



OBSERVATORIO AMBIENTAL ARGENTINO



INFORME VI

La solución adoptada para cerrar el hueco de ozono, ¿es definitiva?

Sobre como varias causas antropogénicas confluyen para dejar dudas sobre el futuro del hueco de ozono



AZARA

DESCUBRÍ TU ESPÍRITU EXPLORADOR

www.fundacionazara.org.ar

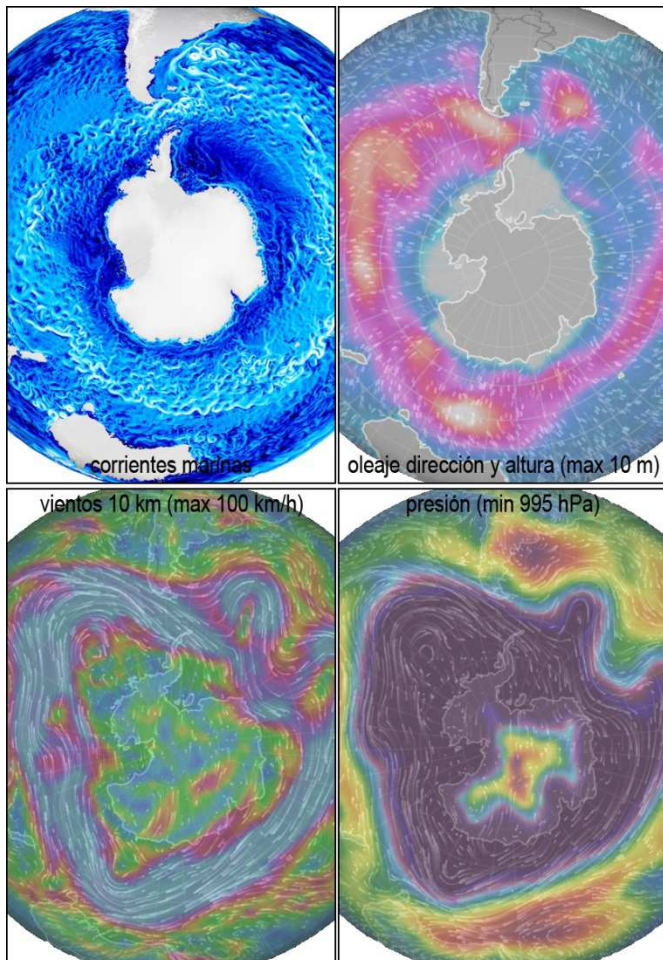


La solución adoptada para cerrar el hueco de ozono, ¿es definitiva?

Sobre como varias causas antropogénicas confluyen para dejar dudas sobre el futuro del hueco de ozono

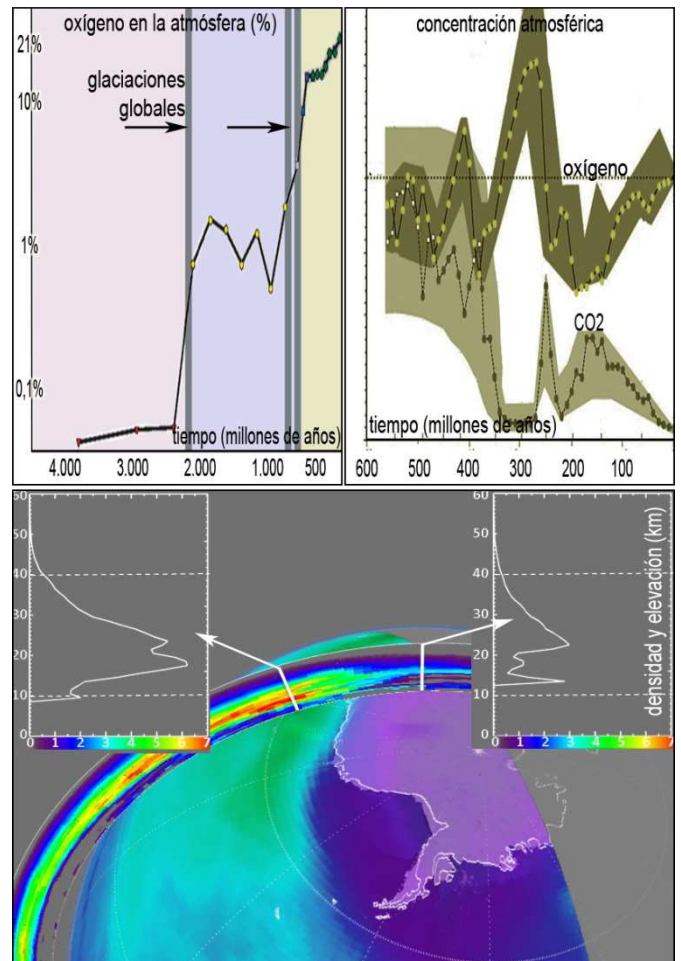
El 2 de octubre de 2015, el hueco de ozono en la Antártida llegó a su máximo anual ocupando 28,2 Mkm² (millones de kilómetros cuadrados). Este valor es el cuarto en orden de magnitud desde 1979. El máximo ocurrió en el 2006 con 26,6 Mkm². El hueco de ozono se define como el área que cae debajo del umbral de 220 unidades Dobson en la concentración. El 4 de octubre del 2015 se midió el valor mínimo anual de 101 unidades Dobson de ozono, el mínimo histórico es de 92,3 en 1994. Si bien hace décadas se empezó a reducir los gases CFC que consumen el ozono atmosférico, el efecto va a durar decenas de años más debido a la persistencia de los gases y se tienen dudas por otras causas que podrían interferir en la recuperación. Los acontecimientos son los siguientes.

La Antártida está aislada. La posición geográfica y la forma de la Antártida le dan características especiales para el clima que la envuelve. Desde que la Península Antártica se separó de Sudamérica (entre 49 y 17 Ma, millones de años atrás) se formó una corriente circumpolar que rodea completamente al continente. De la misma forma, la circulación de vientos en la atmósfera, sumado a un centro de baja presión, le confieren un cierre hermético en el espacio aéreo. Tanto la circulación oceánica como la atmosférica mantienen el sentido de las agujas del reloj. Hay un adentro y un afuera de este anillo. Las temperaturas de las costas oscilan entre -15 y -35 °C y hacia el interior bajan a -70 °C. Los vientos pueden llegar a 200 km/h en la superficie. Estas características determinan que el hueco de ozono también sea circular.



La Antártida se encuentra aislada por mar y aire. En el océano que la rodea, las corrientes (superficial y profunda) circulan en el sentido de las agujas del reloj (arriba). En el aire, los vientos y la presión forman una corona que mantiene el aislamiento del continente. Esta es la causa de que el hueco de ozono aparezca como circular.

El origen del oxígeno. La innovación más importante en la primera etapa de la Historia Natural fue la fotosíntesis. Las primeras cianobacterias (bacterias verde-azuladas unicelulares) se alimentaban absorbiendo moléculas orgánicas largas desde el medio. La invención de la fotosíntesis permitió capturar la radiación solar y usarla para unir moléculas cortas formando otras más largas. Así, las bacterias se independizaron de la absorción de alimentos y se dedicaron a producirlos. Al inicio de la vida la fotosíntesis usaba sulfuro de hidrogeno y con el uso de radiación solar separaban el hidrogeno del azufre. La evolución inicial ocurrió en el agua, un refugio natural contra la radiación ultravioleta. El oxígeno molecular (O₂) y el ozono (O₃) aparecieron en la atmósfera hace 2.500 Ma. Antes, el oxígeno estaba presente, pero asociado a otros elementos (H₂O, SO₂, NO₂, óxido de metales) y los volcanes liberaban gases con oxígeno (CO₂, SO₂, vapor de agua). La acción de la radiación ultravioleta UV produciría la foto-degradación de estas moléculas enriquecieron la atmósfera con una baja concentración de O₂.

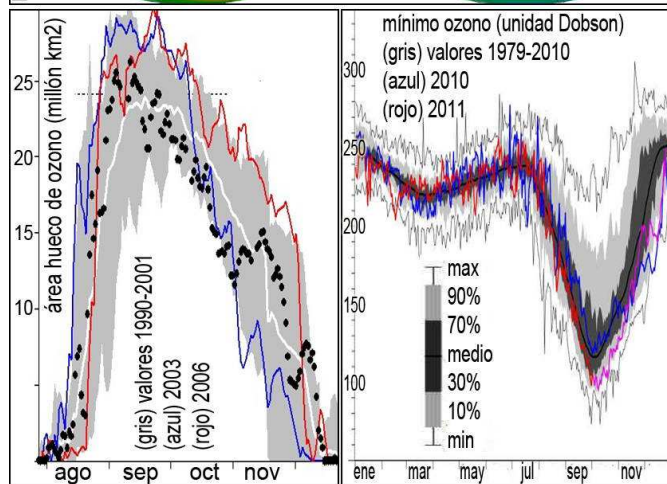
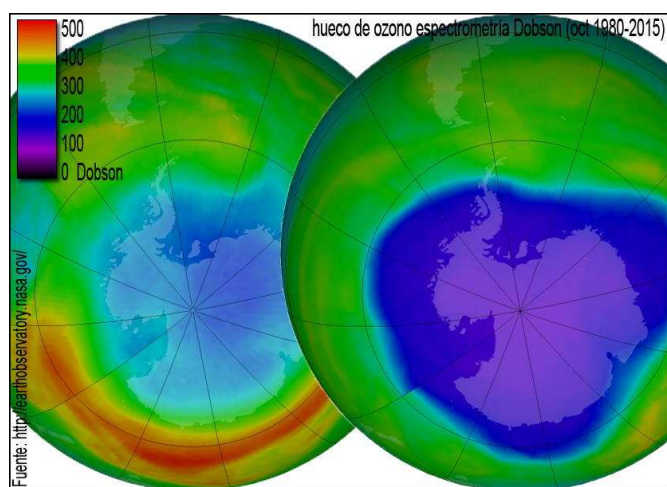


El oxígeno aumentó en la historia de la Tierra hasta el 21% actual (arriba). El oxígeno en la atmósfera es el resultado de la vida. El ozono (O₃) es una molécula de oxígeno que se distribuye en la alta atmósfera (10 a 40 km de altura). La concentración de ozono depende de variables naturales y algunas antropogénicas. La pérdida de ozono tiene consecuencias graves para los seres vivos.

La aparición de primitivas bacterias con fotosíntesis de carbono, permitiría la liberación de oxígeno adicional. La acumulación en la atmósfera cambiaría su condición de reductora a oxidante. Con la atmósfera enriquecida con O₂, se originó la capa de ozono (O₃). Hace 600 Ma un incremento del oxígeno permitió la explosión de la vida pluricelular, en tanto el O₃ aseguró la colonización de la tierra. El O₂ supuso la

desaparición de organismos existentes (anaeróbicos), y la aparición de nuevas formas de vida. El oxígeno es necesario (no es esencial) para la vida, pero también es un gas letal, corrosivo y tóxico. Por ello, los organismos han desarrollado mecanismos físicos y bioquímicos para protegerse de los efectos tóxicos del O₂.

La capa de ozono. En la estratósfera terrestre (10-50 km de altitud) la temperatura aumenta con la altura desde -55 y 0 °C y la humedad es casi inexistente. La concentración de ozono está entre 2 y 8 ppm (partes por millón). Todo el ozono disponible son 3.000 Mt (millones de toneladas), de forma que si fuera comprimido a la presión del aire al nivel del mar, ocuparía una capa de 3 mm de espesor (son 300 unidades Dobson). La estratósfera reúne el 90% del ozono y absorbe el 97-99% de la radiación ultravioleta UV que proviene del sol. Cuando los rayos UV (200-300 nm) impactan en una molécula de ozono (O₃) la divide en oxígenos muy reactivos que casi de inmediato se recombinan formando otra vez ozono y liberando energía en forma de calor (infrarrojos). Este proceso convierte radiación UV en IR y protege la vida en la superficie terrestre. Pero la presencia de cloro de origen humano interrumpe este proceso.

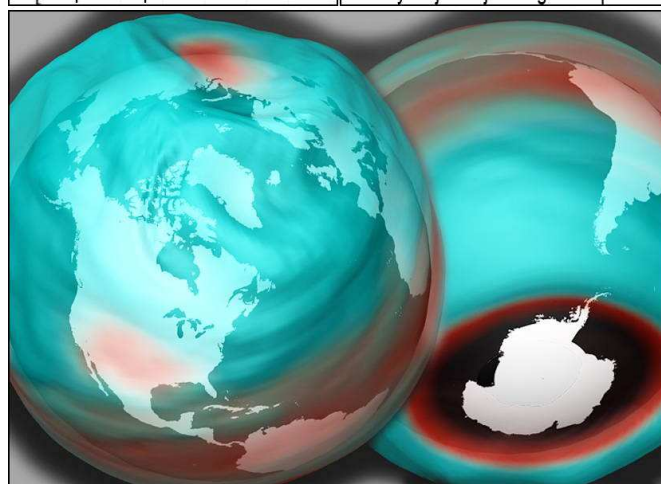
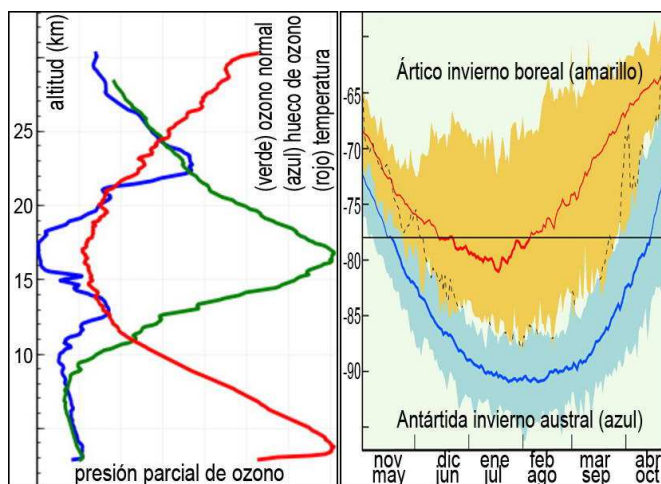


El hueco de ozono es medido desde 1979. En el hemisferio sur es un círculo que llega a su máximo en septiembre-octubre tanto en el área como en el mínimo valor de concentración Dobson (abajo).

La capa de ozono fue descubierta en 1913 y entre 1928 y 1958 se estableció una red mundial de estaciones de monitoreo. La unidad de medida es el Dobson (científico que diseñó el medidor de ozono) y 100 Dobson equivale a 1 mm de ozono a presión de 1 atmósfera ($2,69 \times 10^{16}$ moléculas/cm²). Si esta capa se degrada (se reduce el valor de Dobson) la radiación UV llega con más densidad a la superficie del planeta. Aunque el ozono funciona como un escudo protector, deja pasar rayos UV de onda

larga, que son aprovechados para la fotosíntesis. El seguimiento histórico de la capa de ozono alertó sobre el riesgo que se corría en el polo sur por reducción de la concentración.

Existe una fluctuación natural en la concentración de ozono que es anual y depende de la temperatura. El valor de Dobson llega a un mínimo durante la primavera (septiembre-octubre) en el hemisferio sur. La reducción del ozono y formación de un hueco se debe a dos razones: la extrema baja temperatura y el cierre debido al cinturón de vientos que ocurre en las capas medias de la atmósfera (10-15 km de altura). Se lo denomina "vórtice polar" y la velocidad depende de la diferencia de temperatura entre el interior y exterior. Este cinturón de vientos aísla el interior (la Antártida) de forma que mantiene menores temperaturas y facilita las reacciones químicas que descomponen el ozono. El efecto de aislamiento hace que el hielo austral se mantenga casi estable y que contraste con el Océano Ártico y Groenlandia.

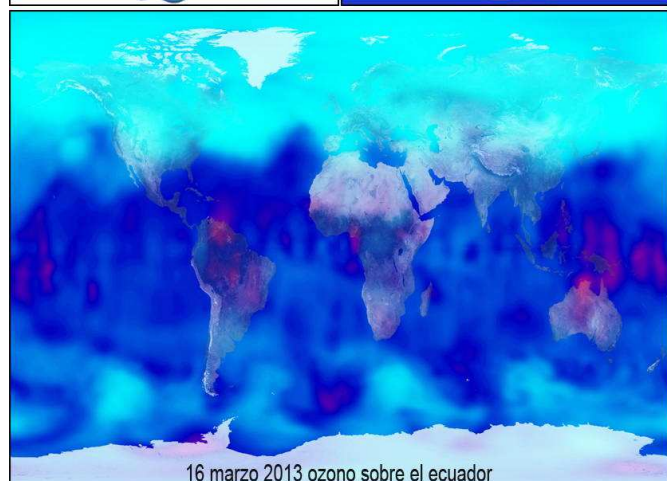
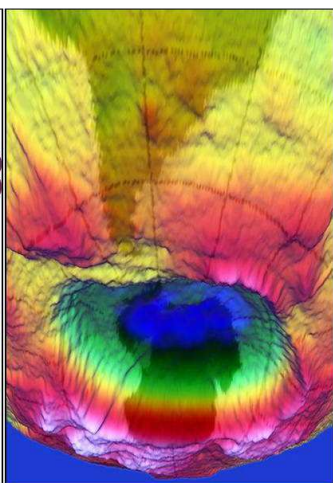
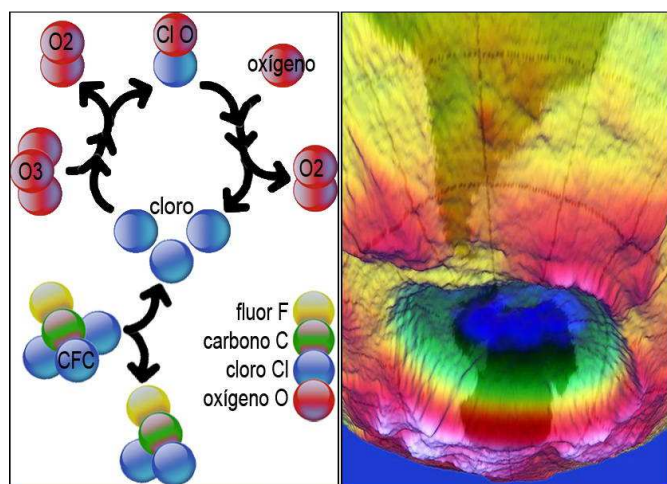


El hueco de ozono depende de la temperatura y como las temperaturas del hemisferio norte son mayores a la Antártida, el hueco de ozono no se forma en el norte. Una imagen en movimiento mostraría un hueco sur estable y en el norte huecos pequeños y en movimiento siguiendo la danza de los vientos.

El hemisferio norte. Las condiciones de aislamiento en el norte no son iguales al sur. Existe un vórtice polar pero es mucho más inestable debido a la mezcla producida por la acción de las masas continentales. Esto genera "meandros" desde el vórtice principal. Los meandros más grandes aumentan la velocidad del viento, pero el efecto completo se mueve más lento. Así, existen ciclos de frío-calor que no se observan en Antártida. El hueco de la capa de ozono en el norte ocurre en marzo y la concentración se reduce en 25%, mientras que en el sur es del 55% en septiembre. Si

bien el hueco de ozono en el sur se estabilizó en los últimos años y hay expectativas que podría cerrarse a mediados de siglo, algunas evidencias ponen en duda este optimismo. Por ejemplo, se pensaba que el cambio climático y el hueco de ozono eran efectos independientes. Pero, en 2012 se encontró que las fuertes tormentas de verano en Estados Unidos elevan la humedad hasta la estratosfera y, luego de una cadena de reacciones químicas, ataca a las moléculas de ozono.

Causas antropogénicas. Hay varios productos químicos de origen humano que conspiran contra la estabilidad de la capa de ozono. El más importante es la familia de los CFC (cloro-flúor-carbono) que son derivados de hidrocarburos donde el hidrógeno se reemplaza por flúor, cambiando las propiedades físico-químicas. Los CFC se utilizaban en refrigeración, solventes y envases desechables. Las moléculas son insolubles en agua y no son reactivas. Así que siguen un lento viaje (10-20 años) hasta la tropósfera donde interactúan con la luz UV, liberando cloro en el proceso. Este cloro degrada el ozono a una velocidad más rápida que en condiciones naturales. La formación y destrucción del ozono por procesos naturales se encuentra en equilibrio dinámico, pero el CFC acentúa las reacciones lo que reduce la proporción de ozono. El cloro reacciona con el ozono (O₃) y libera monóxido de cloro (ClO) y oxígeno molecular (O₂). El ClO vuelve a reaccionar con el oxígeno para liberar Cl y O₂. El circuito se repite, de forma que un átomo de cloro puede destruir más de 100.000 moléculas de ozono.

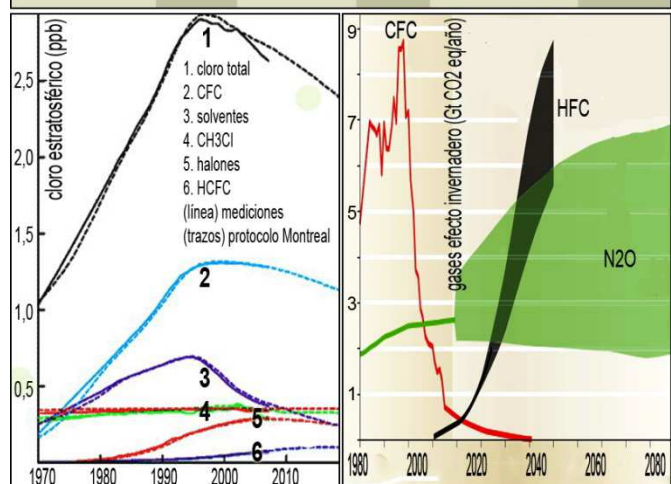


El monóxido de cloro (ClO) se forma en condiciones muy frías y con presencia de nubes (Antártida en invierno). Los gases con cloro se convierten en ClO y participan del ciclo que destruye las moléculas de ozono. Más allá del hueco de ozono, en forma esporádica, pueden verse pequeños huecos distribuidos en el planeta (abajo, el rojo indica el mínimo de ozono).

Por más de 50 años hasta el 2000, el CFC de la alta atmósfera aumentó en forma constante. La ONU firmó el Protocolo de Montreal para reducir la emisión de gases que afectan a la capa de ozono. En 1987 se dispuso reducir al 50% la producción de CFC en un período de 10 años y más tarde fueron reemplazados. En la Argentina el consumo de CFC se redujo de 6.371 toneladas en 1995 a 28 t en el 2011. Hoy día, la concentración atmosférica de CFC se reduce a un ritmo lento del 1% anual a nivel global.

Pero reemplazar los gases CFC no basta. El óxido nitroso N₂O se convirtió en el principal responsable del ataque a la capa de ozono. En la naturaleza, las bacterias en el suelo y los océanos descomponen compuestos que contienen nitrógeno y liberan N₂O. Además, se adiciona un aporte humano como subproducto de la fertilización agrícola y procesos industriales. Se emite desde el estiércol del ganado, tratamiento de aguas residuales y la combustión de hidrocarburos. Alrededor de un tercio de las emisiones globales de óxido nitroso provienen de las actividades humanas y la prohibición o reemplazo, como en el caso de los CFC, es casi imposible.

compuesto químico industrial	fórmula química	efecto sobre calentamiento	efecto s/ el ozono	aumento 1750-1994 (ppbv)	tiempo vida (años)
dióxido de carbono	CO ₂	1		278k a 358k	100
metano	CH ₄	21		700 a 1721	12,2
óxido nitroso	N ₂ O	310		275 a 311	120
perfluorometano	CF ₄	6.500		0 a 0,070	50.000
sulfuro hexa-fluoruro	SF ₆	23.900		0 a 0,032	3.200
clorofluorocarbono	CFC	4.750-14.400	0,6-1	0 a 0,503	102
hidroCFC	HCFC	124-14.800	0-0,2	0 a 0,105	12,1
bromuro de metilo	CH ₃ Br ₃	5	0,6		
halones		1.640-7.140	3-10		
tetracloruro carbono	CCl ₄	1.400	1,1		
metilcloroformo	CH ₃ CCl ₃	146	0,1		



El listado de compuestos químicos de origen antropogénico que conspiran contra la capa de ozono es muy amplio. Por ejemplo, se tiene el bromuro de metilo (usado en fumigantes) y el tetracloruro de carbono (en pesticidas y limpieza a seco). Existen muchos gases que pueden producir ClO, donde el más importante son el grupo de CFC. Para el futuro se espera que los gases HFC que reemplazan al CFC y el N₂O sean los principales enemigos del ozono.

Prohibición y reemplazos. El Protocolo de Montreal propició la eliminación de sustancias que agotan la capa de ozono, pero el "efecto rebote" (Paradoja de Jevons) amenaza acelerar el ritmo del calentamiento global debido al uso de HFC, los sustitutos. Los HFC son sustancias similares a los CFC, pero no contienen cloro. Se utilizan en aire

acondicionado y refrigeradores, como propelentes en aerosoles, como disolventes y como agentes de formación de espuma.

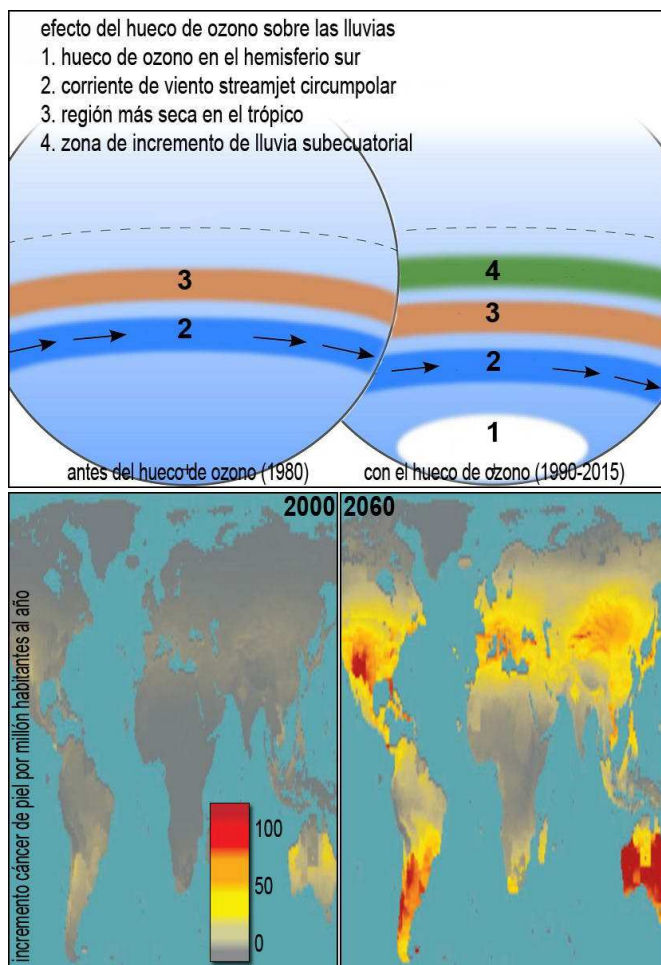
Una forma de observar el efecto de la concentración de gases es el forzamiento radiactivo (cambio forzado en la energía entrante o saliente de un sistema climático). Mide la cantidad de potencia (Watt) que se absorbe por metro cuadrado y que se suma al calentamiento global. Hasta el 2000 todas las sustancias (incluido CFC) se mantuvieron en un valor cercano a 0,32 W/m², comparado con 1,5 W/m² para el CO₂. Pero, sin el Protocolo de Montreal, el valor actual sería 0,65 W/m², lo cual es un éxito. Sin embargo, se teme que el efecto rebote debido a que el uso de HFC aumenta a un ritmo de 10-15% anual. Por el momento, el efecto es muy bajo, de 0,012 W/m² para todos los sustitutos de los CFC combinados. Pero el uso de HFC aumenta por la creciente demanda y se estima llegará a 0,25-0,4 W/m² para el año 2050. La solución pasa por agregar al Protocolo de Montreal la limitación al uso compuestos HFC de larga vida. En los Estados Unidos, los refrigeradores son enfríados con HFC-134a, pero en Suiza está prohibido y se usan reemplazos neutrales para el clima.

En el 2016 se puso en evidencia el uso de PFC (perfluorocarbono) en los productos impermeables para uso al aire libre de The North Face y Mammut. Los PFC son derivados de hidrocarburos donde se reemplaza el hidrógeno por el flúor. Son gases efecto invernadero (6.500 veces mayor al CO₂) y tienen una larga persistencia (hasta 50.000 años). Lo paradójico es que empresas que dicen defender el ambiente usan productos que lo agreden. The North Face anunció que dejarían de usar PFC en el 2020 y Mammut afirma que usan PFC "sólo cuando sea absolutamente necesario", y que han "dejado de usar PFC de cadena larga". Sin embargo, las pruebas científicas encontraron PFC en todos los productos Mammut. En zapatos y una mochila, se encontraron PFC de cadena larga que resultan más peligrosos. Mammut argumenta que "la calidad y durabilidad proporcionan la mayor sostenibilidad". Pero, otras marcas ya muestran un camino más sustentable con un sistema de reciclado y de "recuperación" de los productos PFC.

Desde la Segunda Guerra Mundial se fabricaron más de 85.000 productos químicos industriales. Cuando la Ley de Control de Sustancias Tóxicas se promulgó en 1976, la industria química aseguró que 62.000 sustancias químicas existentes deberían considerarse con "derechos adquiridos" y por lo tanto sin necesidad de evaluaciones de salud o impacto ambiental. A día de hoy, sólo una fracción de los productos químicos fueron evaluados y las consecuencias se conocen a cuenta gotas. Por ejemplo, las mediciones atmosféricas muestran un incremento rápido de diclorometano (cloruro de metileno) de origen natural e industrial que degrada el ozono. El origen natural se debe a las algas marinas y en la actualidad representa el 90% del total. Sin embargo, la contribución industrial va en aumento acelerado. Una posible causa es que se usa diclorometano para fabricar HFC: los gases "amigos del ozono", se fabrican con un enemigo.

Consecuencias de la pérdida de ozono. Hace 250 Ma, al final del período Pérmico, se produjo la extinción más importante de especies de la vida. Un candidato para la causa de este evento fue la liberación de gases en una amplia franja de roca volcánica en Rusia, llamado "trampas siberianas". Las emisiones volcánicas, tanto de dióxido de carbono (CO₂) y el dióxido de azufre (SO₂) podrían haber creado lluvia muy ácida, lo que produjo lixiviación de nutrientes del suelo y daños en las plantas y otros organismos vulnerables. Las emisiones de compuestos halogenados (cloruro de metilo) pudieron haber colapsado el ozono global. La actividad volcánica pudo ser episódica, produciendo pulsos de la lluvia ácida y el agotamiento del ozono. La hipótesis dice que las drásticas fluctuaciones del pH y la radiación ultravioleta, junto con el aumento de temperatura por los gases de efecto invernadero, podrían haber contribuido a la extinción masiva. Hoy día la pérdida de ozono puede provocar casos de melanomas (cáncer) de piel; cataratas oculares; supresión del sistema inmunitario (lo que facilita el ataque de virus y bacterias); puede afectar a los cultivos sensibles a la radiación UV; disminuir la calidad de los tomates y papas;

puede atacar larvas de peces en el agua y afectar la vida marina hasta 20 m de profundidad.



Dos consecuencias del hueco de ozono. Por un lado, el hueco de ozono está corriendo hacia el sur el cinturón de viento circumpolar. Esto lleva a menores lluvias en Patagonia (arriba). También aumentará el número de casos de cáncer de piel por rayos UV. Las zonas más afectadas en el 2060 será la Argentina, Australia y el desierto de México.

La reducción de ozono es responsable del corrimiento hacia el sur de los vientos en la Patagonia. La mayor radiación solar incrementó y llevó el círculo de vientos antárticos hacia el sur. Esto redujo las lluvias en los bosques andinos e impactó en el crecimiento de los árboles que alcanzó el mínimo de los últimos 600 años. Para un ciclo normal, los bosques andino-patagónicos (con mayoría de ciprés, araucaria, alerce y coihue) necesitan recibir abundantes precipitaciones. La reducción de lluvias producirá aumentos de focos de incendios; eventos de mortandad; falta de regeneración de nuevos brotes y una menor capacidad de recuperación frente al pastoreo intensivo. Las lluvias se desplazaron hacia el extremo de la Patagonia (al sur de Tierra del Fuego), pero llegan abundantes a Nueva Zelanda y Tasmania (sur de Australia). Allí se produjo un aumento de temperatura y favoreció el crecimiento de las especies. Para llegar a esta conclusión se estudiaron los anillos de crecimiento de más de 3.000 ejemplares de seis especies de la Argentina, Chile, Nueva Zelanda y Tasmania. Se verificó que los patrones de crecimiento entre 1950 y 2000 están en un mínimo en el bosque patagónico. La Patagonia está en serios riesgos por varias causas: sequía por reducción de lluvias, disminución del caudal de los ríos, sobrepastoreo y desertificación y erupciones volcánicas esporádicas con el aporte de cenizas.

Una paradoja es que la recuperación completa del hueco de ozono podría modificar el cambio climático en el hemisferio sur e incluso amplificar el calentamiento de la Antártida. Las temperaturas medias de la superficie de la Tierra han ido en aumento, pero el interior de la Antártida muestra una tendencia de enfriamiento durante el verano austral provocada por el agotamiento del ozono. Cuando los niveles de ozono estratosférico vuelvan a los niveles anteriores a 1969, hecho que ocurrirá hacia el 2100, los

patrones de circulación atmosférica pueden romperse por las masas de aire más cálidas que ingresarán al interior. La recuperación de ozono, absorberá los rayos UV aumentando la temperatura del aire en altura y reduciendo el vórtice polar que aísla a la Antártida del resto del planeta. La fase actual se asocia con temperaturas más frías en Australia y el aumento de las precipitaciones; también se asocia con condiciones más secas en verano en áreas agrícolas productivas de América del Sur.

Documento elaborado por el Ing. Roberto Ares (2016).