHO/SDE/OEH/02.2, 28 pp., <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42459>
- P1-3 Actualizado de WHO, 2002: Índice de radiación global solar ultravioleta: Una Guía Práctica. WHO/SDE/OEH/02.2, 28 pp., <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42459>
- P1-5 Reproducido de 20 Preguntas y Respuestas Acerca de la Capa de Ozono 2022, disponible en <https://ozone.unep.org/science/assessment/sap>. Este documento es un componente del Reporte WMO/UNEP Panel de Evaluación Científica de la Disminución del Ozono 2022. Imagen proporcionada por Chelsea R. Thompson, NOAA Chemical Sciences Laboratory
- P1-6 Proporcionada por J. Ben Liley, Instituto Nacional de Agua e Investigación Atmosférica, Nueva Zelanda.
- P2-1 Adaptado de Bernhard, G.H., McKenzie, R.L., Lantz, K. et al. Análisis actualizado con datos de Palmer Station, Antártica (64° S), y San Diego, California (32° N), que confirman los grandes efectos de la radiación ultravioleta debido al agujero de ozono de la Antártica. Photochem Photobiol Sci 21, 373–384 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43630-022-00178-3>
- P3-1 Actualizado de Bornman, Janet F., Paul W. Barnes, T. Matthew Robson, Sharon A. Robinson, Marcel AK Jansen, Carlos L. Ballaré, y Stephan D. Flint. "Relaciones entre el Ozono Estratosférico, la Radiación Ultravioleta y el Cambio Climático y sus Implicaciones en Ecosistemas Terrestres" Photochem Photobiol Sci, 18, no.3 (2019): 681-716. <https://doi.org/10.1039/C8PP90061B>. Imagen provista por Sharon A. Robinson, Universidad de Wollongong, Australia.
- P6-2 Provista por Sharon A. Robinson, Universidad de Wollongong, Australia.
- P7-1 Adaptación de la Imagen 1 de Adams, N. L., Campanale, J. P. & Foltz, K. R. (2012). Respuestas Proteómicas de embriones de erizos de mar al estrés por radiación ultravioleta. Biología Integrativa y Comparativa, 52(5), 665-680. <https://doi.org/10.1093/icb/ics058>. Utilizada con permiso de Nikki L. Adams.
- P8-1 Provista por el Centro de Datos de Hielo y Nieve, Estados Unidos.

Imágenes no aparecidas en este Listado fueron o dibujadas especialmente para este Reporte P&R o reproducidas del Reporte de Evaluación del UNEP Panel de Evaluación de Efectos del Medio Ambiente, disponible en <https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap>

Lista de acrónimos

CFC	Clorofluorocarbono
CO₂	Dióxido de carbono
ADN	Ácido desoxirribonucleico
EEAP	Panel de Evaluación de Efectos Ambientales
HFC	Hidrofluorocarbono
nm	Nanómetro
NO_x	Óxido de nitrógeno
O₃	Ozono
SAO	Sustancias Agotadoras de Ozono
PS	Partículas en Suspensión
MP_{2.5}	Material Particulado menor a 2.5 mm
ppbv	Partes por billón en volumen
PVC	Cloruro de Polivinilo
TFA	Ácido trifluoroacético
UNEP	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UV	Ultravioleta
UV-A	Ultravioleta A
UV-B	Ultravioleta B
UV-C	Ultravioleta C
COV	Compuesto orgánico volátil

Autores y Colaboradores

Autores Afiliados

Mads P. Sulbaek Andersen	California State University	Estados Unidos
Anthony L. Andrady	North Carolina State University	Estados Unidos
Alkiviadis F. Bais	Aristotle University of Thessaloniki	Grecia
Paul W. Barnes	Loyola University	Estados Unidos
Germar H. Bernhard	Biospherical Instruments Inc.	Estados Unidos
Scott N. Byrne	The University of Sydney	Australia
Anu M. Heikkilä	Finnish Meteorological Institute	Finlandia
Rachael Ireland	The University of Sydney	Australia
Marcel A.K. Jansen	University College Cork	Irlanda
Sasha Madronich	National Center for Atmospheric Research	Estados Unidos
Richard L. McKenzie	National Institute of Water and Atmospheric Research	Nueva Zelanda
Rachel E. Neale	QIMR Berghofer Medical Research Institute, U. of Queensland	Australia
Patrick J. Neale	Smithsonian Environmental Research Center	Estados Unidos
Rachele Ossola	Colorado State University	Estados Unidos
Qing-Wei Wang	Chinese Academy of Sciences	China
Sten-Åke Wängberg	University of Gothenburg	Suecia
Christopher C. White	Exponent Inc.	Estados Unidos
Stephen R. Wilson	University of Wollongong	Australia
Richard G. Zepp	United States Environmental Protection Agency	Estados Unidos

Autores Colaboradores

Pieter J. Aucamp	Ptersa Environmental Consultants	Sudáfrica
Anastazia T. Banaszak	Universidad Nacional Autónoma de México	México
Marianne Berwick	University of New Mexico	Estados Unidos
Janet F. Bornman	Murdoch University	Australia
Laura S. Bruckman	Case Western Reserve University	Estados Unidos
Bente Foeroid	Norwegian Institute of Bioeconomy Research	Noruega
Donat-P. Häder	Friedrich-Alexander University	Alemania
Loes M. Hollestein	University Medical Center Rotterdam	Países Bajos
Wen-Che Hou	National Cheng Kung University	China
Samuel Hylander	Linnaeus University	Suecia
Andrew R. Klekociuk	Australian Antarctic Division	Australia
J. Ben Liley	National Institute of Water & Atmospheric Research	Nueva Zelanda
Janice D. Longstreth	The Institute for Global Risk Research	Estados Unidos
Robyn M. Lucas	Australian National University	Australia
Roy Mackenzie-Calderón	Universidad de Magallanes, Cape Horn International Center, Millenium Institute Biodiversity of Antarctic and Subantarctic Ecosystems	Chile
Javier Martinez-Abaigar	University of La Rioja	España
Catherine M. Olsen	Queensland Institute of Medical Research	Australia
Krishna K. Pandey	Institute of Wood Science and Technology	India
Nigel D. Paul	Lancaster University	Reino Unido
Lesley E. Rhodes	The University of Manchester	Reino Unido
Sharon A. Robinson	University of Wollongong	Australia
T. Matthew Robson	University of Cumbria, University of Helsinki	Reino Unido, Finlandia
Kevin C. Rose	Rensselaer Polytechnic Institute	Estados Unidos
Tamara Schikowski	Leibniz Research Institute for Environmental Medicine	Alemania
Keith R. Solomon	University of Guelph	Canadá
Barbara Sulzberger	Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology	Suiza
Craig E. Williamson	Miami University	Estados Unidos
Seyhan Yazar	Garvan Institute of Medical Research	Australia
Antony R. Young	King's College London	Reino Unido
Liping Zhu	Donghua University	China
Meifang Zhu	Donghua University	China

La edición 2022 de *Preguntas y Respuestas acerca de los Efectos de la Disminución del Ozono, la Radiación Ultravioleta y el Clima en los Humanos y el Medio Ambiente*, entrega un resumen que destaca el importante rol del Protocolo de Montreal en la protección de la vida sobre la Tierra. Este documento apunta a tomadores de decisiones, público en general, profesores y científicos para aumentar la conciencia de una serie de asuntos importantes sobre la radiación UV y su interacción con el cambio climático. La información a fondo puede encontrarse en el *Reporte de Evaluación EEAP 2022*, disponible en <https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap>.

Preguntas y Respuestas acerca de los Efectos de la Disminución del Ozono, la Radiación Ultravioleta y el Clima en los Humanos y el Medio Ambiente

