

Evolución histórica del papel del ozono en el medioambiente atmosférico en España

Juan M.^a CISNEROS SANCHIZ y Juan MANZANO CANO

Instituto Nacional de Meteorología.

Apdo. 285. 28071 Madrid

El equilibrio del ozono atmosférico se ha convertido en el paradigma del que puede llamarse medioambiente básico de nuestro planeta. La preservación de las concentraciones de este gas, en los diferentes niveles atmosféricos, regiones geográficas y épocas del año, es absolutamente necesaria para el saludable desarrollo de las diferentes formas de vida de la Tierra, pues muy pequeños cambios en estas concentraciones pueden ocasionar graves perturbaciones. Por lo tanto, la medida del ozono y de otros componentes atmosféricos con él relacionados, así como de las emisiones espontáneas y antrópicas que puedan alterarlo, y la previsión de sus tendencias y consecuencias en el desarrollo vital de todas las especies, en especial de la especie humana, constituyen objetivos del máximo interés.

La importancia del ozono fue reconocida por un reducido grupo de científicos que empezaron a medirlo hace más de siglo y medio.

1. DESCUBRIMIENTO DEL OZONO EN LA ATMÓSFERA

El mérito del descubrimiento de la presencia del ozono en el aire corresponde a Schönbein que, en 1839, le dio nombre e inició una serie de medidas de concentración superficial que se mantuvo hasta 1920. También intentó demostrar su presencia permanente en la atmósfera. Pero, para disponer de esta demostración fehaciente, hubo que esperar hasta 1880, cuando Hartley (1881a) descubrió, tanto en el laboratorio como en la luz solar, la fuerte banda de absorción del ozono en la parte ultravioleta del espectro, entre 200

y 300 nm. Considerando estos hechos, Hartley (1881b) llegó a las siguientes conclusiones:

1. La ruptura del espectro solar está causada por el ozono (esto había sido detectado por Corfú dos años antes, cuando observó una súbita ruptura del espectro en las longitudes de onda inferiores a 300 nm).
2. El ozono es un componente permanente de la alta atmósfera.
3. Sus concentraciones son allí mayores que cerca de la superficie.

Las primeras medidas cuantitativas del espesor total del ozono atmosférico fueron realizadas en 1920, en Marsella, por Fabry y Buisson (1921). Las hicieron usando un doble monocromador en las bandas de Hartley y Huggins, con registro fotográfico y para ángulos solares diferentes. Encontraron un espesor promedio de 3 mm de ozono puro, en condiciones normales de presión y temperatura.

En 1926, se estableció la primera red de medida del ozono, que contó con seis estaciones: Oxford (Inglaterra), Valentia (Irlanda), Lerwick (Shetlands), Abisko (Suecia), Lindenberg (Alemania) y Arosa (Suiza). Dos años más tarde, Dobson, que acababa de construir su espectrofotómetro de UV nº 1 para la medida del ozono total (1926, 1927 y 1929), extiende la red a otras estaciones fuera de Europa: Table Mountain (California), Helman (Egipto), Kodaikanal (India) y Christchurch (Nueva Zelanda). El instrumento de Dobson (figura 1), perfeccionado, sigue siendo actualmente el instrumento básico de la red mundial de referencia del ozono total. En memoria de Dobson, la unidad de medida del espesor total del ozono se llama unidad Dobson (100 UD = 1 mm).

2. EL CONCEPTO DE CAPA DE OZONO

Un hito importante en el conocimiento del ozono atmosférico lo constituye la Primera Conferencia Internacional del Ozono, celebrada en París en 1929. En ella se presentaron los primeros resultados de las medidas realizadas con la red de ozono, y la primera teoría fotoquímica sobre la formación y equilibrio del ozono estratosférico, estableciendo el concepto actual de capa de ozono. Su autor fue Sydney Chapman (1930).

A partir de Chapman, las aportaciones en el conocimiento del ozono atmosférico han sido continuas, y su simple enumeración rebasaría los límites de este artículo. Sólo se citarán algunas de las que han tenido más consecuencias en el desarrollo del conocimiento científico de este componente atmosférico.

En 1938, Regener desarrolló un método de medida del ozono del aire basado en la oxidación del yoduro potásico a yodo, usando una mezcla de

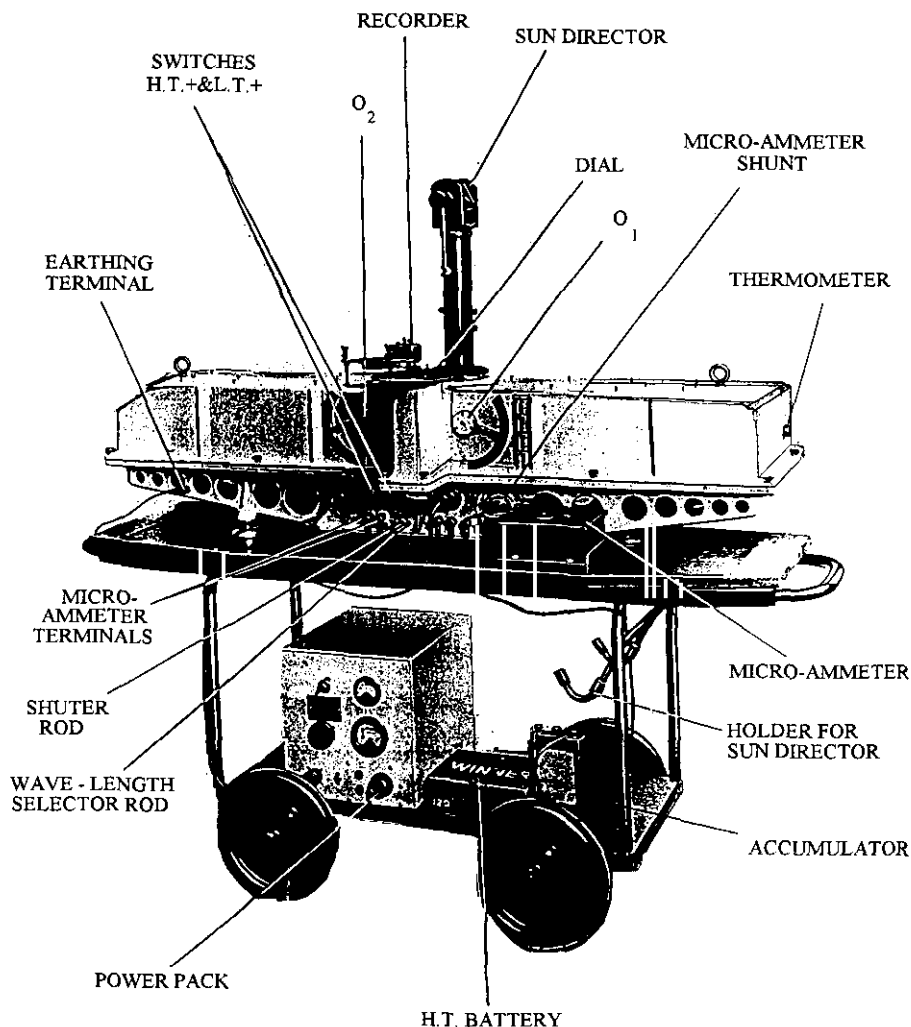


Figura 1. El modelo representado corresponde al construido por la casa Beck hacia 1950.

disoluciones de esta sal con tiosulfato sódico. Con algunas modificaciones, el método se sigue usando profusamente en todo el mundo, y aún es el más preciso para determinar la distribución vertical del ozono en la atmósfera.

En 1955, se propuso una red mundial de estaciones de observación del ozono para ser utilizadas durante la celebración del Año Geofísico Internacional (1957/58). En 1957, la Organización Meteorológica Mundial (OMM)

asumió la responsabilidad de los procedimientos para la uniformidad de las observaciones del ozono y estableció el Sistema Mundial de Observación del Ozono (SMOO3).

En 1969, Crutzen publica un importante trabajo en el que considera el papel del ciclo de los radicales HOx sobre el ozono. Poco después publica otros trabajos (1970, 1971) sobre la influencia de los óxidos de nitrógeno en el equilibrio del ozono.

3. LA PRIMERA ALARMA

La primera alarma mundial, sobre los peligros que comportaría la destrucción de la capa estratosférica del ozono, fue dada por Johnston, en 1971, al considerar las emisiones de los motores de los aviones supersónicos que volarían a las alturas de máxima concentración de ozono.

En 1974, Molina y Rowland publicaron su famoso artículo sobre la estratósfera como sumidero de los clorofluorometanos, y la consiguiente destrucción del ozono por el cloro libre. En este mismo año, Stolarski y Cicerone (1974) demostraron la eficiencia catalítica del cloro atómico como agente destructor del ozono. El artículo de Molina y Rowland ha sido un hito muy importante para el estudio del ozono en varios aspectos: Marca el comienzo de la química del CIO en la estratósfera, se llega al convencimiento de los científicos, del público y, por fin, de los políticos, del peligro real que supone para la capa de ozono la emisión de contaminantes producidos por el ser humano. Este convencimiento condujo a la adopción de medidas, primero por el Congreso de los Estados Unidos y luego de ámbito internacional, para reducir la producción de halocarburos.

En 1975, la OMM realizó la primera evaluación internacional sobre el estado de la capa de ozono.

4. LA CONFIRMACIÓN DE LA FRAGILIDAD DEL EQUILIBRIO DEL OZONO

Con la detección del agujero del ozono durante la primavera antártica, presentada por primera vez por Chubachi en 1984 y posteriormente por Farman, Gardiner y Shanklin en 1985, el tema del ozono atmosférico rebasa definitivamente en interés meramente científico y pasa a convertirse en un tema popular.

En 1988, como resultado de la campaña antártica de la NASA (*), se determina que el cloro y el bromo, procedentes de las actividades humanas,

son la causa principal del agujero del ozono durante la primavera antártica. Al año siguiente, se anunció la aparición de “pequeños agujeros” de ozono en zonas árticas. Las medidas se realizaron dentro de una gran campaña, durante los meses de enero y febrero, con la participación de muchos grupos de investigación científica pertenecientes a diferentes países.

En los años siguientes se constata la disminución del espesor de la capa de ozono en todas las latitudes del planeta, siendo más acusada en las latitudes altas. En el Ártico no puede aún hablarse de agujero de ozono ya que, aunque las reducciones del espesor de la capa en algunas estaciones del norte de Europa y de Siberia, durante los meses de enero a marzo de 1996, se han acercado al 50% de los valores medios correspondientes al período 1950-75, siempre han sido de muy corta duración.

Como reconocimiento de la contribución al conocimiento del ozono atmosférico, el premio Nobel de química de 1995 fue otorgado a Molina, Rowland y Crutzen.

5. LA CAPA DE OZONO Y LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA SOLAR

Desde que se reconoció el papel del ozono atmosférico en el filtrado de las radiaciones UV-B solares (las UV-C son completamente absorbidas por el oxígeno molecular en las capas más altas de la atmósfera), el incremento de la irradiancia UV-B en la superficie terrestre, como consecuencia de la posible reducción del espesor total de la capa de ozono, ha sido un motivo de preocupación ya que se estima que, para una reducción del espesor de la capa de ozono de un 1%, cabe esperar un incremento de la irradiancia UV-B en la superficie de alrededor del 2% en las latitudes intermedias, algo más en las latitudes altas y menos en las bajas. Es evidente que esta es una de las principales motivaciones del interés del estudio del ozono. Pero, dado el carácter tóxico del gas ozono, existen otras razones por las cuales el ozono atmosférico debe ser estudiado. Sabido es que, como consecuencia de la emisión de determinadas sustancias (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos principalmente) y por la acción de la radiación solar, se forma ozono en las zonas relativamente próximas a las fuentes de estas sustancias, llegándose a concentraciones de ozono en el aire que alcanzan los niveles de toxicidad para las personas, animales y plantas. Este ozono suele designarse, inapropiadamente, como “troposférico” y se ha detectado un aumento del mismo en casi todas las regiones de la Tierra.

Por lo tanto, mientras la capa de ozono sufre un debilitamiento que pone en el riesgo de recibir dosis de radiación ultravioleta más altas de las convenientes a los seres vivos que pueblan la Tierra, el aumento de las concentraciones del ozono, en las capas más bajas atmosféricas, los expone al contacto y respiración de concentraciones tóxicas del mismo.

Rumen Bojkov ha hecho recientemente (XXVI Jornadas de la Asociación Meteorológica Española, Roses (Girona) 2-4 de octubre, 1996) una valoración de los cambios detectados en el ozono atmosférico, tanto en la capa de ozono, como en el ozono superficial. En este último se puede estimar que, en las latitudes intermedias, ha sufrido un incremento medio algo superior al 1% anual desde finales del siglo pasado. Esto es, se ha más que duplicado en los últimos 100 años. En cuanto a la disminución del espesor de la capa de ozono, puede resumirse en el siguiente cuadro:

Disminuciones del ozono (en porcentajes por decenio) obtenidas con datos del SMOO3, desde enero de 1964 a marzo de 1994, con tendencias lineales establecidas para el período 1979-1994

Región	Diciembre., enero febrero, marzo	Mayo, junio julio, agosto	Sept., octubre noviembre	Año
35°-65°N	5,8 ± 1,7	2,6 ± 1,5	2,5 ± 1,0	3,8 ± 1,2
00°-35°N	4,0 ± 1,1	1,9 ± 1,1	1,6 ± 0,9	2,6 ± 0,9
00°-35°S	2,7 ± 1,0	3,4 ± 0,8	6,6 ± 1,5	3,9 ± 0,8
35°-65°S	3,6 ± 1,2	4,9 ± 1,3	7,3 ± 2,0	5,0 ± 1,0

Como se ha dicho antes, al mismo tiempo que el ozono estratosférico está disminuyendo, el ozono troposférico, al menos en el hemisferio norte, está aumentando alrededor del 10% por decenio.

El aumento de las concentraciones de ozono en la alta tropósfera puede provenir del incremento del tráfico aéreo, cuya mayor densidad suele situarse hacia estas alturas. Mientras se han tomado medidas para limitar la emisión de precursores de ozono junto al suelo, no ha ocurrido así en los niveles de vuelo de los aviones. Este aumento del ozono troposférico, puede contribuir de forma muy substancial al incremento de las temperaturas superficiales, ya que se ha comprobado el gran efecto invernadero que tiene el ozono a estas altitudes. Considerando que la perturbación radiativa introducida por todos los gases de efecto invernadero juntos, desde los tiempos preindustriales hasta nuestros días, la perturbación relativa correspondiente al efecto invernadero

del ozono es del 20%. En el período 1981-1990, la proporción debida al ozono alcanza el 50%, esto es, el ozono está actualmente contribuyendo al aumento de la temperatura media superficial del planeta tanto como el resto de todos los gases de efecto invernadero restantes juntos.

Finalmente, se deben citar los posibles riesgos que comporta la alteración del gradiente vertical térmico que define la estratósfera. Sabido es que el ozono es el responsable de la existencia de un máximo de temperatura, en el límite superior de la estratósfera, que define la estratopausa. El gradiente vertical de temperatura de la estratósfera es de sentido contrario al habitual de la tropósfera, condicionando el régimen circulatorio de ambas capas. La disminución del ozono en la estratósfera conduce a un enfriamiento de la misma. Se ha observado un descenso de la temperatura media de la baja estratósfera, entre 12 y 20 km, de 0,6°-0,8°, en los últimos 20 años. Este enfriamiento puede conducir a un proceso de realimentación de los mecanismos de química heterogénea de destrucción de ozono. La alteración de la circulación estratosférica podría tener consecuencias en el clima general del planeta, muy difíciles de valorar a la luz de los conocimientos actuales.

6. LA VIGILANCIA DE LA CAPA DE OZONO EN ESPAÑA

En España el estudio del ozono atmosférico empieza con Baltá y Catalá que, en el año 1944, publican una breve monografía titulada "El problema de la ozonosfera" (figura 2). En ella destacan el papel clave del ozono en el comportamiento físico y químico de la atmósfera, señalando su carácter como trazador de masas de aire. Más adelante, en el año 1960, Catalá y Calvo realizaron, en el Observatorio Meteorológico de Los Viveros Municipales de Valencia, los primeros ozonosondeos con globo libre en España. Utilizaron la sonda de Vassy.

En el programa que se preparó, cuando se creó la ya extinta Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE), se incluyó el ozono atmosférico como uno de los temas de interés para esta Comisión. El informe correspondiente lo hizo Morán en 1965.

En el año 1973, Catalá comenzó las medidas del ozono superficial en la Facultad de Físicas de la Universidad Complutense de Madrid utilizando la luminiscencia del etileno.

Pero, para el comienzo sistemático del estudio de la capa de ozono en España, hubo que esperar hasta el año 1974, cuando comenzaron las actividades del proyecto de investigación financiado por la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica (CAICYT), "Estudio de la radiación ultravioleta solar a través del contenido de ozono en la estratósfera y baja mesós-

EL PROBLEMA DE LA OZONOSFERA

por los doctores

JOSÉ BALTÁ ELÍAS y JOAQUÍN CATALÁ DE ALEMANY

del Servicio Meteorológico Nacional.

I. ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN

INTRODUCCIÓN

RESUMEN

Después de un resumen histórico sobre la evolución de las ideas acerca de la existencia del ozono en la alta atmósfera, se expone el estado actual de la cuestión tal como se plantea a consecuencia de las más recientes adquisiciones, gracias a los incesantes progresos de las técnicas hoy en uso, para la investigación de tan interesante materia. Finalmente se examinan en este trabajo las posibilidades que el conocimiento de los datos espesor, altura y temperatura de la capa de ozono atmosférico suponen para las investigaciones meteorológicas y para la prognostis, con vistas a la reanudación de las primeras y únicas medidas realizadas hasta la fecha en España, e implantar ya el empleo sistemático de estas determinaciones en nuestro país.

Figura 2. Encabezamiento del trabajo de Baltá y Catalá.

fera". Este proyecto fue dirigido por Cisneros. Con sus fondos se adquirió un espectrofotómetro Dobson (el n° 120) que se instaló en 1975 en el Campo de Lanzamiento de Cohetes de El Arenosillo (Huelva), comenzando así la primera estación de medidas de este tipo en España; se integró en el SMOO3, comenzó a enviar sus datos al Centro Mundial correspondiente y continúa funcionando en la actualidad. En el año siguiente comenzaron los ozonondeos con las sondas ECC, modelo de Kohmyr (*), en la misma estación de El Arenosillo. El proyecto tenía una duración prevista de 3 años, pero continuaron las actividades sobre la capa de ozono con fondos de la CONIE hasta la extinción de la misma en 1986. Después, las actividades de medida del ozono en el INTA han continuado con cargo a los fondos propios de este instituto. Una de las campañas más interesantes realizadas en la estación de El Arenosillo, en el marco de este proyecto de la CAICYT, fue el estudio de los perfiles verticales de distribución del ozono al paso de un frente frío (Cacho y Cis-

neros, 1977). En esta campaña se soltó una ozonosonda en globo cada cuatro horas durante tres días. Fue realizada en colaboración entre el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), la CONIE y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), participando Maldonado y González-Frías (SMN) y Cacho, de la Morena, de Dios y Cisneros (INTA-CONIE).

Los primeros mapas diarios de ozono total sobre Europa, con datos procedentes de 24 estaciones dotadas con instrumentos Dobson, fueron preparados por Cisneros en 1983 (Attmannspacher y otros, 1987). La serie de mapas se extiende desde el 1 de septiembre al 10 de octubre de 1983 (figura 3), coincidiendo con la realización de una campaña del Proyecto GLOBUS (integrado en el Middle Atmosphere Program).

En el año 1986, Cacho y Cisneros prepararon una campaña de medidas de la capa de ozono durante la primavera antártica. El proyecto aprovechaba la oportunidad de la Expedición 8611 a la Antártida del Instituto Español de Oceanografía. Se iban a realizar medidas de ozono total, con el espectrofotómetro Dobson de El Arenosillo (INTA), y ozonosondeos, con material del Instituto Nacional de Meteorología (INM). Por decisión del director del INM, este instituto no participó en la misma, con lo cual, sólo Cacho realizó medidas de espesor de ozono con el espectrofotómetro Dobson.

En el año siguiente, 1987, durante los meses de octubre y noviembre, de Dios (INTA) y Cisneros (INM) realizaron ozonosondeos en la base antártica argentina de Marambio. Para apoyo de esta campaña, se había instalado en esta base uno de los dos espectrofotómetros Dobson existentes en Buenos Aires. También al año siguiente, 1988, Bañón, Cisneros, Gutiérrez y Sanjurjo, todos del INM, realizaron ozonosondeos en la Antártida a bordo del rompehielos argentino "Almirante Irizar". En este mismo año 1988, se instaló un espectrofotómetro Brewer (el nº 33) de medida del ozono total en la terraza de la sede central del INM en la Ciudad Universitaria de Madrid.

Desde enero a marzo de 1989, se lleva a cabo la primera campaña de medidas de la distribución vertical del ozono, mediante sondeos con globo, en la Base Antártica Española de la isla Livingston (Antártida). Estas campañas se repetirían los años 1990, 1991, 1993 y 1995.

En 1991, por recomendación de Cisneros, se instala en la estación de Izaña (Tenerife) el espectrofotómetro Brewer nº 33 de Madrid, quedando bajo la responsabilidad de Cuevas, el director de la estación. Se adquiere un nuevo instrumento de este tipo, el Brewer nº 70, que sustituye, en Madrid, al enviado a Izaña.

En el año 1992, Cisneros y Orbe habían comenzado en Madrid, en la Sede Central del Instituto Nacional de Meteorología, los ozonosondeos sistemáticos (figura 4 a). Cumpliendo la recomendación de la OMM, los realizan todos los

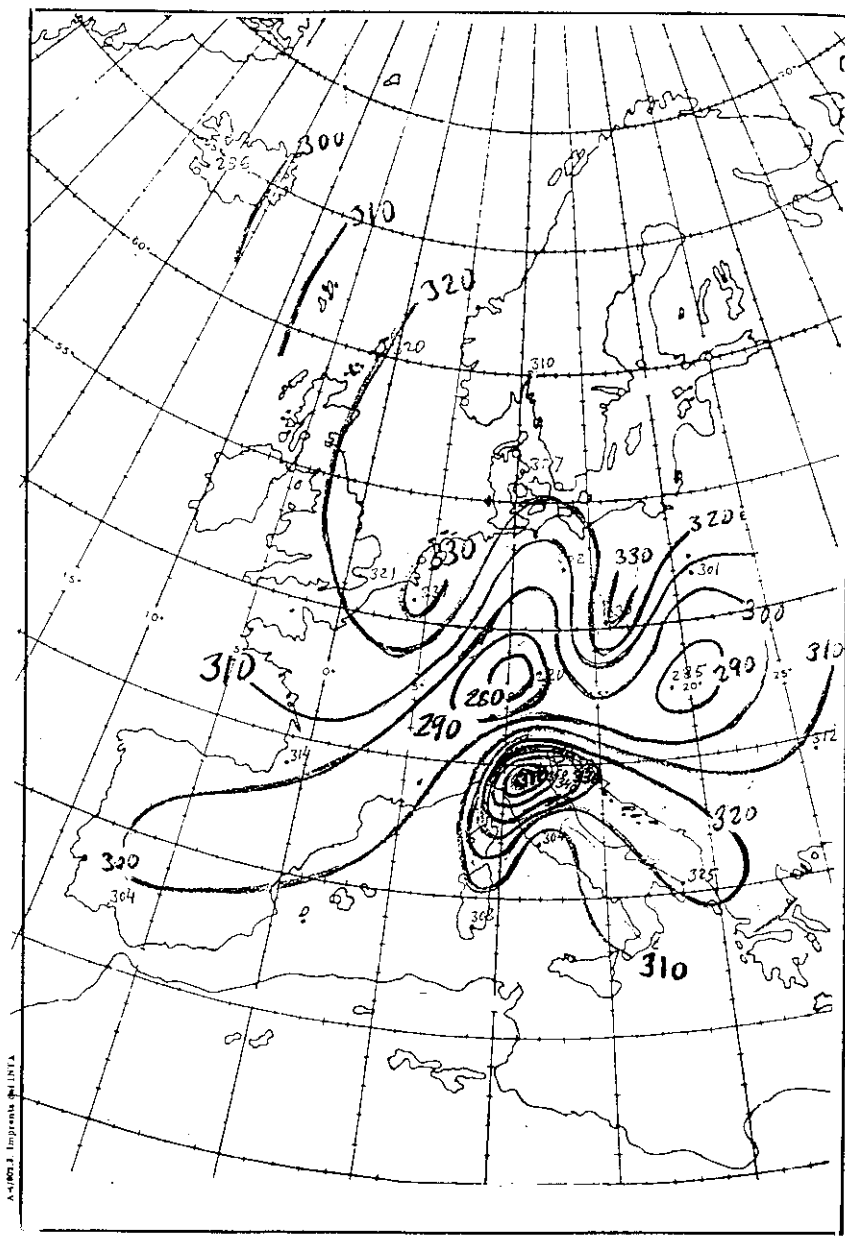


Figura 3. Uno de los mapas diarios de espesor total de ozono en Europa, realizados para la campaña 1983 del Proyecto MAP/GLOBUS. Correspondiendo al gran máximo de ozono observado sobre el norte de Italia, ese día se registraron tormentas en la zona.

BASE ANTÁRTICA ESPAÑOLA 1995 Ozono (mPa)

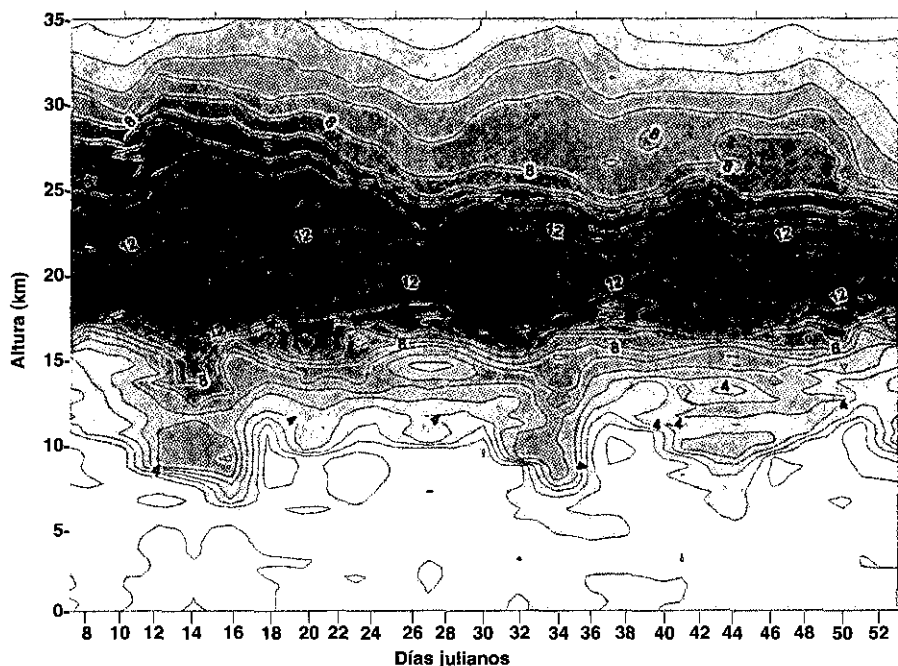


Figura 4 a. Cortes verticales de la concentración del ozono atmosférico: sobre la Base Antártica Española de la isla Livingston (campana de enero-febrero de 1995).

miércoles a las 1200 TU. Este programa de ozonosondeos se ha intensificado cuando la participación en determinados proyectos así lo ha exigido. Esto ha ocurrido al participar en el proyecto europeo SESAME, durante los inviernos 1993-1994 y 1994-1995, y en enero-abril de 1997, en el proyecto OSDOC.

En el año 1992, comienzan los sondeos sistemáticos de ozono en el Centro Meteorológico de Santa Cruz (Tenerife). Se escoge este lugar, en vez de Izaña, por la conveniencia de disponer del perfil vertical del ozono desde el nivel del mar, dado que, de hacerlos desde Izaña, se perderían los dos kilómetros y medio de la altitud de esta estación. El Observatorio Especial de Izaña da un paso fundamental para convertirse en una Estación de Referencia Mundial, dentro del Programa de la OMM de Vigilancia de la Atmósfera Mundial (VAM).

Desde 1993, Jaque, en el Departamento de Física de Materiales de la Universidad Autónoma de Madrid, viene desarrollando medidores de columna de ozono que emplean la absorción diferencial como método de medida (Jaque

y otros, 1993). Han sido empleados en la Comunidad de Madrid y en diversas estaciones del Cono Sur americano (Jaque y otros, 1996).

En 1994, se instala en Izaña una versión mejorada del instrumento EVA, desarrollado años antes en el INTA bajo la dirección de Gil (1989). Es capaz de medir espesor total de ozono y NO₂ utilizando el espectro visible de la luz crepuscular, lo que resulta muy conveniente en las latitudes altas. Posteriormente, este instrumento se distribuirá en varias estaciones de las regiones árticas y antárticas.

En 1995, se instala, por indicación de Cisneros, en la sede del CMT de Murcia, un nuevo instrumento Brewer (nº 117), encargándose del mismo Sánchez-Munjosguren y Bañón.

En 1995, Cuevas presenta la primera tesis doctoral que sobre la distribución vertical del ozono atmosférico se realiza en España. Dicha tesis se realizó en la Universidad Complutense y fue dirigida por Zurita.

En resumen, las actividades de vigilancia de la capa de ozono en España se han venido realizando, fundamentalmente, en colaboración estrecha de dos instituciones oficiales: el Instituto Nacional de Meteorología y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, aunque también han contribuido algunos investigadores de Departamentos universitarios, tales como Casanova y Sánchez del Departamento de Física Aplicada I, de la Universidad de Valladolid.

7. EL OZONO COMO CONTAMINANTE FOTOQUÍMICO

Como ya se ha citado más arriba, en España, las primeras medidas de ozono junto al suelo fueron realizadas en la Universidad Complutense de Madrid por Catalá al comienzo de los años setenta, comprobando el rápido aumento de su concentración a cierta altura sobre el suelo, en los días soleados y encalmados, a lo largo de la mañana. La anécdota, a destacar de estos tiempos, es la frase pronunciada por Catalá al observar las primeras medidas: "La fotoquímica atmosférica existe".

Posteriormente, en 1984, a Mantero, del INM, se le asignó la responsabilidad de las redes de estaciones BAPmón Y EMEP de contaminación de fondo, que incluyen el ozono superficial en su programa de medidas. No es así en las ciudades, donde la responsabilidad de la vigilancia del contenido de ozono en el aire es de los respectivos Ayuntamientos. Muchas campañas de medidas, en diversas circunstancias y localidades han sido llevadas a cabo, desde entonces, por personal del Servicio de Meteorología Ambiental del INM, empleando equipos de medida en superficie y ozonosondas en globo cautivo.

El contaminante ozono no se sitúa sólo en los niveles superficiales. Existe evidencia del aumento de la concentración del ozono en todos los niveles troposféricos. En las áreas más contaminadas del hemisferio norte, el espesor total del ozono de la columna troposférica está creciendo a un ritmo del alrededor del 2% anual, aunque en algunas altitudes concretas el ritmo de crecimiento es todavía mayor. Las causas de este crecimiento hay que atribuir las al crecimiento de la contaminación debida a los “precursores” generados por los motores de combustión interna, en especial los de los automóviles y aviones. Este crecimiento del ozono troposférico, sobre las regiones más industrializadas, contribuye a que el incremento de la irradiancia UV-B, como consecuencia del debilitamiento de la capa de ozono, quede enmascarado por la fuerte absorción por este ozono de esta dispersiva radiación solar en las regiones bajas de la atmósfera, donde la densidad óptica es grande a causa de la abundancia de aerosoles.

De especial interés, para estudiar los procesos que contribuyen a las muy altas concentraciones superficiales de ozono, que se alcanzan en las grandes aglomeraciones urbanas, fue la campaña de medidas de distribución vertical del ozono sobre Ciudad de México, la ciudad con mayor contaminación de

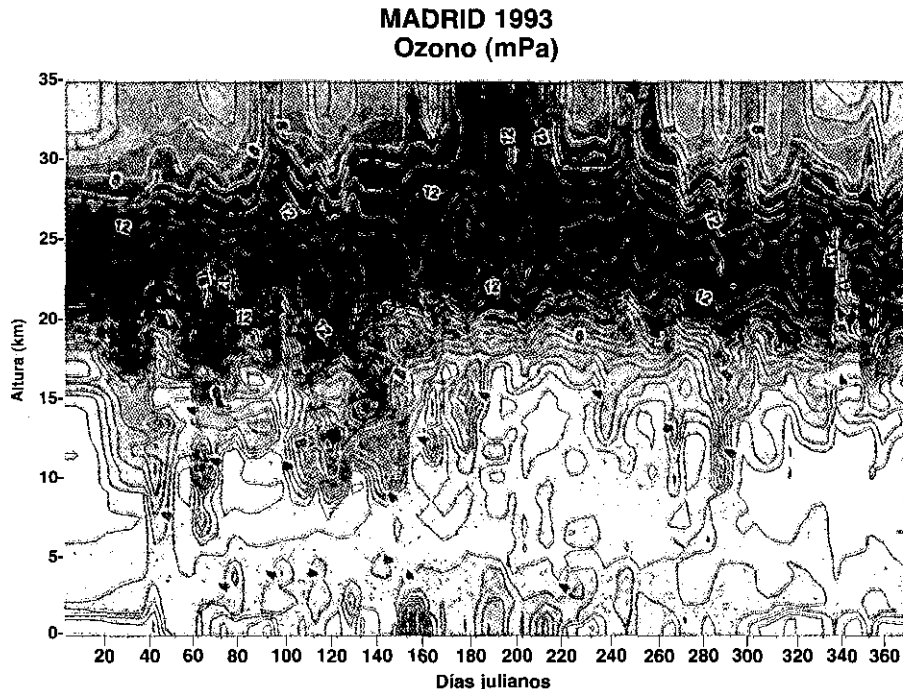


Figura 4 b. Cortes verticales de la concentración del ozono atmosférico: sobre Madrid (1993).

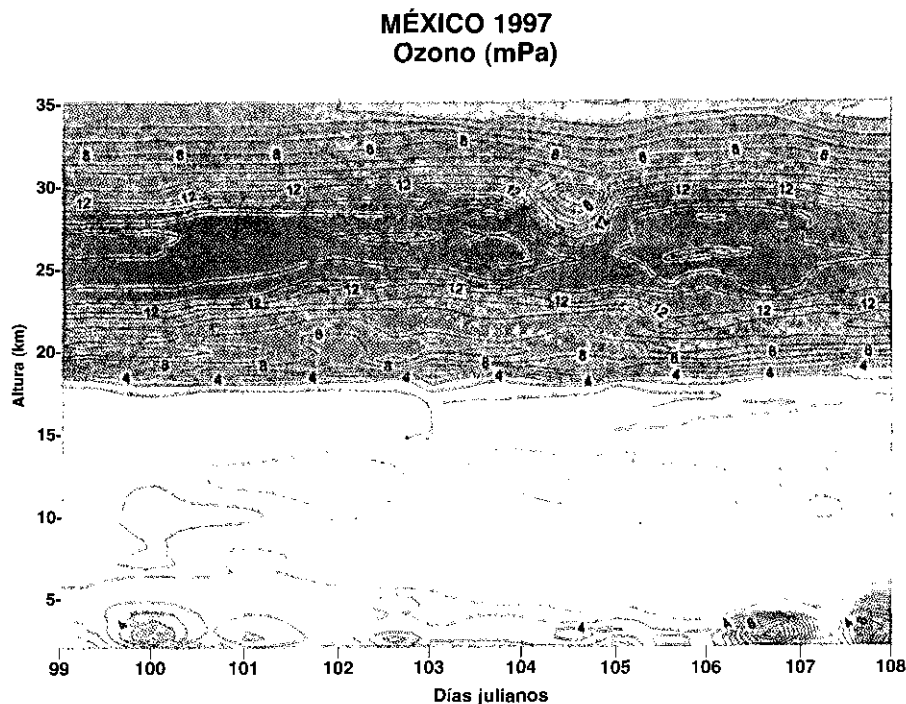


Figura 4 c. Cortes verticales de la concentración del ozono atmosférico: sobre Ciudad de México (campana de abril de 1997).

ozono del mundo. Se realizó en el mes de abril de 1997, siendo la primera vez que allí se hicieron ozonosondeos con globo libre (figura 4 b). Esta campaña se llevó a cabo gracias a una colaboración entre el Instituto Nacional de Meteorología de España y el Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Autónoma de México (figura 4 c).

En las figuras 4a, 4b y 4c se aprecian, además de las diferencias características debidas a las diferencias de latitud, las diferentes concentraciones de las capas bajas. Así, mientras en la Antártida no existe apenas ozono en los niveles superficiales, en Madrid y, sobre todo, en Ciudad de México los valores superficiales medios son más altos y aparecen episodios de muy alta concentración.

8. RECIENTES APLICACIONES DEL CARÁCTER DEL OZONO COMO TRAZADOR DE MASAS DE AIRE

La vida relativamente larga del ozono en las regiones próximas a la tropopausa permite utilizarlo como trazador de los movimientos verticales

de las masas de aire situadas en las proximidades de esta región de la atmósfera.

Desencadenantes de las violentas tormentas del occidente mediterráneo, que ocurren preferentemente durante el comienzo del otoño, son las intrusiones del aire frío estratosférico. Estas intrusiones invaden los niveles superiores de la tropósfera y se sitúan sobre los inferiores calientes y con toda la energía potencial que es capaz de suministrarles las aguas calientes del mar. Cuando esto ocurre, las tormentas que se originan van acompañadas de intensísimas lluvias que producen los más fuertes desbordamientos de los ríos registrados en la región. El ozono puede servir aquí para alertar del posible desencadenamiento del fenómeno, ya que la intensidad de la intrusión en la tropósfera de ozono estratosférico puede dar una idea anticipada de cuál va a ser la intensidad del fenómeno.

El carácter absorbente del ozono sobre la radiación ultravioleta permite utilizarlo para estimar la irradiancia ultravioleta solar esperada sobre una superficie dada sobre la cual no existan nubes y los aerosoles contenidos en su columna atmosférica correspondan a una densidad tipo e invariable. Los cambios en la distribución de concentración en la columna de ozono producen cambios en la absorción de la radiación ultravioleta, que se reflejan en la irradiancia en el suelo con diferente intensidad, porque la densidad óptica para la radiación ultravioleta varía en los diferentes niveles y circunstancias atmosféricas, sobre todo como consecuencia de la variación de la distribución vertical de los aerosoles. Para predecir adecuadamente esta irradiancia en la superficie, cuyos cambios se consideran idealmente sólo producidos por el ozono, es necesario predecir la distribución vertical del ozono o, al menos qué proporción del espesor total de la columna de ozono corresponde a la tropósfera, donde la distribución de aerosoles es muy diferente a la de la estratósfera; esto puede hacerse identificando la procedencia de las masas de aire cuyo contenido en ozono se conoce. En la práctica, ya se emplean modelos para predecir la irradiancia UV-B superficial que no sólo consideran las variaciones del ozono, sino la nubosidad y los aerosoles.

BIBLIOGRAFÍA

- ATTMANNSPACHER, W., J. CISNEROS, H. CLAUDE, C. DE BAKKER, D. DE MUER, R. HARTMANNSGRUBER, A. LOVISA, P. MARCHE, G. MEGIE, K. MUNZERT, R. (1987). Reiter, Ozone sonde and Dobson spectrophotometer data obtained during the MAP/GLOBUS 1983 Campaign over Wwestern Europe. BPT-Bericht 5/87, München.

- BALTÁ, J. y J. CATALÁ (1944). El problema de la ozonosfera, *Revista de Geofísica*, Año III, núm. 9, 108-136.
- CACHO, J. y J.M. CISNEROS (1977). Temperature and ozone profiles comparison, *Space Research XVIII*.
- CHAPMAN, S. (1930). A theory of upper atmospheric ozone, *Mem. Roy. Meteorol. Soc.*, 46.3, 103.
- CHUBACHI, S. (1985). A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica, from February 1982 to January 1983, *Atmospheric Ozone*, Ed. por C.S. Zerefos y A.M. Ghazi, Reidel, Dordrecht, 285-289.
- CRUTZEN, P. J. (1969). Determination of parameters appearing in the "dry" and the "wet" photochemical theories for ozone in the stratosphere, *Tellus*, 21, 368.
- CRUTZEN, P. J. (1970). The influence of nitrogen oxide on the atmospheric ozone content, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 96, 320.
- CRUTZEN, P. J. (1971). Ozone production rates in oxygen-hydrogen-nitrogen oxide atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 76, 7311.
- CUEVAS, E. (1995). Estudio del comportamiento del ozono troposférico en el Observatorio de Izaña (Tenerife) y su relación con la dinámica atmosférica. Tesis doctoral. Universidad Complutense.
- DOBSON, G.M.B., and D.N. HARRISON (1926). Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions, Part I, *Proc. Roy. Soc. London*, A110, 660.
- DOBSON, G.M.B., and D.N. HARRISON, and J. LAWRENCE (1927). Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions, Part II, *Proc. Roy. Soc. London*, A114, 524.
- DOBSON, G.M.B., and D.N. HARRISON, and J. LAWRENCE (1929). Measurements of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions, Part III, *Proc. Roy. Soc. London*, A122, 456.
- FABRY, C. et H. BUISSON (1921). Etude de l'extrémité ultraviolette du spectre solaire, *J.Phys.*, Paris, 6e série, 2, 197.
- FARMAN, J. C., B. G. GARDINER, and J. D. SHANKLIN (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction, *Nature*, 315, 207-210.
- GIL, M. y J. CACHO (1992). NO₂ total column evolution during the 1989 spring at Antarctica Peninsula, *J. of Atmos. Chem.*, 15, 187-200.
- HARTLEY, W. N. (1981a). On the absorption spectrum of ozone, *J. Chem. Soc.*, 39, 57.

- HARTLEY, W. N. (1991b). On the absorption of the solar rays by atmospheric ozone, *J. Chem. Soc.*, 39, 111.
- JAQUE, F., G. LIFANTE, J. AGUIRRE DE CÁRCER, F. CUSSÓ (1993). A selective ultraviolet detector tunable in the 230-430nm, *Meas. Sci. Technol.*, 4, 476-478.
- JOHNSTON, H. (1971). Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust, *Science*, 173, 517-522.
- KOMHYR, W. D. (1969). Electrochemical concentration cells for gas analysis, *Ann. Geophys.*, 25, 203-210.
- MOLINA, M. J., and F.S. ROWLAND (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature*, 249, 810-812.
- STOLARSKI, R.S., and R. J. CICERONE (1974). Stratospheric Chlorine: A possible sink for ozone, *Can. J. Chem.*, 52, 1610-1615.
- SCHÖNBEIN, C. F. (1840). Recherches sur la nature de l'odeur qui se manifeste dans certaines réactions chimiques, *C.R. Acad. Sc. Paris*, 10, 706.
- STOLARSKI, R.S., and R. J. CICERONE (1974). Stratospheric chlorine: a possible sink for ozone, *Can. J. Chem.*, 52, 1.610.
- TOCHO, J.O., L. DA SILVA, G. LIFANTE, F. CUSSÓ y F. JAQUE (1996). El agujero de ozono, su penetración en el Continente Americano, *Investigación y Ciencia*, febrero.
- WMO (1975). Modification on the ozone layer due to human activities and some possible geophysical consequences, WMO Report.

