

La observación del ozono atmosférico desde “El Arenosillo”

B. A. DE LA MORENA, J. M. VILAPLANA y G. MIRÓ
INTA. División de Ciencias del Espacio. Dto. de Teledetección y Aeronomía.
Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo” (Mazagón-Huelva)

1. ANTECEDENTES DE LA ESTACION DE “EL ARENOSILLO”

Con el nº 213, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) tiene codificado a El Arenosillo, como Observatorio de la Red Mundial establecida para el seguimiento de la evolución del contenido total de ozono atmosférico.

El INTA, a través de la Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo” (37.1 N-6.7 W), del Dpto. de Teledetección y Aeronomía de la División de Ciencias del Espacio, viene desarrollando desde 1969 una labor de observación de la atmósfera (dinámica estratosférica y contenido total de electrones en la ionosfera), merced a sondeos sistemáticos realizados con cohetes, globos, ionosondas, radiómetros..., merced a acuerdos cooperativos con los Organismos nacionales e internacionales mas significados de la época, NASA, Max Plank Institute, CNES...

En el año 1975, fue adquirido por la extinta Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE), el primer y único espectrofotómetro Dobson, (nº de fabricación 120), disponible en el territorio nacional y ubicado en las instalaciones del INTA en el Centro de Experimentación El Arenosillo, (CEDEA), en Mazagón, Huelva, para la observación del contenido total de ozono atmosférico.

En el tiempo se ha ido ampliando el potencial técnico y humano de la Estación de Sondeos incorporando sistemas sondeadores de las mas diversas gamas para la observación de la atmósfera ionizada (Digisonda DGS-256 para el análisis de la evolución de la densidad de electrones en las regiones E,

F1 y F2, Medidor de absorción ionosférica método A3 para determinar su valor integrado en la región D, Medidor de potencial eléctrico en superficie, Medidores de potencial eléctrico transportarles en globos estratosféricos cota constante a 40 km de altitud, Sistema transmisor HF para estudio del espectro ensanchado de frecuencias...); de la atmósfera neutra (Licor 8001 para la medida de aerosol atmosférico, Radiómetro Eppley para medir el valor integrado de UV A, Piranómetro Yankee UV B1 que mide el valor integrado de radiación UVB en el rango 280-320 nm, Espectrofotómetro EVA para medidas la columna vertical de NO₂ en el rango 430-450 nm y 470-490 nm, Espectrofotómetro Brewer para medidas de ozono, dióxido de azufre y ultravioleta B en el rango 280-325 nm y 420-485 nm, el mencionado espectrofotómetro Dobson para registro del contenido total de ozono atmosférico en el rango 305-340 nm, perfiles de ozono con sondas electroquímicas portadas con globos estratosféricos...) así como equipos de uso mas directo en medio ambiente como el radar SODAR que registra en automático el perfil de viento hasta los 1500 m de altura, Medidor de Radón, Dasibi 1008-RS para medida del contenido de ozono en superficie, estación meteorológica de apoyo, etc..., equipos y sistemas, unos adquiridos por INTA para el desarrollo de sus propias líneas de investigación, y otros cedidos por Organismos y/o Universidades interesadas en la labor conjunta de creación de Bases de Datos de parámetros concretos aprovechando la excelente climatología de la zona para obtener largas series de datos, la posibilidad de intercomparación con otros parámetros obtenidos en la misma "ventana" atmosférica, y la dedicada experiencia de profesionales de INTA en pos de ser un apoyo para el diseño y/o continuidad de las líneas de investigación dimanadas de las Universidades (figura 1).

1. INTRODUCCIÓN

La observación sistematizada del contenido total de ozono atmosférico desde El Arenosillo con un espectrofotómetro Dobson, si bien se inicia formalmente durante el invierno de 1975 dentro de una Campaña internacional orientada al estudio de la anomalía invernal en la atmósfera media, no tiene una cierta continuidad hasta finales de 1976, pero es a partir del año 1980 cuando los datos comienzan a distribuirse sistemáticamente a los Centro Mundiales de Datos, una vez que el equipo se ha sometido a las modificaciones técnicas y calibraciones específicas exigidas por los expertos de la OMM. A partir de ese momento se inicia el "deseado y primordial" objetivo de todo Centro Experimental por mantener ininterrumpida las bases de datos genera-

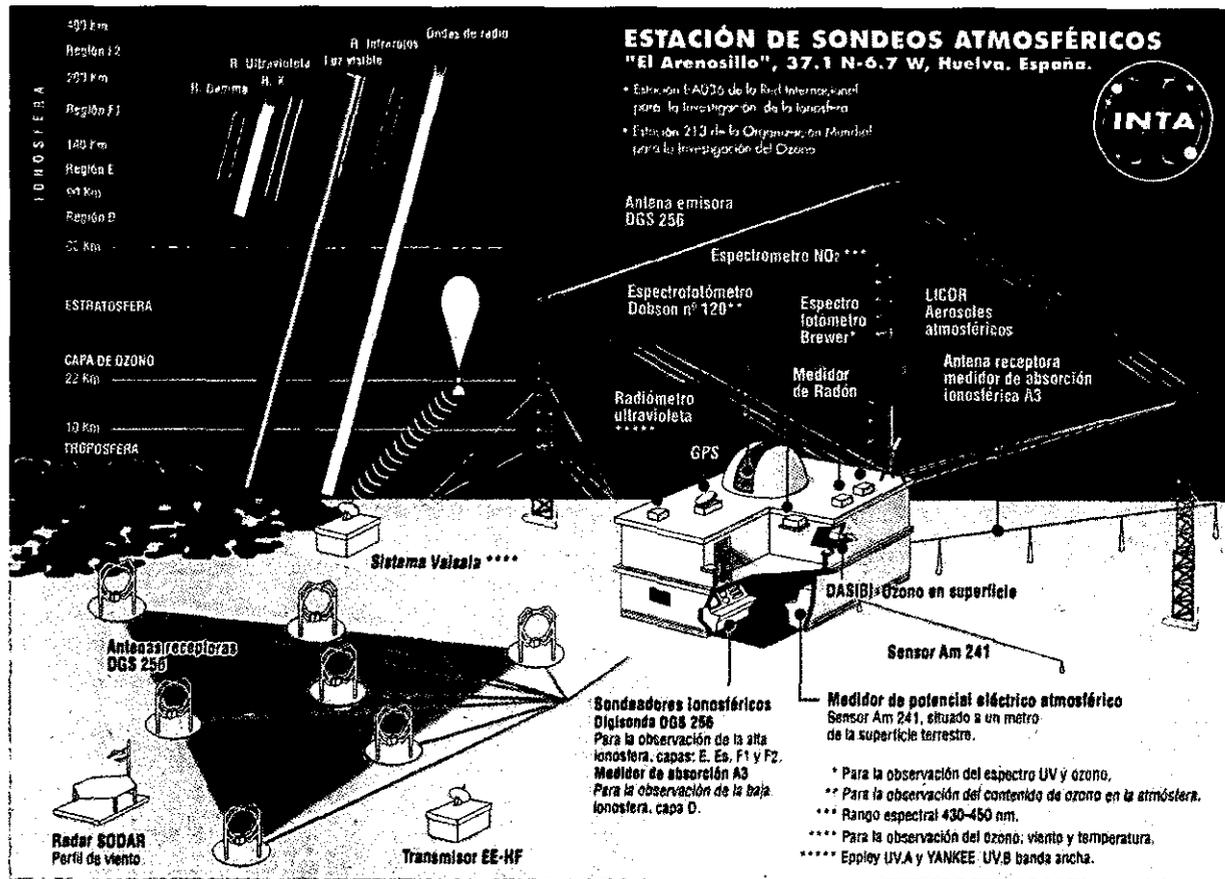


Figura 1. Sistemas y equipos de INTA en la estación de sondeos atmosféricos.

das, objetivo éste que no pudo ser cumplido en su totalidad en sus comienzos y que ha partir del último quinquenio sí se ha podido consolidar, dentro del handicap que supone no disponer de servicio de personal a turnos.

El hecho de que en la Península estén operativos tres espectrofotómetros Brewer en Izaña (Tenerife), Murcia y Madrid dependientes del Instituto Nacional de Meteorología, ofrece una excelente opción para ultimar el diseño de una Red nacional a la que la incorporación de otro Brewer en El Arenosillo, cedido por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en 1977, ha permitido que éste pueda dotarse de un muy completo sistema integrado de sondeadores (Dobson, Licor, EVA, Eppley, Yankee, Brewer...), no sólo para el desarrollo de una Base de Datos a través de la monitorización continuada del contenido total de ozono, si no para el estudio de tendencias a largo plazo, grados de correlación, modelización y análisis de la influencia del ozono sobre la irradiancia espectral solar, ultravioleta B, aerosoles, NO₂ ... entre otros.

Diversos proyectos nacionales de I+D en los que se coparticipa, como el Plan Nacional del Clima (pendiente de resolución en julio /97), autonómicos a través de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, con financiación europea como el Proyecto SCUVS (Solar Climatology using Ultraviolet and Visible Spectrometers), o la Acción COST 731 (Previsión operativa de la radiación UV B en la superficie de la tierra que respalda la CICYT), denotan el interés por este tema, la conveniencia de actuar coordinadamente, y la necesidad de disponer de observatorios dotados con sistemas de sondeos complementarios que ofrezcan datos ya tratados a disposición de los investigadores interesados.

2. METODOLOGÍA

El estudio de la evolución del ozono atmosférico ha sido realizado desde EL Arenosillo a través de un espectrofotómetro Dobson preferentemente, por ello, y a pesar de que hoy se dispongan de equipos de sondeo complementarios, centraremos nuestra atención exclusivamente en el Dobson.

a) Descripción del instrumento:

El espectrofotómetro Dobson puede medir la diferencia relativa de los distintos pares de longitudes de onda de la radiación ultravioleta emitida directamente por el Sol y la Luna y, de forma indirecta, por la luminosidad del cenit.

Estos pares de longitudes de onda que llamamos A, C, D y C' corresponden a:

A	C	D	C'
3055 - 3254	3144 - 3324	3176 - 3398	3324 - 4536

Debido a que la λ_A de 3055 A.U. es fácilmente absorbida por el ozono, llega hasta nosotros con una débil intensidad, mientras que la λ_A de 3254 A.U. no es alterada en su camino y nos llega con intensidad normal. De esta manera, estableciendo una diferencia comparativa de las intensidades de radiación registradas y previo ciertos cálculos matemáticos, podemos determinar el ozono total existente en el momento de la observación.

En la práctica realizamos las observaciones con un doble par de longitudes de onda, AD o CC' pues el efecto Scattered actúa de forma similar en la λ_A y en la λ_D y es una mayor y mejor comprobante de como afecta la absorción del ozono a la intensidad de la radiación luminosa que nos llega.

En la figura 2 se muestra un esquema del equipo. Puede observarse como el haz penetra por una ventana situada en el techo del instrumento y se dirige a la rendija S1 del espectroscopio; este consiste en un monocromador Q1, que es una lente de cuarzo con la que compensamos a la longitud de onda A seleccionada del haz luminoso de las variaciones que este sufre cuando se refracta en prismas y lentes cuyos índices de refracción han variado en función de la temperatura interior del instrumento. Un prisma que convierte la luz en sus colores espectrales, y un espejo que refleja la luz espectral hacia unos nuevos pasos de luz situados en el plano focal del instrumento (rendijas S2, S3 y S4).

Las longitudes de onda A1 y A2 reflejadas por el espectroscopio inciden en el plano focal; la A1 por la rendija S4 y la A2 por las S2 y S3, siendo interferida en su camino por cuñas ópticas accionadas con el dial, situado en la parte superior del espectrofotómetro. Estas cuñas están cubiertas por un baño de cromo que tiene como misión la de absorber en mayor o menor proporción la longitud de onda A2 en función de la posición que se adopte en el dial.

Seleccionamos la longitud de onda que vamos a emplear en la observación accionando unas varillas situadas en la parte exterior del equipo. Una vez seleccionada la longitud de onda, esta continua su camino hacia otro espectroscopio en donde mediante la refracción y reflexión en un prisma y espejo respectivamente llegan al monocromador Q2 terminándose por compensar los demás desajustes ópticos; de ahí, a través de la rendija S5 y por un filtro de

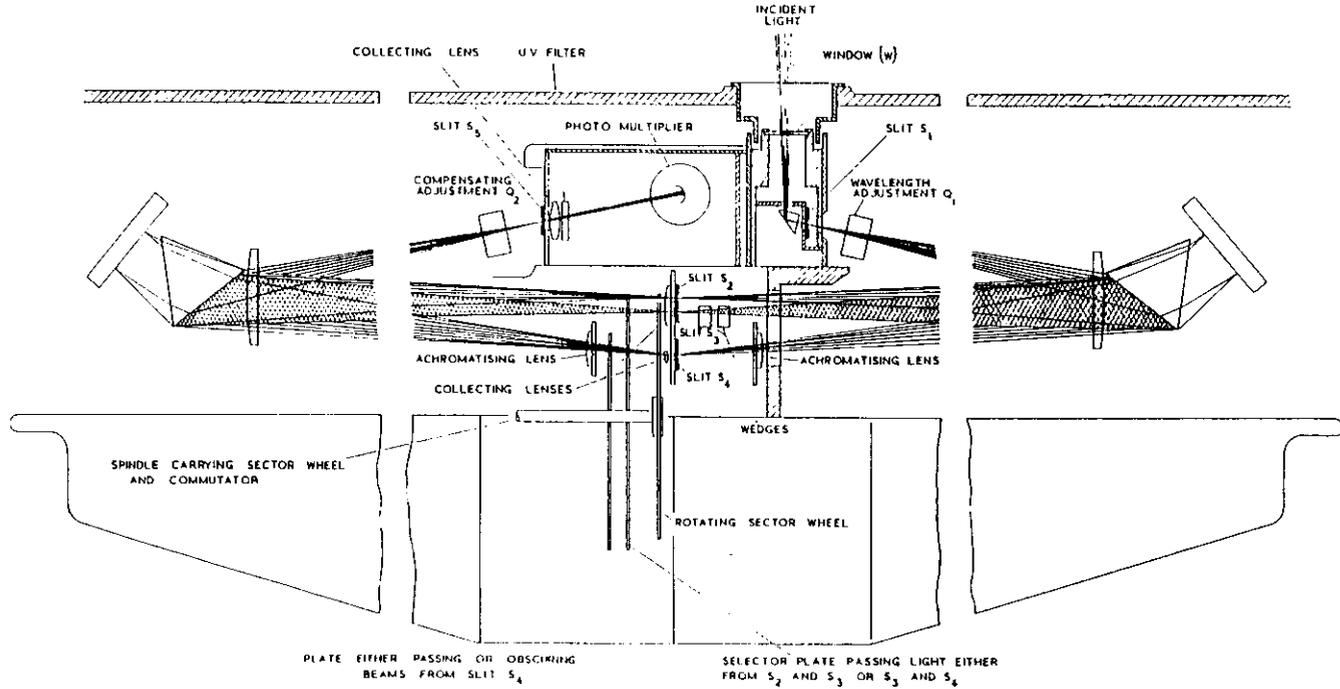


Figura 2. Sistema óptico del espectrofotómetro Dobson.

UV, el haz incide en el fotomultiplicador con intensidades diferentes A1 y A2. Esta luz transformada en pulsos eléctricos será amplificada, y a través de un conmutador se originarán deflexiones intermitentes que se observarán en el microamperímetro según llegue A1 o A2.

Lo que se pretende medir es la intensidad relativa de las distintas longitudes de onda de A, y esto se considera logrado cuando el microamperímetro marca cero. Mediante las cuñas ópticas movidas por el dial se interfiere A2 produciendo una mayor o menor absorción en función de la cantidad de cuarzo cromado que le interponemos, hasta conseguir reducirla de forma que se iguale la intensidad de A2 con la de A1.

Conseguida la igualdad de las intensidades del par de la longitud de onda, el pulso de luz que llega al fotomultiplicador y, transformado en corriente, pasa después de amplificado, a registrarse en el microamperímetro, es realmente la diferencia entre A1 y A2 y registramos en valor del dial cuando se consigue el balance cero en el microamperímetro, y con el cual se procede al cálculo del ozono total.

b) Observación y calibraciones

Las observaciones pueden realizarse atendiendo a diferentes procedimientos según el par de longitudes de onda seleccionado y al origen del haz de luz procedente del cenit o sol directo preferentemente. En El Arenosillo se vienen realizando medidas a sol directo y empleando los pares de longitudes de onda AD.

La posición en elevación del Sol condiciona las horas en las que se realiza observación, calculándose estas horas en función de χ (ángulo cenital) y μ (cociente entre el espesor de la capa que es atravesada directamente por el haz de luz solar y el correspondiente espesor de la vertical) atendiendo a criterios prefijados por la WODC (World Ozone Data Center). Lo que se traduce en cinco medidas diarias correspondientes a $70 > \chi > 30$ y $3 > \mu > 1.15$.

Para garantizar el buen funcionamiento del sistema y la fiabilidad de los datos registrados, se limpian periódicamente los componentes ópticos y electrónicos del equipo y se procede a calibrar mensualmente mediante test de lámpara standard y test de lámpara de mercurio y caso de ser necesario se aplicaría el factor de corrección derivados de los tests, a los datos registrados desde la última calibración.

El test de lámpara de mercurio tiene por objeto corregir las variaciones que, por efecto de los cambios de presión y temperatura, sufren los índices de refracción de los elementos ópticos dependientes de Q1 y Q2, y que pueden alterar la selección de los pares de longitudes de onda con las que trabajamos.

El test de lámpara standard tiene por objeto el confirmar si el gradiente de las cuñas de la región en que trabajamos se mantiene constante; es decir, si el nivel de calibración de las posiciones que ajustamos para las longitudes de ondas A, C, D, C', no varían durante el período de mediciones.

Por otra parte, el espectrofotómetro Dobson acude a una intercomparación con el instrumento patrón con una periodicidad de cuatro años según las recomendaciones de la WMO, donde se procede al ajuste de los componentes ópticos y se realiza el test de sensibilidad que nos determina si la sensibilidad de percepción del sistema óptico es adecuada para que las observaciones sean precisas, y el test de calibración de cuñas que tiene por objeto corregir la posible falta de precisión que pueda sufrir el registro del dial, con la consiguiente repercusión en la medida de la intensidad relativa de la longitud de onda seleccionada.

c) Evaluación de datos

En el procedimiento seguido para garantizar los datos del contenido total de ozono registrados con el espectrofotómetro Dobson, además de los test y calibraciones mencionados anteriormente, se chequean estadísticamente y verifica la homogeneidad de la serie de datos, estudio de tendencias, se establecen correlaciones de los datos de ozono total con datos de radiación UV.B, aerosoles y registros de ozono obtenidos por el sistema TOMS del satélite Nimbus-7, contraste de igualdad de varianza de poblaciones muestrales e intercomparación con datos registrados por otros observatorios.

Una vez validados, los datos son distribuidos a los Organismos y Universidades que lo solicitan, así como y con una periodicidad de tres meses al WODC en Ontario (Canadá), quién edita el boletín de "Ozone Data for the World". **Email:** woudc@ec.gc.ca **WWW:** www.tor.ec.gc.ca/woudc/woudc.html **FTP:** cmits02.tor.ec.gc.ca.

3. BASE DE DATOS:

La Estación de Sondeos Atmosféricos "El Arenosillo", viene registrando valores del contenido total de ozono con el espectrofotómetro Dobson desde Febrero de 1980 hasta la fecha.

En la practica, se realizan medidas de ozono a sol directo, por lo que los días en los que el cielo está cubierto no se dispone de datos, así mismo, tampoco se dispone de datos en los períodos en los que el instrumento se traslada para su calibración, intercomparación o participación en campañas. La tabla 1 presentá en detalle estos eventos.

AÑO

		80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
DIA / MES	01-07/I		6	3	1										1	1		
	08-14/I	4	4	6	4	5	3							1	2	4	5	1
	15-21/I	3	2	3	5	5	4							5	3	5	4	1
	22-31/I	4	10	6	9	5	3						3	8	3	5	3	1
	01-07/II	5	3	5	5	2	4						2	5	6	5	4	2
	08-14/II	3	4	4	5	1	1						4	3	5	5	4	3
	15-21/II	3	3	1	3	3	1						5	5	3	5	5	4
	22-29/II	3			1	3	1						5	3	4	4	2	3
	01-07/III	2	2	3	3	4	5	1					1	3	3	4	4	1
	08-14/III	2	4	3	5	4	4							2	5	3	4	4
	15-21/III	4	3	1	2	2	4						1	3	3	2	5	1
	22-31/III	2	4	2	6	4								5	8	7	8	5
	01-07/IV	4	1		4	4								4	2	5	5	
	08-14/IV	4	1		4	4								4	2	6	2	2
	15-21/IV	5	3	3	2	3								2	4	2	4	4
	22-30/IV	5	3	3	2	3								7	6	5	2	5
	01-07/V	3	4	1	2	3	1							3	4	4	2	
	08-14/V	3	1	2	2	1	5	5						4	4	4	4	4
	15-21/V	2	4	5	2	4	4							3	5	5	5	5
	22-31/V	1	6	5	5	7	8	4						3	6	6	8	7
	01-07/VI	4	4	4	3	5	4	4						5	4	3	5	5
	08-14/VI	4	4	4	4	7	5	5					3	4	3	5	5	5
	15-21/VI	1	4	5	3	6	4	5					4	7	5	5	5	5
	22-30/VI	3	4	4	5	5	6	6					5	4	7	4	4	4
	01-07/VII	5	2	4	4	3	3	2					4	4	4	4	4	4
	08-14/VII	5	3	4	4	5	4	3					4	5	5	5	5	5
	15-21/VII	4	4	5	4	5	4	3					4	5	5	5	2	4
	22-31/VII	3	4	7	4	2	6	2					2	5	6	6	3	4
	01-07/VIII	2	4	4	4	4	2						2	3	4	2	6	4
	08-14/VIII		3		3								4	4	5	4	3	4
	15-21/VIII				2								4	4	3	4	4	4
	22-31/VIII				4								6	5	6	5	8	6
	01-07/IX				1								6	4		4	4	2
	08-14/IX		1		7	4	5	4					4		4	5	1	
	15-21/IX	3	3		6	6	2							6	1	2	4	3
	22-30/IX	6	2	2	8	5	6						1	5	3	7	6	5
	01-07/X	2		3	2	1	5						4	4	6	5	3	5
	08-14/X	1	2	2	2	6							2	3	3	3	3	4
	15-21/X	2	1	3	5	3	5						3	1	6	3	5	2
	22-31/X	4	5	3	3	6	6						8	4	6	5	5	7
	01-07/XI	4	4		1	2							3	5	4	3	3	4
	08-14/XI	3	1	1	1	1	1						3	3	2	4	1	1
	15-21/XI	3	3	3	2	3							3	4	5	4	2	5
	22-30/XI	3	8	1	2	5	3						3	2	5	6	7	4
	01-07/XII	5	6		5	5	5						1	4	2	3	3	3
	08-14/XII	2	4	1	3	1	2						1	2	1	3	2	2
	15-21/XII	4	5	2	4		2						3		5	3	1	1
	22-31/XII		2	3	1								1		3	3	5	2

-  92 Número de días en los que hay medidas de ozono en el periodo señalado
-  Causas meteorológicas o festivos
-  Calibración en Bouider y estancia en I.N.T.A. Madrid
-  Programa Antártico
-  Calibración en Arosa y estancia en I.N.T.A. Madrid
-  Intercomparación en Izaña

TABLA. 1

Tabla 1. Número de días en los que hay medidas de ozono, desde enero de 1980 hasta diciembre de 1996.

Durante los once años en los que se dispone de datos, se han recogido dos períodos regulares que se corresponden con ciclo solar de alta (1980/84, 1988/93) y baja (1985/87, 1994/96) actividad solar. Así mismo, se dispone de datos del período de influencia de la erupción del monte Pinatubo (junio 1991-diciembre 1993).

Desde 1992 se viene participando en la campaña invernal WMO/GO₃OS coordinada por la Universidad de Tesalonica, con el objeto de elaborar mapas sinópticos de ozono durante los períodos invernales en el hemisferio norte y en la que participan un total de 124 instrumentos de superficie entre espectrofotómetros Dobson y Brewer.

4. ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de los datos registrados se han seleccionado los períodos correspondientes entre febrero/1980-julio/1986 y junio/1991 a diciembre 1996.

Los resultados que se exponen seguidamente representan tendencias, variación estacional, intercomparaciones y situaciones episódicas, con el objeto de proceder a una evaluación completa de la evolución del contenido total de ozono en el Suroeste de España con un criterio totalmente experimental y en el deseo de que estos datos puedan ser utilizados por los investigadores en la materia.

En la figura 3 se muestra la evolución del valor medio diario de ozono total para todo el período de observaciones discontinuo (1980 - 1986 y 1990 - 1996). Aplicando métodos de ajuste de regresión lineal, se obtiene una línea de tendencia con pendiente negativa a lo largo del período, es decir, que indica una paulatina disminución del contenido total de ozono en un 8.8% aproximadamente desde 1980 a 1996.

En la figura 4 se representa la variabilidad estacional del contenido total de ozono. Como puede observarse, se caracteriza por una periodicidad anual, que alcanza valores máximos en primavera y mínimos en los meses de otoño.

La figura 5 refleja el valor diario de ozono frente al día del año para todo el período de observaciones. Se aprecia el carácter estacional del ozono y se pone de manifiesto una mayor dispersión en los valores de ozono en los meses de invierno y primavera y una mayor regularidad en los valores estivales.

En la figura 6 se ha determinado el valor medio y desviación típica del contenido total de ozono para el período de observaciones.

La figura 7 presenta una representación tridimensional de la evolución del ozono durante el período de observaciones. Se aprecia de forma cualitativa la variación estacional y anual así como un progresivo y significativo descenso del contenido de ozono, contrastando las más de 400 U.D. de las primaveras de 1980/82 con las 350 U.D. de la primavera de 1996.

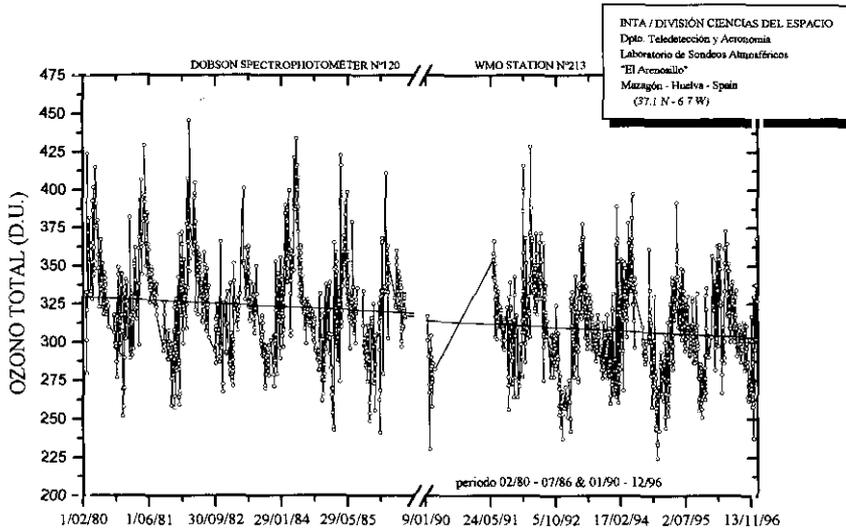


Figura 3. Evolución del valor medio diario de ozono total para todo el periodo de observaciones.

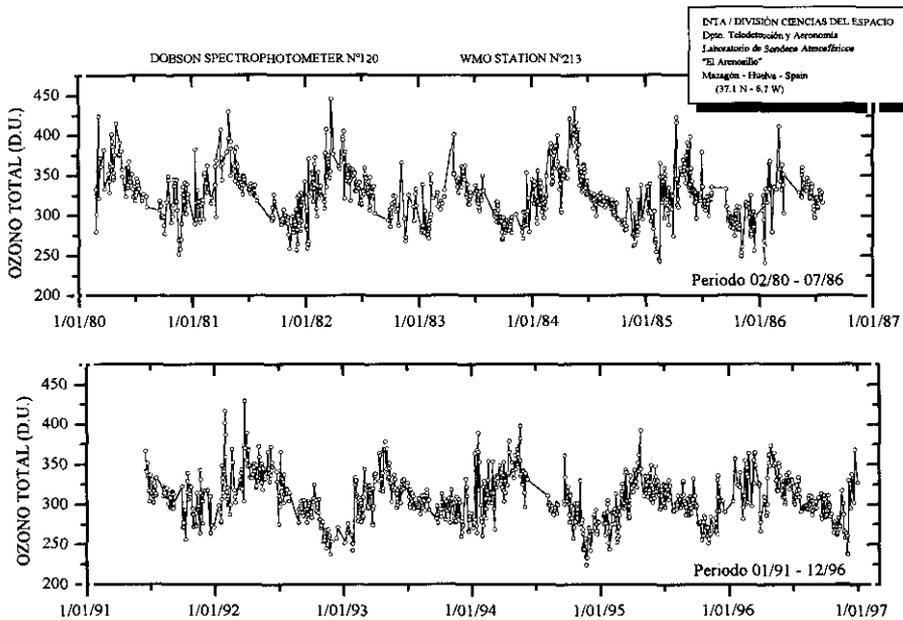


Figura 4. Variabilidad estacional del contenido de ozono.

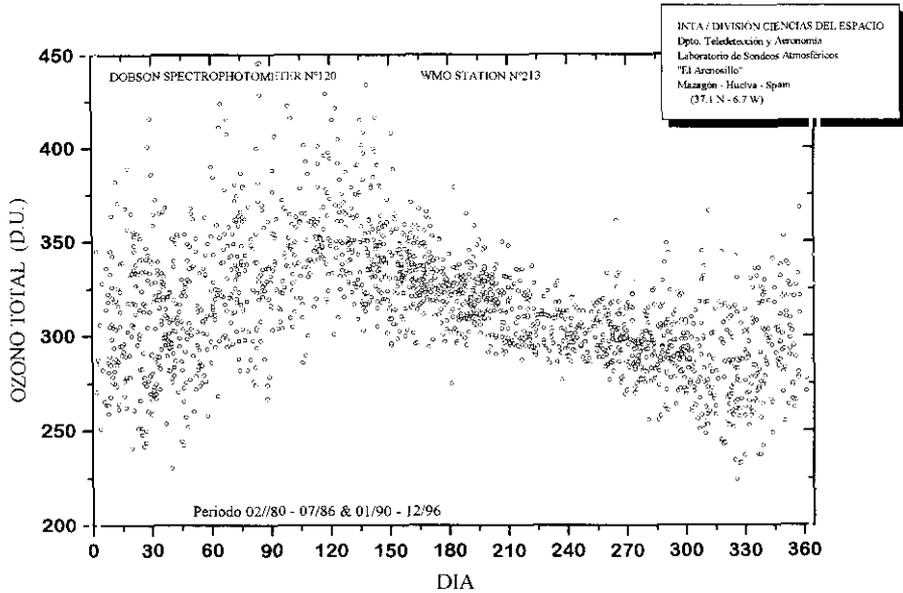


Figura 5. Valor diario de ozono frente al día del año para todo el período de observaciones.

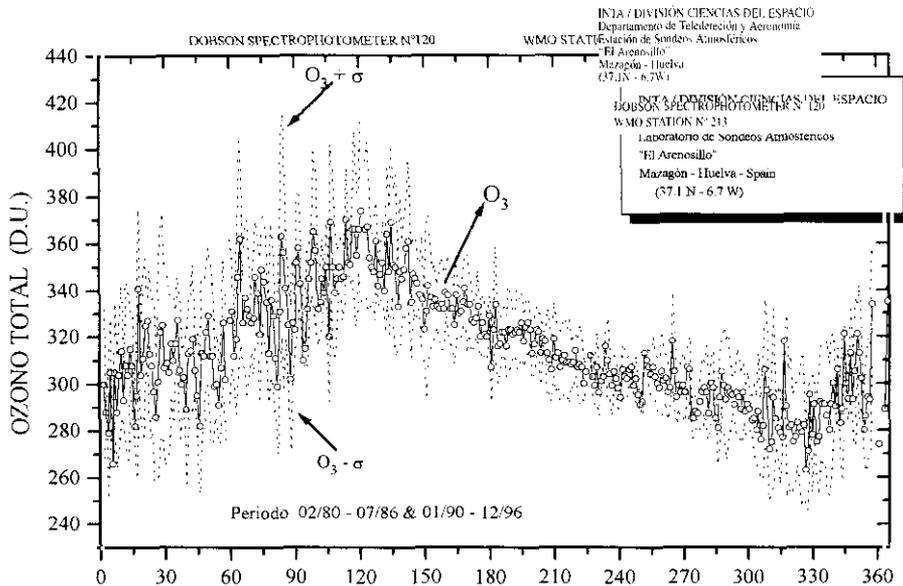


Figura 6. Representa el valor medio y desviación típica del contenido total de ozono.

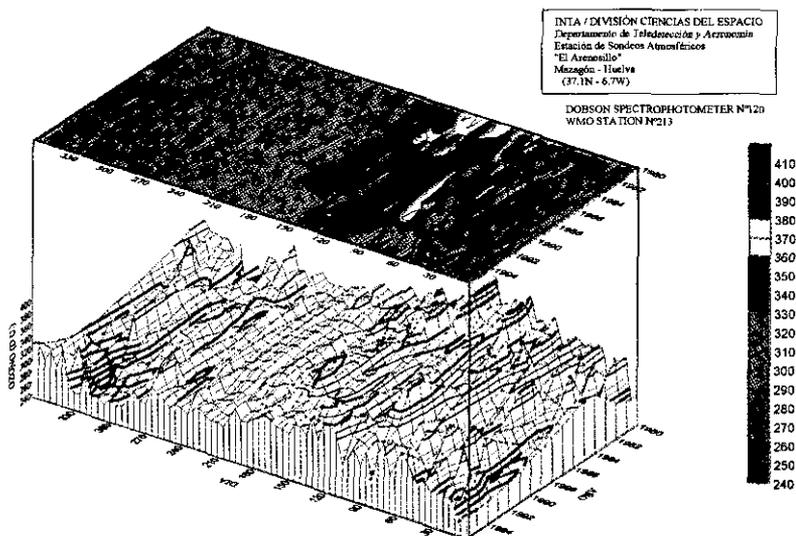


Figura 7. Representación tridimensional de la evolución del contenido de ozono durante el periodo de observaciones.

En las figuras 8 y 9, se contrastan los datos Dobson con los obtenidos por el sistema TOMS (Total Ozone Measure Spectrophotometer) del satélite Nimbus-7 sobre nuestra posición geográfica durante el período 1978-1992, se observa una significativa coincidencia, con un grado de correlación de 0.92, que contribuye a garantizar la fiabilidad de los registros obtenidos.

Por último, la figura 10 representa la evolución del ozono durante el período 1992/95 y muestra episodios en los que aparecen valores de ozono anormalmente bajos en el período invernal que son merecedores de una investigación detallada.

5. CONCLUSIONES

- a) El contenido total de ozono en la vertical de El Arenosillo ha experimentado una disminución periódica de aproximadamente un 0,55% anual desde el inicio de las observaciones en 1980 a finales de 1996.
- b) Se detecta una mayor variabilidad del contenido total de ozono durante los meses de invierno y primavera, en contraste la regularidad de los valores de verano.

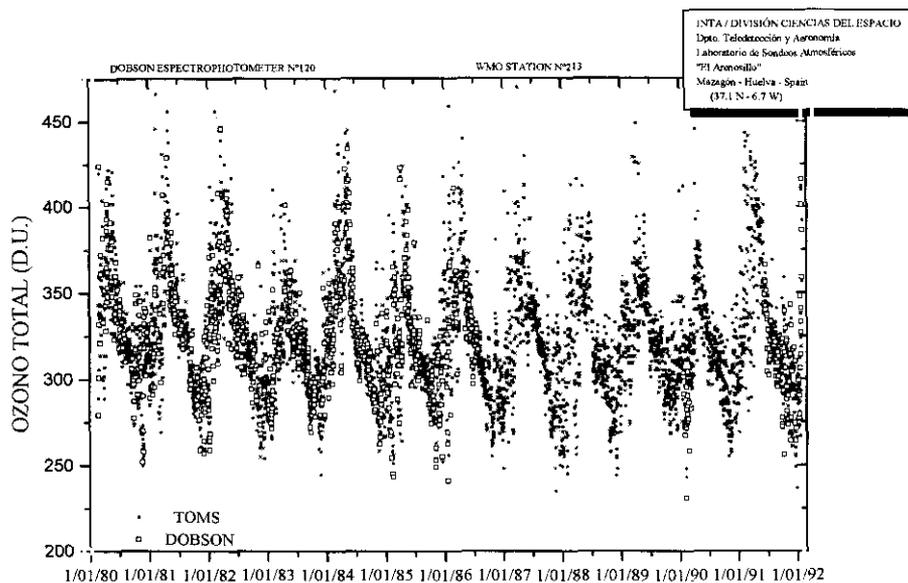


Figura 8. Intercorparación entre los valores de ozono medidos por el TOMS y el Dobson

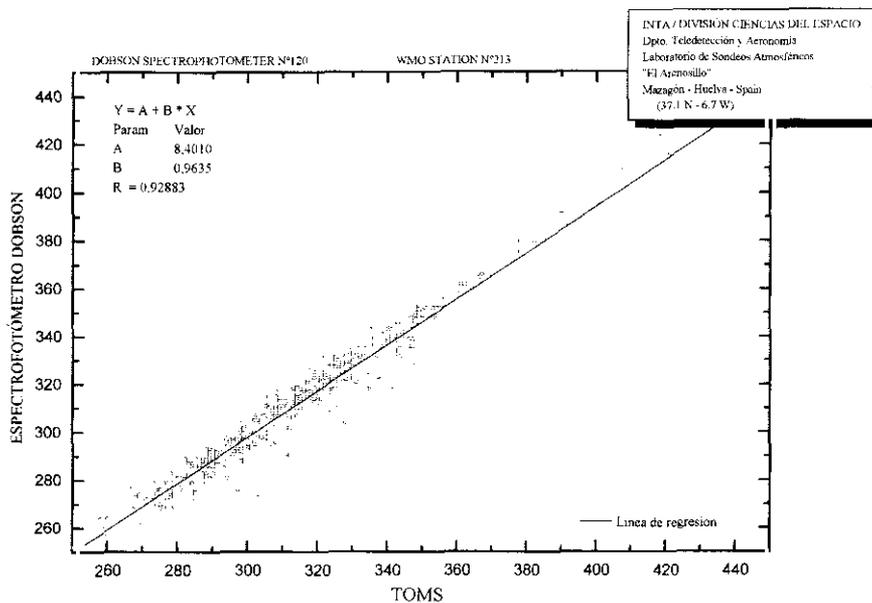


Figura 9. Regresión lineal para los valores del TOMS frente a los del espectrofotómetro Dobson para el periodo 25/02/80 - 31/01/92.

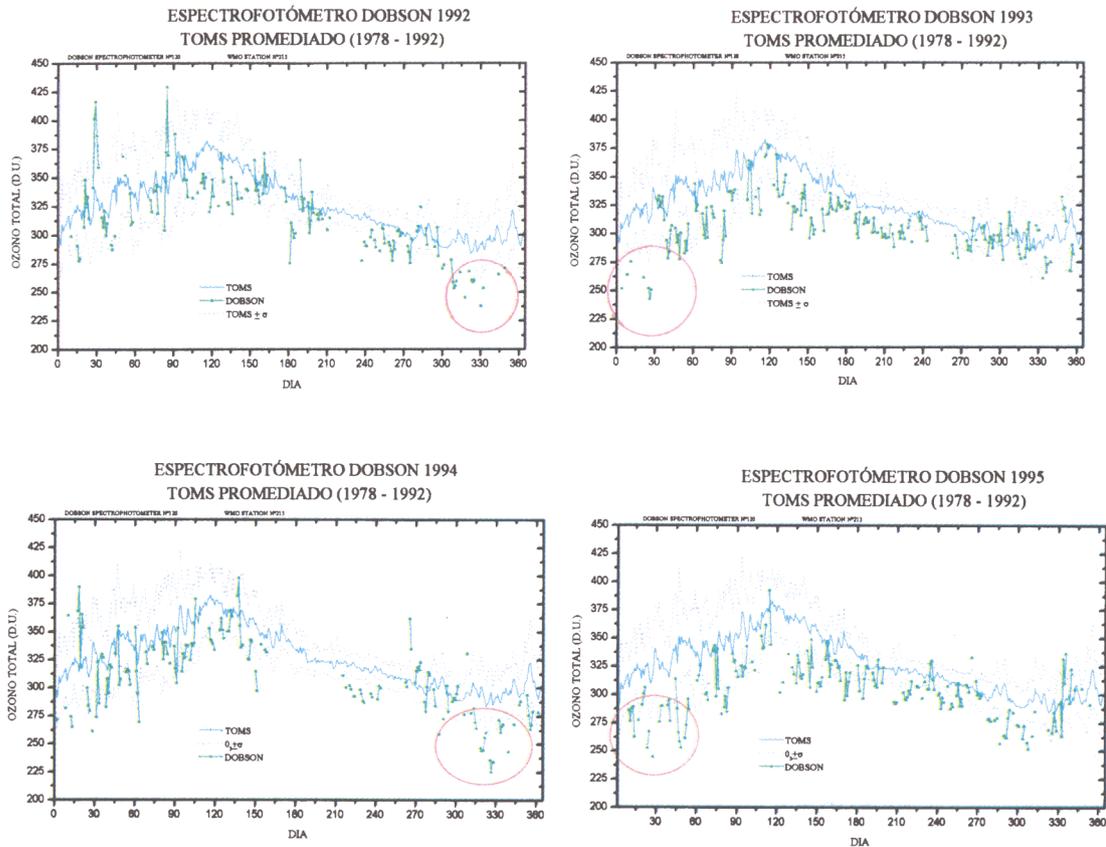


Figura 10. Evolución del ozono durante los años 1992-1995 frente a los valores promediados (1978-1992) correspondientes al TOMS. Aparecen señalados los valores anormalmente bajos.

- c) La bondad del ajuste de los datos obtenidos con el espectrofotómetro Dobson y el sistema TOMS del satélite Nimbus-7 durante el período común de observaciones, pone de manifiesto un alto nivel de fiabilidad de los registros de El Arenosillo.
- d) No se ha observado influencia significativa en la evolución del ozono en la latitud de El Arenosillo (37°N) con motivo de la inyección de aerosoles en la estratosfera por la erupción del monte Pinatubo (15°N) durante el período de influencia (junio 1991-diciembre 1993).
- e) Valores de mínima concentración de ozono durante los periodos invernales, vienen detectándose en El Arenosillo desde 1992. La OMM resaltó el 14% de significativa reducción detectado en el Suroeste de España en el invierno de 1994/95.