

ANÁLISIS DE VEINTICINCO AÑOS DE DATOS DE TOTAL DE OZONO EN COLUMNA SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA (1978-2002)

José Luis CAMACHO RUIZ; José Antonio LÓPEZ DÍAZ;
Antonio LABAJO SALAZAR e Isabel GÓMEZ DE ANDRÉS

Subdirección General de Climatología y Aplicaciones, Instituto Nacional de Meteorología

RESUMEN

Se presentan los resultados de los análisis del total de ozono atmosférico contenido en una columna a partir del espectrofotómetro Brewer de Madrid operado por el Instituto Nacional de Meteorología (INM) desde 1993 a 2002, complementado con las observaciones de los instrumentos a bordo de satélites. Se utilizan principalmente la serie de datos del Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) a bordo del satélite Nimbus-7 en el periodo 1978 a 1993. Se complementa el análisis con los datos del TOMS a bordo del satélite Earth-Probe. Se trata de obtener niveles del contenido total de ozono en columna, comportamiento diario y estacional y las variaciones espaciales dentro del reducido ámbito geográfico de nuestra Península, con objeto de tener una referencia ante eventos mínimos localizados temporalmente y posibles cambios en el futuro. Por último, se incluye un análisis de la tendencia a partir de los datos de la serie TOMS para Madrid, una vez separada de la variación estacional.

Palabras clave: Ozono, satélites, TOMS, espectrofotómetros, Brewer, Climatología.

ABSTRACT

Total ozone measurements are analysed from two sources: Madrid sited spectrophotometer Brewer operated by the National Institute of Meteorology (INM) in the period 1993-2002 and Total instrument Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) on board the satellite Nimbus-7 in the period 1978 at 1993. The analysis is supplemented with data from Earth-Probe TOMS. The purpose of the study is to obtain information about normal levels of the total content of ozone in column, its daily and seasonal behaviour and the spatial variations inside the reduced geographical environment of our Peninsula. This could provide a reference for the occurrence of events of minimum values located temporarily and possible changes in the future. A further analysis of the Madrid TOMS series is provided once seasonal variation is removed.

Key words: *Ozone, satellites, TOMS, spectrophotometers, Brewer, Climatology.*

1. INTRODUCCIÓN. OBSERVACIONES DISPONIBLES

El conocimiento de los niveles de los valores totales de ozono en columna que se pueden considerar normales en cada época del año sobre la Península Ibérica y aquellos valores que se pueden considerar como extremos es importante porque la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie de la tierra depende de cuánto ozono se interponga en su camino. La mayor parte de la contribución al total de ozono proviene de la llamada “capa de ozono” situada alrededor de unos 25 km de altura en nuestras latitudes.

Las fuentes de información van a ser dos. El sensor Espectrómetro de Representación espacial de Ozono Total ó Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) a bordo de satélites de órbita polar

operados por la NASA, y el espectrofotómetro Brewer instalado en Madrid que proporciona medidas de ozono total en columna entre otras magnitudes.

La serie de datos obtenida por el TOMS del Nimbus-7 desde noviembre de 1978 hasta mayo de 1993 constituye un elemento muy utilizado en estudios sobre ozono en todas las latitudes por la continuidad en las medidas, por el cuidadoso reprocesado posterior y por coincidir en el tiempo con la aparición del “agujero de ozono” sobre la Antártida. Dichos datos se encuentran en una web de libre acceso <http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone.html> del Centro de Vuelos Espaciales Goddard en la que están disponibles datos digitales y mapas.

El TOMS es un instrumento destinado al mapeo de ozono montado en un satélite meteorológico de órbita polar. La medición del ozono total se basa en la dependencia de la radiación solar ultravioleta reflejada en el intervalo de longitudes de onda entre 312,5 y 380 nm y en la medida de la radiación solar directa en dichas longitudes.

El Brewer es un espectrofotómetro automático preparado para su uso en la intemperie, de solidez demostrada y relativamente poco mantenimiento. La medida de ozono se basa principalmente en la observación directa del sol, midiendo la intensidad relativa en diferentes longitudes de onda. En unas el ozono absorbe fuertemente y en otras su efecto es mucho menor. El Brewer mide en cinco longitudes de onda simultáneamente entre 302,5 nm y 320,1 nm.

2. ANÁLISIS DE LAS SERIES DEL TOMS DEL NIMBUS7. PERIODO 1978-1993

Se han tomado las series de datos de cinco estaciones en la Península Ibérica: Madrid, Murcia, Lisboa, El Arenosillo y Mont-Louis y una en Canarias como comparación. Se ha utilizado Mont-Louis (Francia), situado en los Pirineos Orientales a unas pocas decenas de kilómetros de la frontera con España para representar el noreste de la Península. Como las medidas no están corregidas al nivel del mar, hay que tener en cuenta el efecto de la altitud en las series de Madrid y Mont-Louis ya que sistemáticamente van a medir menos ozono total. Para el caso de Madrid, la corrección podría estimarse en unas 2-3 Unidades Dobson y para Mont-Louis por estar más alto y a mayor latitud entre 7 y 9 U.D.

En la tabla 1 están los valores de tamaño de la muestra, promedio, varianza, desviación típica, valor mínimo absoluto y valor máximo absoluto para cada una de las series de datos. En las estaciones con latitud mayor: Mont-Louis y Madrid, los valores de la media y la mediana son mayores pero también la variación de dichos valores, expresado mediante la varianza y la desviación típica, es superior. Izaña con valores de desviación típica del orden de la mitad de los otros muestra el comportamiento del ozono en áreas subtropicales.

Las distribuciones **no** se pueden considerar como distribuciones normales según los tests realizados, probablemente, por el hecho de que existe una importante componente anual en los valores por lo que el valor diario no es asimilable plenamente a un suceso aleatorio. Por ello, es recomendable tomar la mediana como valor representativo del nivel “medio” de la serie en vez de la media. Las diferencias para las estaciones peninsulares entre ambos estadísticos son del orden de 5 a 6 Unidades Dobson (solo 2 U.D. para Izaña) debido a que existe un alto número de valores atípicos en la derecha de la serie (valores elevados de O₃).

Tabla 1. Posición de las estaciones. Valores estadísticos de la serie TOMS 1978-1993

Estación	Lat	Lon	Alt (m)	Frec.	Media	Desv. típica	Mediana	Mínimo abs.	Máximo abs.
Madrid	40,40	-3,68	548	5232	320,1	38,0	314,2	213,7	476,5
Murcia	38,00	1,17	0	5221	321,6	35,3	316,2	227,7	497,5
Lisboa	38,77	-9,13	105	5230	320,4	35,6	316,3	215,0	490,9
Arenosillo	37,10	-6,73	41	5229	318,1	33,9	313,2	230,7	460,6
Mont-Louis	42,50	2,13	1650	5227	324,1	41,3	318,5	210,2	481,7
Izaña	28,30	16,5	2367	5225	296,1	22,1	294,0	220,8	439,4

El análisis de puntos atípicos muestra una dispersión mayor en los valores altos. El análisis de los promedios para cada uno de los 365-66 días muestra una alta variabilidad en los valores individuales y en fechas consecutivas.

Para filtrar las variaciones diarias y obtener una imagen más clara de la evolución estacional, se ha procedido a agrupar los datos en quincenas. Se ha tenido en cuenta años bisiestos de 366 días para agrupar los datos. Las quincenas pueden ser de 15 o 16 días. Se ha procurado agrupar quincenas de 16 días en el periodo veraniego cuando la variabilidad es menor. La última quincena contiene quince o dieciséis días de datos según el tipo de año.

Tabla 2. Promedios, desviación estándar y valores extremos quincenas en Madrid. Valores TOMS Nimbus-7 (1978 a 1993)

Fecha (bisiesto)	Quincenas	Cuentas	Promedios	Desv. Estand.	Máx. Abs.	Mín. Abs.
1 ene - 15 ene	1	222	310,2	31,9	412,6	251,4
16 ene - 31 ene	2	237	318,4	40,2	472,6	237,0
1 feb - 15 feb	3	221	328,0	39,8	443,0	237,4
16 feb- 1 mar	4	223	341,4	39,2	460,4	256,9
2 mar- 16 mar	5	221	336,0	34,2	453,0	261,0
17 mar- 1 abril	6	236	346,7	40,6	450,2	253,3
2 abril - 16 abril	7	224	357,6	38,4	475,9	276,7
17 abril- 2 mayo	8	238	367,8	29,6	445,0	293,8
3 mayo - 17 mayo	9	209	364,0	29,1	476,5	305,8
18 may - 1 jun	10	206	352,9	24,2	445,2	304,9
2 jun- 16 jun	11	201	340,6	21,7	410,8	285,4
17 jun - 1 jul	12	205	331,8	18,4	391,2	289,0
2 jul- 16 jul	13	209	318,6	15,0	364,6	286,4
17 jul - 1 ago	14	224	312,1	14,4	361,8	281,7
2 ago- 16 ago	15	208	310,0	12,2	359,1	283,6
17 ago - 1 sep	16	222	306,2	11,1	338,7	277,5
2 sep - 16 sep	17	210	299,7	13,4	351,6	265,0
17 sep- 1 oct	18	209	294,0	17,6	355,9	257,8
2 oct - 16 oct	19	208	294,0	21,5	368,5	260,5
17 oct - 31 oct	20	210	285,2	19,2	372,1	247,8
1 nov - 15 nov	21	224	286,4	26,2	370,3	213,7
16 nov- 30 nov	22	222	281,4	26,4	357,9	225,1
1 dic - 15 dic	23	218	291,6	26,7	419,9	226,7
16 dic - 31 dic	24	225	302,9	32,8	427,6	222,1

A partir del mínimo de la segunda quincena de noviembre (281 U.D.), los valores aumentan de forma constante y sostenida, con una rotura en la línea de tendencia en la primera quincena de marzo, alcanza el máximo en abril (367 U.D.) y desciende abruptamente en la segunda quincena de mayo hasta la primera de julio en que comienza a suavizarse el descenso. El corazón del verano es una época de menor descenso. En el otoño se reanuda el descenso si bien con más variaciones en la tendencia. En la figura 1, en la que se muestran los valores de los promedios sumando y restando la desviación estándar, proporciona una visión más clara, por estar suavizados los cambios, de lo apuntado en el análisis de los datos diarios. La evolución de los otros observatorios es similar excepto Izaña que muestra las particularidades de la atmósfera subtropical suavizando los extremos.

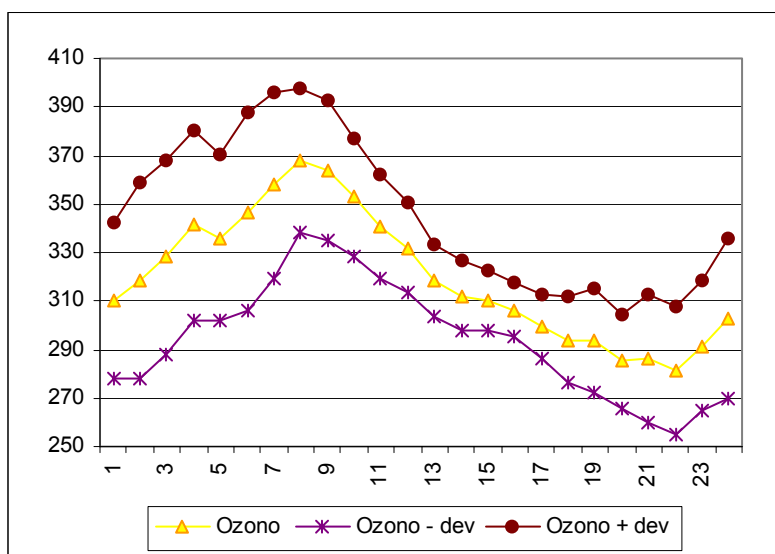


Fig. 1. Evolución anual. Promedios quincenales datos TOMS del Nimbus-7 para Madrid Periodo 1978-1993

Estudios realizados con las series mensuales para Arosa (Suiza), en el informe de la OMM de 1988 muestran un ajuste a una onda anual y una semianual y una evolución similar a la que mostramos. Sin embargo, dicho ajuste para los meses en que se producen los máximos no es satisfactorio.

3. ANÁLISIS SERIE BREWER MADRID. PERIODO 1993-2002

El espectrofotómetro Brewer Mark IV con número de serie 070 se instaló en la terraza de la sede central del Instituto Nacional de Meteorología en los días 24 y 25 de mayo de 1991. Se estudian los datos entre 1993 y 2002 para asegurar la calidad de los datos.

Se ha realizado un estudio similar a la serie del TOMS para estos datos. Los resultados básicos se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen estadístico de la serie

Frecuencia = 3467	Media = 313,3	Mediana = 310,0
Desviación típica = 33,1	Mínimo = 218,0	Máximo = 489,8

Una comparación con la serie TOMS muestra que los valores centrales: media y mediana son inferiores en 4-6 U.D. respectivamente. Sin embargo, el valor máximo y el segundo valor (ambos en 1998) superan al valor máximo absoluto de la serie TOMS. El mínimo absoluto de ambas sigue perteneciendo a la serie TOMS.

El análisis de la serie de valores Brewer tampoco muestra buen ajuste con una distribución de tipo normal mostrando comportamiento similar a la serie del TOMS y por las mismas razones que dicha serie. El análisis de datos atípicos muestra también la existencia de valores elevados que se salen del comportamiento normal. Los valores mínimos no muestran tanta dispersión como los máximos.

El gráfico de probabilidad de la distribución de valores del Brewer se parece mucho al del TOMS en su parte derecha (valores altos), pero la parte izquierda (valores bajos) se ajusta mejor a la cola de una distribución normal. El análisis de promedios diarios muestra características similares a la serie TOMS.

El análisis de promedios quincenales se realiza empleando los mismos intervalos temporales utilizados en la serie TOMS. Se aprecia una evolución similar con los mínimos en la misma época del año. El mínimo corresponde a la segunda quincena de octubre siendo poco apuntado y manteniéndose valores bajos en promedio entre octubre y noviembre en las cuatro quincenas. Los máximos se producen en el mes de abril, especialmente en la segunda quincena.

Si se realiza una comparación de promedios quincenales entre los datos del Brewer frente a los del periodo 1996-2002 del TOMS a bordo del Earth-Probe (EP en adelante) y frente a los del Nimbus-7 correspondiente al periodo 1978 a 1993, y se comparan los gráficos se obtiene la figura 2. En ella se aprecia que los valores medidos por el TOMS EP son ligeramente inferiores a los del Brewer en verano, son superiores en febrero y muy parecidos en el resto del año. Sin embargo, el hecho más destacable son las grandes diferencias entre los promedios de las quincenas correspondientes al invierno y primavera en el momento en que se registran los mayores valores de ozono total en columna al compararlo con los datos del Nimbus-7. Se aprecia una disminución en los promedios Brewer de la década 1993 a 2002 frente a los promedios TOMS del periodo 1978 a 1993 en la época apuntada.

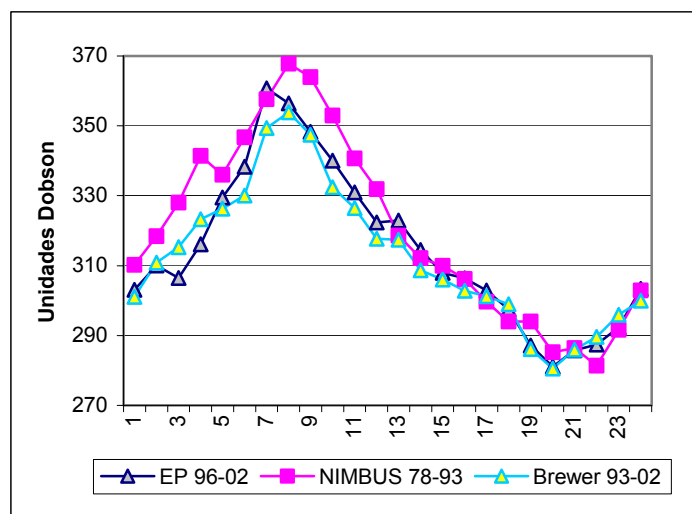


Fig. 2. Promedios quincenales series Brewer y TOMS

Por último se realizó un ajuste lineal entre los datos del Brewer y los del TOMS del Earth Probe en los días en que había datos en ambos siguiendo el método expuesto en el trabajo de CARREÑO *et al.* (2002). El total de pares de datos entre los años 1996 y 2002 es de 2,217. El coeficiente de correlación es de 0,96427 con una R-cuadrado = 92,9816. La ecuación lineal obtenida es $EPTOMS = 0,960442 + 0,993518 * Brewer$. Se aprecia que la pendiente es prácticamente 1 y que la ordenada en el origen es de 1 U.D. por debajo del error instrumental de ambos aparatos.

4. ANÁLISIS ESPACIAL

Se pretende ofrecer una visión de las posibles diferencias y similitudes en el comportamiento de las series cuando se toman conjuntamente las cinco estaciones peninsulares: Madrid, Murcia, Lisboa, Arenosillo y Mont-Louis. Diferentes análisis realizados: regresiones parciales, extracción de las funcionales ortogonales principales, correlaciones parciales muestran un alto grado de relación entre todas las series. Se encuentran mayores afinidades entre Lisboa y Arenosillo ambos situados en la costa atlántica y ciertas diferencias entre Lisboa y Murcia en costas opuestas de la Península. Sin embargo, los resultados más interesantes provienen de las diferencias entre los promedios quincenales tal y como se resume en la figura 3.

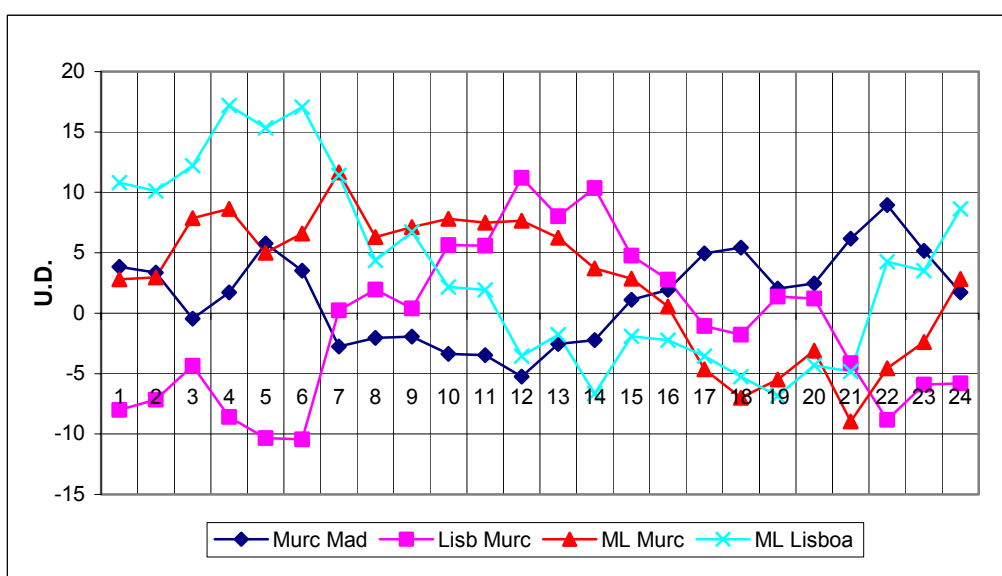


Fig. 3. Diferencias entre los promedios quincenales entre las estaciones de Murcia-Madrid, Lisboa-Murcia, Mont-Louis (ML) – Murcia y Mont-Louis – Lisboa para los datos del TOMS del Nimbus-7 Periodo 1978-1993

En los meses de invierno se mide más ozono en promedio en Murcia que en Lisboa cambiando de signo la diferencia en verano. Hay un gradiente grande entre Mont-Louis y Lisboa en los meses de invierno y primavera. Las diferencias entre Murcia y Mont-Louis son menores si bien en el otoño, en Murcia se mide más que en Mont-Louis. Parece deducirse que sobre el Mediterráneo en los meses de otoño e invierno se registran valores más altos de ozono y en verano, en cambio, los valores más altos están en la zona atlántica.

Los estudios realizados por CUEVAS (2001) y NAVARRO (2002) sobre las diferencias espaciales en las medidas del ozono total del TOMS, en especial el efecto GHOST (Global Hidden Ozone Structures) apuntan una serie de causas por las cuales pueden producirse estas diferencias. El estudio aportado aquí es menos detallado espacialmente: se aportan sólo cinco puntos que caracterizan los extremos y centro de la Península Ibérica, pero plantea la evolución a lo largo de todo el año, avanzando otras posibles características del fenómeno.

Para ver mes a mes la evolución se han construido mapas de valores de ozono y de gradientes a partir de los cinco puntos indicados sobre cuadrícula fija y utilizando interpolación mediante kriging. Como ejemplo se muestra el mapa correspondiente a la segunda quincena de julio (Fig. 4), en el que se aprecia el déficit de ozono en el interior de la Península atribuible al efecto GHOST. También se aprecia una diferencia muy marcada en invierno pero en sentido positivo respecto a Lisboa.

Sin embargo, también aparecen otros efectos como el gradiente Norte-Sur, expresado por las diferencias entre Mont-Louis y Murcia y el cambio en el signo de las diferencias entre el “costado” atlántico y el “costado” mediterráneo de la Península expresado mediante las diferencias entre Lisboa y Murcia. Respecto a los primeros, se aprecia que en el otoño se invierte el signo del gradiente. Lo normal es que existiera más ozono en Mont-Louis ya que, en promedio así ocurre en latitudes medias, sin embargo, en la primera quincena de noviembre se produce una diferencia a favor de Murcia de 9 U.D. Esta diferencia puede ser explicada en gran parte por la diferencia de altura en ambas estaciones por lo que la aproximación a los hechos reales sería considerar que existe un gradiente muy importante en los meses de primavera, quedando éste muy desdibujado o invirtiendo ligeramente la tendencia en otoño.

En el caso de las diferencias Atlántico-Mediterráneo, se aprecia que los valores de Lisboa son más bajos a finales del invierno y principios de primavera coincidiendo con la época de los valores máximos anuales pero que las diferencias se invierten rápidamente al comienzo del verano y con valores absolutos similares.

Quincena 14. Valores TOMS promedio. Gradientes.

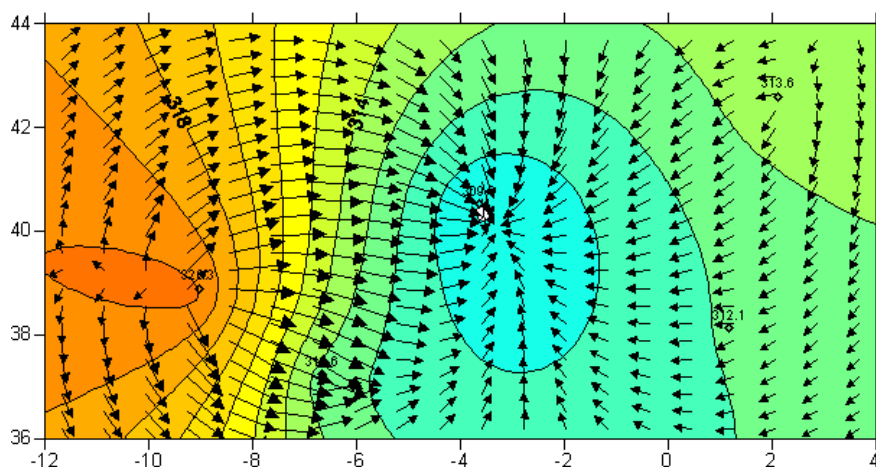


Fig. 4. Mapa representación espacial promedios quincenales (quincena 14 – segunda de julio) y flechas de gradiente

5. ESTUDIO DE TENDENCIAS. DATOS SERIE MADRID TOMS

Dada la considerable variabilidad intra-anual que muestra la serie de datos de ozono de Madrid, se ha procedido a dividirla en quincenas antes de abordar un estudio estadístico de las tendencias que presenta. En la tabla 4 se recogen los valores del test de Mann-Kendall aplicados a cada quincena (primera fila), así como los valores numéricos de las pendientes de las correspondientes rectas de regresión (segunda fila).

Tabla 4. Valores por quincenas del p-valor del test de Mann y de la tendencia de la serie de promedios quincenales de ozono en Madrid (1978-1993)

	En1	En2	Fb1	Fb2	Mr1	Mr2	Ab1	Ab2	My1	My2	Jn1	Jn2
p-v(%)	58-	25-	73-	5,4-	6,7-	8,3-	88-	5,3-	21-	2,5-	70-	41-
U.D./año	0,7-	2,6-	0,9-	2,9-	1,9-	2,7-	0,1+	2,2-	1,5-	1,8-	0,5+	0,8-

	Jl1	Jl2	Ag1	Ag2	Sp1	Sp2	Oc1	Oc2	Nv1	Nv2	Dc1	Dc2
p-v(%)	17-	30-	2,5-	3,2-	55-	35-	62+	21-	6,7-	15+	73-	8,3-
U.D./año	0,8-	0,6-	1,2-	1,2-	0,1-	0,6-	0,1+	0,7-	1,8-	0,8+	0,1-	1,9-

Se aprecia que las quincenas con niveles de significación del test por debajo de $\alpha = 5\%$ son la segunda de mayo y las dos del mes de agosto. Si tomamos $\alpha = 10\%$ resulta que hay que añadir a las anteriores la segunda de febrero, las dos de marzo, segunda de abril, primera de noviembre y segunda de diciembre.

Del gráfico de evolución anual de las pendientes por quincenas (Fig. 5) se deduce que las tendencias decrecientes con mayor valor se dan en el periodo desde la segunda quincena de diciembre a la segunda de mayo (cinco meses y medio), con picos en febrero y marzo. Sin embargo la diferente varianza para distintas quincenas explica que esos no sean los más significativos estadísticamente. Los valores más grandes en valor absoluto de la tendencia decreciente superan 2,5 U.D. / año, y corresponden a disminuciones porcentuales en 10 años del orden de 8%.

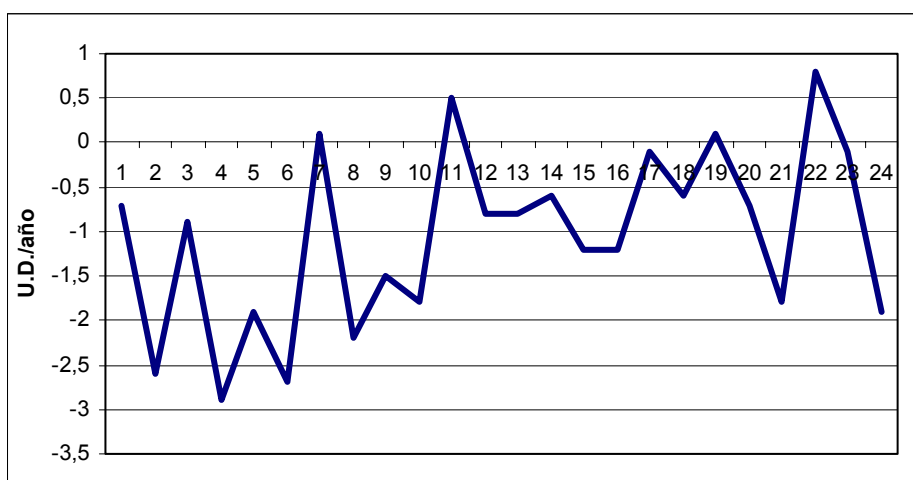


Fig. 5. Valores de las tendencias en la serie de promedios quincenales de Madrid (1978-1993)

Considerando los resultados de los diferentes tests para cada quincena como variables aleatorias independientes, es posible hallar un valor global (es decir, para todo el año) para el nivel del test de tendencias basándose en la ley binomial. Podemos, por ejemplo, preguntarnos si los 3 resultados significativos al nivel $\alpha = 5\%$ de la tabla 1 son significativos para el conjunto de los 24 tests. Encontramos un nivel global dado por:

$$\alpha_G = 1 - \sum_{i=0}^{i=3} C_i^{24} 0,95^{24-i} 0,05^i = 0,03$$

y por tanto significativo al 5%. Es decir, aunque sólo 3 de los 24 tests han sido significativos individualmente al 5%, bajo la hipótesis nula de no tendencia la probabilidad de que al menos 3 tests sean significativos es inferior al 5%. Cálculos similares para los 9 resultados individuales significativos al 10% arrojan un nivel global muy bajo, 0,005%, y por tanto muy significativo. Cabe concluir a la vista de estos resultados que globalmente la serie presenta una tendencia significativa al 5%. Por otra parte, aplicando el test de Mann a la serie de las medias anuales se obtiene también un resultado significativo al 5%, p-valor = 0,043, para una tendencia también de signo negativo. La pendiente de la recta de regresión correspondiente es $-0,98$ U.D. / año. El descenso promedio a lo largo del periodo de 14 años completos es de un 4,3% del valor medio (que es 319,8 U.D.), o un 3,1% cada 10 años (Fig. 6).

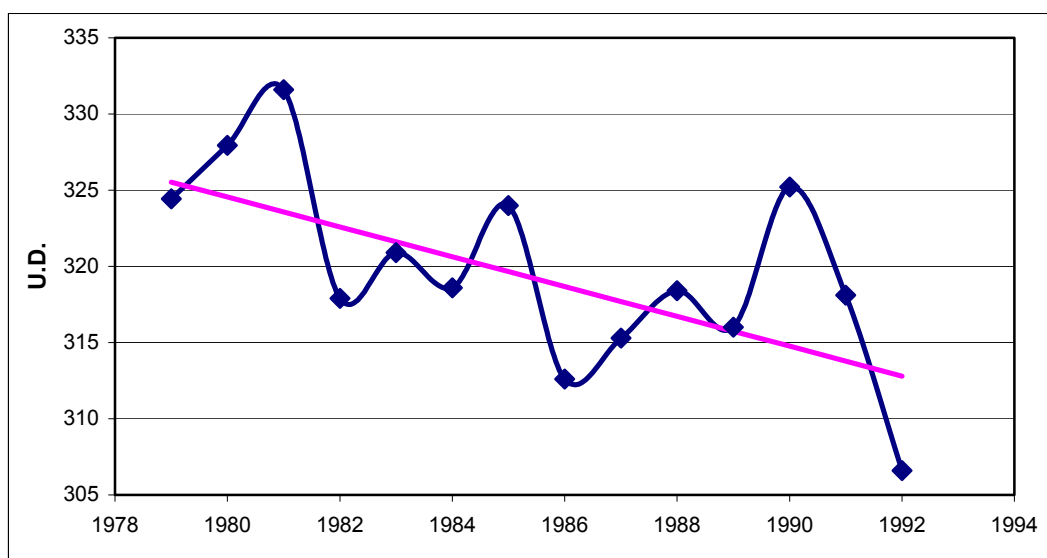


Fig. 6. Serie de promedios anuales de ozono en Madrid y recta de regresión correspondiente

6. CONCLUSIONES

Se establecen unos niveles de contenido total de ozono en columna para Madrid que han de ser una referencia para años futuros. Los máximos en promedios quincenales para todas las series de la Península se producen en la segunda quincena de abril. Los mínimos se producen en noviembre. El comportamiento de la evolución anual de los promedios diarios y quincenales es similar.

Se ha producido un paulatino descenso en dichos niveles a lo largo de la década de los 80 en la serie TOMS de Madrid, significativo estadísticamente al 5% de nivel de significación. Los mayores valores de la tendencia decreciente se dan en febrero y marzo y corresponden a disminuciones del 8% de contenido de ozono en 10 años. Para el promedio anual el descenso es de un 3,1% cada 10 años. Los niveles de la serie TOMS son inferiores a los de la serie Brewer y este hecho concuerda con la tendencia de la serie TOMS y con la información de la OMM.

Las pérdidas experimentadas ocurren principalmente en la primera mitad del año, cuando se registran las cantidades mayores. El mantenimiento de la observación del ozono mediante satélites y redes basadas en tierra es esencial para delinear la tendencia en años futuros.

Existen singularidades espaciales que muestran comportamientos diferentes a lo largo del año cuando se representan observaciones del mismo día en un mapa. El mínimo de Madrid en verano, la evolución anual de los gradientes norte-sur y este-oeste en la Península precisan de ulteriores estudios mediante las series de datos de los satélites actualmente en órbita y, sobre todo, mediante las redes de espectrofotómetros de España y otros países vecinos.

7. AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la NASA por el suministro de los datos reprocesados de la serie TOMS para los observatorios citados y a los operadores del Brewer de Madrid por su trabajo para obtener datos de calidad de dicho instrumento durante estos años.

8. REFERENCIAS

- CARREÑO, V. *et al.* (2002). *Validación del modelo de predicción del Índice Ultravioleta del Instituto Nacional de Meteorología*. 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geofísica y Geodesia, Valencia.
- CUEVAS, E. *et al.* (2001). "Sea-land total ozone differences from TOMS: the GHOST effect". *J. Geophys. Res.*, Vol. 106, D21, pp. 27745-27755.
- NAVARRO, M.; GIL, M. y CUEVAS, E. (2002). *Comparación de Medidas de Ozono Total Obtenidas con los Instrumentos de Satélite TOMS y GOME*. 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geofísica y Geodesia, Valencia.
- REDONDAS, A. *Curso de Operadores de Espectrofotómetros Brewer*". Versión 2. Observatorio Atmosférico de Izaña.
- WMO (1998). *Report of the International Ozone Trends Panel*. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project, Report nº 18.