

Evolución del Arsenal Científico para la Vigilancia de la Capa de Ozono Parte II

J. C. González N.¹ ,O. Simbaqueva F.²

¹ Dirección de Investigación Fundación Universitaria Los Libertadores.

² Profesor Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Resumen

Los propósitos de este trabajo son: a) describir los dominios en los que se centra parte de la literatura científica reciente, relacionada con la evaluación de la columna total de ozono y con los niveles de radiación solar ultravioleta B (RUVB); b) resaltar las más importantes estrategias desarrolladas en el abordaje del análisis y seguimiento de la capa de ozono; c) hallar las tendencias de asociación científica para la investigación de la capa de ozono; d) sugerir el ámbito en el cual los países Andinos pueden formar parte de la comunidad científica que estudia los niveles de la radiación ultravioleta solar en la superficie terrestre. Metodológicamente, se toman los hilos históricos de los criterios científicos que determinaron los avances teóricos e instrumentales que han conducido al nivel de desarrollo científico y tecnológico disponibles en la actualidad. Se encuentra que, después de más de treinta y cinco años de enunciado el problema ambiental de carácter global, se ha formado y organizado una amplia y fuerte comunidad científica internacional que desplegando esfuerzos, ha logrado direccionar y motivar a muchos sectores, desde los más altos niveles de gobierno de las organizaciones internacionales, para controlar sustancias antropogénicas que emitidas a la atmósfera, le hacen daño a la capa de ozono. Se ha logrado reducir las emisiones de las sustancias de primera generación en más de 95 %, pero dado que la mayor parte de ellas permanecerán en la

atmósfera por al menos 40 o 50 años, se requiere continuar con los esfuerzos para mejorar los métodos de control y medición existentes y encontrar otros, más precisos, funcionales y económicos.

Palabras clave: Capa de ozono, radiación ultravioleta solar, espectrofotómetro Dobson, TOMS, lidar, radiómetros UV.

Abstract

Among the aims of this work it's included the description of the domains involved in recent scientific papers related with the treatment and the analysis of the ozone layer and with the solar ultraviolet radiation levels (SUVRL). Furthermore, it's emphasized the more important developed strategies to face the analysis and monitoring of the ozone layer; also, finding the trends in the scientific community association in order to do research into ozone layer. Finally, it's suggested a domain in which Andian countries can construct scientific community for tracking the SUVRL on terrestrial surface. Methodologically, it's searched the trace of the historical scientific criteria which defined the tools and theoretical advance in the present scientific development. It's found that after more than thirty five years, since the global problem announcement, it has been organized a very wide and strong international scientific community with which efforts pointed out and gear up governments and international organizations in order to control anthropogenic substances that emitted to the atmosphere hurt the ozone layer. It has been achieved successfully to reduce emissions of "first generation substances" in more than 95 %, but since the major part of them will stay in the atmosphere for at least 40 or 50 years, it is necessary to continue with the efforts to enhance the current methods of control and measurement and to develop new precise and economical methods.

Keywords: Ozone layer, solar ultraviolet radiation, Dobson spectrophotometer, TOMS, lidar, UV radiometers.

3.4. Ozonosondeo

Para medir el perfil vertical del ozono se utilizan analizadores de ozono instalados en globos que funcionan asociadamente con una radiosonda, y que pueden ascender a alturas de entre 30 y 40 km. La radiosonda recibe la señal del analizador de ozono y mediante ondas electromagnéticas la transmite a una estación terrestre. Aunque hay varios conceptos de analizadores en ozonosonda, el más común consiste en una celda de concentración electroquímica que opera según la interacción química entre cada molécula de ozono y el yoduro de potasio, que genera yodo libre, produciendo dos electrones; una bomba movida con un pequeño motor eléctrico hace pasar el aire atmosférico por la solución que se encuentra en la celda electroquímica. La señal de salida es proporcional a la concentración de ozono presente en el aire [OMM, 1990].

Desde los años 60 del siglo XX los científicos y los meteorólogos comenzaron a utilizar los globos o sondas con instrumentación para medir sistemática y casi diariamente, temperatura, presión, vientos y ozono, al menos en tres estaciones importantes: la estación Británica de Halley, la estación Japonesa de Syowa y la estación Americana del Polo Sur [Solomon et al., 2005]. Cuando en los años 70 se encendieron las alarmas por la llegada de los CFC a la atmósfera (año 1973) [PNUMA, 2008] y la advertencia en 1974 por parte de Molina y Rowland de que los CFC podían reaccionar con el ozono estratosférico, se dinamizó la investigación para perfeccionar los métodos instrumentales existentes y para desarrollar unos nuevos, con la ayuda de las recientes tecnologías. Los años 80 fueron testigos de la evidencia de la verdadera magnitud del daño en la capa de ozono, en particular, con el descubrimiento del hueco de ozono en la Antártida mediante ozonosondas e instrumentos de ozono total [Farman et al., 1985].

De las diferentes evaluaciones realizadas sobre la exactitud en la determinación del ozono total por medio de ozonosondeo se concluye que existen varios factores a tener en cuenta. Uno es la variación en la exactitud del analizador en función de la altura, lo cual implica que debe tenerse en cuenta un factor de corrección para ajustar al valor estimado. En los años 90 se aceptaba que, comparativa-

mente con los mejores instrumentos a nivel terrestre se lograban exactitudes en el rango de $\pm 5\%$, siempre y cuando el globo lograra ascender sin explotarse hasta alturas similares a aquellas en las que la presión estuviese alrededor de 15 hPa. Para estimar el ozono existente en alturas mayores (u "ozono residual", como se le denomina) se asume alguna hipótesis, como por ejemplo una relación de mezcla constante. [OMM, 1990]. Estudios más recientes [Thompson et al., 2003] dispusieron de datos tomados hasta alturas en las que la presión era de 7 hPa, en ellos el "ozono residual" fue comparado con el obtenido por medio de satélites climatológicos por retrodispersión de la radiación UV solar (SBUV, según sigla del idioma Inglés). En el trabajo de Thompson et, al., (2003) se reporta que si la explosión del globo ocurre en alturas cercanas a las que la concentración del ozono es máxima, la hipótesis de la relación de mezcla constante introduce errores mayores de 20 %. En el mismo trabajo se reporta que para el grupo de estaciones en las que se realizaron los ozonosondeos y durante el periodo de 1998-2000, el 75 % de los mismos alcanzaron la presión de 7 hPa y en ocho estaciones el 60 % superó esa marca. Sin embargo, allí se consideró que los ozonosondeos en los que se obtuvo 10 hPa generaron datos con los que se realizaron buenos estudios estadísticos. Lo anterior permite concluir que actualmente la exactitud que se logra con esta técnica, debe ser bastante mejor que $\pm 5\%$. Los ozonosondeos se han convertido en un instrumento muy útil en los estudios de la dinámica climatológica y en su relación con el ozono en columna. La información que se recoge en los perfiles verticales procedentes de los ozonosondeos, es un soporte muy importante para complementar la que se recibe de los satélites con el propósito de obtener estimaciones acertadas de la capa de ozono (Lamsal et al., 2004). Un valor agregado de la información así obtenida es la oportunidad de desarrollo de nuevos métodos matemáticos y estadísticos para la climatología. Una metodología para el cálculo del ozono total obtenible en los ozonosondeos tiene en cuenta criterios como [Vaisala, 1996]:

1. El ozono total es el obtenido por la integración del ozono en la columna que se extiende desde el fondo (superficie terrestre) hasta la parte superior de la atmósfera y se denotará por $\Delta\Omega$.

2. El ozono residual es el ozono que no alcanza a quedar incluido en la detección de la ozonosonda, $\Delta\Omega_r$, i. e., el que está por encima de la parte superior de la columna formada por la superficie terrestre y el punto en el cual explota el globo que transporta la ozonosonda.

El ozono que queda incluido en la medición de la sonda se denota por $\Delta\Omega_s$, y se obtiene de la suma de las lecturas parciales registradas entre intervalos de medida; generalmente, éste se expresa en unidades de g/m^2 .

Así el ozono total es la suma del ozono medido por la sonda, más el ozono residual:

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_s + \Delta\Omega_r \quad (13)$$

$$\Delta\Omega_s = \left(\frac{\varepsilon_{03}}{g}\right) \int_{p_i} p_{03} d \ln p_i = \sum_i \left[\left(\frac{\varepsilon_{03}}{2g}\right) (p_{03i} + p_{03i+1}) \ln \left(\frac{p_i}{p_{i+1}}\right) \right] \quad (14)$$

el subíndice i indica el i -ésimo punto de medida; $p_i \dots p_{i+n}$, indican la presión ambiental medida, [hPa]; $p_{03i} \dots p_{03i+n}$, es la presión parcial del ozono [mPa]; $\varepsilon_{03} = 1,6571$, es la razón entre las masas moleculares del ozono y del aire, la masa molar del ozono es 48,000; g es la aceleración de la gravedad, $9,80665 \text{ m/s}^2$. Una vez incluidas las constantes en la ecuación (14), ésta expresa el ozono en unidades de g/m^2 , y se transforma en:

$$\Delta\Omega_s = \sum_i \left[(0,0845)(p_{03i} + p_{03i+1}) \ln \left(\frac{p_i}{p_{i+1}}\right) \right] \quad (15)$$

La ecuación (15) también se puede expresar en unidades Dobson (UD), así:

$$\Delta\Omega_s = \sum_i \left[(3,9449)(p_{03i} + p_{03i+1}) \ln \left(\frac{p_i}{p_{i+1}}\right) \right] \quad (16)$$

Para determinar el ozono residual, asumiendo una razón constante de mezcla desde la altura de explosión del globo portador de la ozonosonda hasta donde la presión ambiental es 0 hPa, (i.e., $p_{03i} = p_{03i+1} = p_{03final}$). Así, se puede plantear la ecuación (17):

$$\Delta\Omega_r = \left(\frac{\varepsilon_{03}}{g} \right) p_{03i} \quad (17)$$

Si la presión se expresa en hPa, el resultado de esta ecuación queda expresado en UD y se completa lo requerido en la ecuación (13).

Las principales fuentes de error involucradas con esta tecnología se centran en, i-. la celda sensora de ozono, ii-. en la parte de la electrónica asociada a la conversión de datos, iii-. en las medidas de temperatura y de los flujos de aire en la bomba de succión, iv-. en factores de telemetría y en errores aleatorios por las condiciones ambientales que cambian activa y pasivamente [Strong y Bailak, 2005]. Sin embargo, continuamente se realizan avances tecnológicos que rápidamente se incluyen en los nuevos modelos, para garantizar mayor exactitud en las mediciones. Así, por ejemplo, en el sensor de presión, con rangos de medida desde 3 mbar hasta 1060 mbar, con resolución de 0,1 mbar, se logra una exactitud mejor que $\pm 0,5$ mbar. En el sensor de temperatura, con rango de medida entre 60 y -90°C , con resolución de $0,1^\circ\text{C}$, se logra una exactitud mejor que $\pm 0,5^\circ\text{C}$ [Vaisala, 1996].

3.5. LIDAR

Una técnica relativamente nueva utilizada para obtener la distribución vertical del ozono in situ, es la técnica LIDAR (por la sigla en idioma Inglés de Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), también denominado, radar óptico, que se clasifica como una técnica de sensores remotos activos. Aunque esta técnica se utiliza en diferentes aplicaciones con radiaciones típicas de radar, la aplicación en la determinación de los perfiles de ozono, consiste en la emisión (disparo nocturno en la dirección cenital) de un haz de radiación UV, correspondiente al rango de las que tienen alta absorción por parte del ozono; luego se detecta y analiza la radiación retrodispersada como función del tiempo transcurrido entre el disparo y la recepción del haz retrodispersado. La radiación retrodispersada está constituida por aquella que luego de ser emitida, choca contra las moléculas de las distintas especies químicas de la atmósfera, una fracción notable es absorbida (especialmente

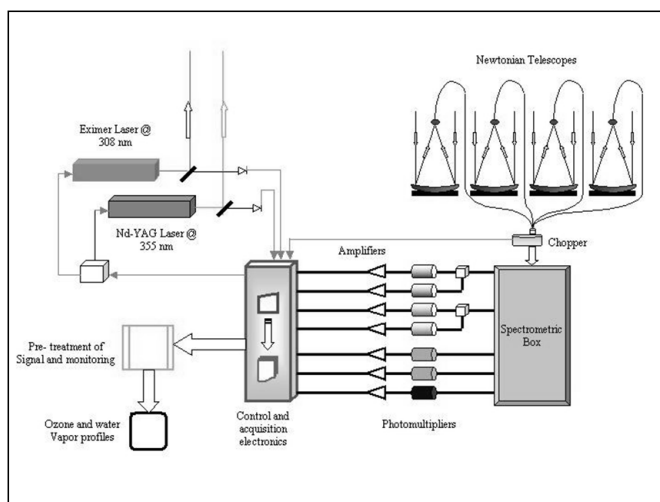


FIGURA 1. Descripción esquemática de un sistema LIDAR de absorción diferencial para determinación de ozono estratosférico. [Tomada de Wolfram, Otero et al. (2005)], Sistemas lidar en la campaña SOLAR. Anales AFA. Vol 17,353-357).

por el ozono estratosférico), otra es dispersada en las vecindades del haz y una muy pequeña es la retrodispersada, que regresa al detector [Wolfram et al. 2005].

Del análisis de esa información se deduce la altura de dispersión, y la cantidad de absorción del ozono, con lo cual se determina la cantidad de ozono en la columna investigada [OMM, 1990]. Una técnica refinada capaz de medir perfiles de ozono entre 12 y 45 km, es la de la absorción diferencial (o DIAL, según la sigla en idioma Inglés), en la que se disparan dos pulsos de radiación láser de diferente longitud de onda, una (v. gr., de 308 nm; véase la figura 4) emitida por un excímero de XeCl, que es fuertemente absorbida por el ozono, y otra, denominada de referencia, por la tercera armónica de un láser de Nd:YAG (el medio activo es neodimio y un cristal sintético YAG constituido por óxido de itrio y óxido de aluminio) de 355 nm, que muestra menor absorción por parte del ozono. La radiación retrodispersada (en realidad, fotones) es recibida por telescopios de reflexión (tipo Newton) adaptados para este fin, y entregados a la electrónica asociada para el procesamiento respectivo [Wolfram, Otero et al., 2005] [Wolfram, Salvador et al., 2006][Quel

et al. 2007]. Los perfiles verticales de ozono que se obtienen con estos instrumentos, ofrecen una resolución de alrededor de 750 m a 12 km de altura y de 3,5 km a 45 km de altura.

3.6. Seguimiento Satelital

En la actualidad existen varios satélites en órbitas alrededor del planeta, que incluyen dentro de sus sistemas de mediciones, equipos para la determinación del ozono en una amplia variedad de parámetros. Una gran cantidad de información por ellos obtenida está disponible en la red de internet [NASA, Junio 2009]. En la tabla 1 se presenta un resumen de algunas de las características que se pueden extraer de dicha página, relacionadas con los satélites administrados por NASA, más datos de satélites de otros países, reportados por otras fuentes, que se referencian adelante. Entre los satélites más famosos enviados para desarrollar misiones relacionadas con los fenómenos radiativos en el planeta, están el Nimbus 6 y el Nimbus 7. En realidad se considera que a partir del Nimbus 7 los radiómetros incorporados garantizaban las condiciones de alta estabilidad y de alta precisión esperadas [Liou, 2002]; a este último en particular, se le encomendaron 7 misiones dentro de las cuales se destacan, i-. el experimento de la estimación del presupuesto radiativo del planeta (ERBE, por la sigla en idioma Inglés), ii-. El análisis de la radiación UV en el rango inferior de frecuencias a las de corte por el ozono o SME por Solar Mesosphere Explorer, iii-. El análisis de la radiación UV retrodispersada (o SBUV), iv-. El espectrómetro para elaboración de mapas del ozono total (o TOMS), v-. La irradiancia total. Con las misiones ERBE y SME, entre otros aspectos, se profundizó en la investigación sobre la constante solar y sobre varias bandas del espectro solar ultravioleta; en uno de los diferentes canales abordó, se recogían datos de radiación en el rango entre 300 a 410 nm, mientras que en otro, desde 275 hasta 360 nm. Inicialmente, la misión SME fue diseñada para investigar los procesos mediante los cuales se crea y se destruye el ozono tanto en la mesosfera como en la alta estratosfera del planeta. Con dicha misión se estudia también la absorción del ozono en las bandas desde 188 a 310 nm y de 223 a 340 nm, relacionada la dispersión de [Jense-

TABLA 1. Principales satélites con misión para la vigilancia del Ozono

Satélite/Institución	Variables Atmosféricas Disponibles/instrumentos	Lapso de tiempo de medición	Órbita
Nimbus-7/NASA-Goddard Space Flight Center ^N	Aerosoles, ozono, reflectividad, eritema UV, erradiancia UV, ozono troposférico, SO ₂ de volcanes/TOMS-SBUV	11/1/1978 - 5/6/1993	955 km en órbita sincrónica, con periodo orbital de 104,15 min.
Meteor-3/ NASA-Goddard Space Flight Center ^N	Aerosoles, ozono, reflectividad, eritema UV, erradiancia UV, ozono troposférico, SO ₂ de volcanes/TOMS-SBUV	8/22/1991 - 11/24/1994	Órbita única que presenta problemas para procesamiento de datos
Earth Probe/ NASA-Goddard Space Flight Center ^N	Aerosoles, ozono, reflectividad, eritema UV, erradiancia UV, ozono troposférico, SO ₂ de volcanes/TOMS-SBUV	7/22/1996 - 12/14/2005	
NASA-EOS-AURA/NASA ^N	Aerosoles, ozono, reflectividad, eritema UV, erradiancia UV, ozono troposférico, SO ₂ de volcanes/TOMS-SBUV-OMI (Ozone Monitoring Instrument) Química Atmosférica	10/01/2004 hasta el presente	705 km. Sincrónica-solar cercana a polar
SCISAT-1/Canadian Satellite Mission*	Pérdidas del ozono troposférico Ártico/		
ERS-2/Europa**	Entre otros: Perfiles de ozono hasta la tropósfera	Desde 1995	Órbita polar
ENVISAT/Europa**	Imágenes por espectrómetro de absorción		
ADEOS/Japón***	Gases de efecto invernadero	1996-1997	Sincrónica Solar

nius, 1989]. La misión SBUV se planteó para obtener información de la radiación UV retrodispersada en doce bandas discretas con ancho de banda de 1 nm [Report of a Workshop, 2002]. Con esta misma misión se encontró que la radiación UV entre 200 y 300 nm está modulada por la rotación solar, con cambios de cerca de 3 % en 200 nm y de 1 % en 250 nm. Para longitudes de onda mayores, los cambios por este concepto, son menores [Bhartia, 1984].

Una preocupación fundamental de la comunidad científica ha sido la validación frecuente de los datos recibidos de las diferentes misiones satelitales emprendidas, por lo cual se ha dedicado mucho esfuerzo en buscar la máxima confiabilidad y precisión de la información recibida. Durante el estudio para el procesamiento adecuado de la información recibida de Nimbus-7 se establecieron dos conceptos, cada uno de los cuales es susceptible de mejoramiento o de reprocesamiento, tales conceptos son, **Nivel y Versión**. El concepto de Nivel se refiere al afinamiento de parámetros de localización en tiempo y lugar de los datos; así, por ejemplo, el Nivel 1 tiene que ver con calibración y corrección del tiempo, y con la correlación en la localización de cada dato de las variables climatológicas. El Nivel 2 tiene que ver con la formación y localización de escenas, así como con la calibración coherente de todas las variables.

Por último, el Nivel 3 da cuenta de los promedios de las celdas en una grilla de longitud y latitud. En cuanto a las Versiones, éstas se orientan al mejoramiento del procesamiento que conduzca a la validación y precisión de los resultados de, por ejemplo, el ozono total. Las Versiones 1 a 3 fueron dedicadas al desarrollo del software y sus productos no fueron divulgados [McPeters et al., 1996]. A partir de allí, se reconoce que ha habido tres etapas de mejoramiento (reprocesamiento) de la información, son ellas, la original, denominada Versión 4, las Versiones 5 y 6 de un lado, y las 7 [McPeters et al., 1996] y 8 de otro [Wellemeyer et al., 2005]. El mejoramiento de la información no solo está asociado con el ajuste al tratamiento de las interacciones atmosféricas relacionadas con el ozono, o con la parametrización de las condiciones atmosféricas usadas en los cálculos de transferencia radiativa, sino con la evolución de los sensores e instrumentos a bordo de los satélites; igualmente, se incorporan correcciones lineales para la dependencia en la reflectividad de la longitud de onda, factor que afecta el cálculo del ozono total. Cada vez que se verifica que un algoritmo introduce nuevos elementos para mejorar el procesamiento de la información satelital, se acepta como Versión oficial para uniformizar los archivos de datos. [Wellemeyer et al., 2005]. Desde la época en que liberaron los datos del Nimbus-7, muchos investigadores han comparado la información satelital con la información obtenida en estación terrestre (con espectrofotómetro Dobson, por ejemplo), al comienzo los valores satelitales estaban en promedio 6,6 % por debajo. Sin embargo, pudo demostrarse que existía un sesgo de la información satelital que podía corregirse, y que además sufría un corrimiento anual de 0,05 % anual [McPeters et al., 1996]. La información sobre el ozono, suministrada por la Versión 4 estaba sustentada en coeficientes de absorción medidos en 1959; además, al procesar datos del TOMS y de SBUV, se había identificado el problema relacionado con la reflectividad de la placa difusora del instrumento procesador a bordo del Nimbus-7 [Watson et al., 1988, citado por McPeters et al., 1996], lo que condujo a que se desarrollara el Pair Justification Method (PJM) [Ahmad, Seftor, and Wellemeyer, (1987)][McPeters et al., 1996], que se incorporó a esta Versión. Finalmente, se adoptaron métodos para discernir los efectos del dióxido de azufre (SO_2),

efectos que, generalmente, sesgan el dato del ozono estratosférico total. El método PJM está fundamentado en el hecho de que cuando se utilizan dos diferentes radiaciones UV, i. e., dos longitudes de onda diferentes para la medida del mismo valor del ozono, la discrepancia resultante proviene de la diferencia de sensibilidad por la degradación del instrumento y tal discrepancia se puede usar para corregir la sensibilidad. Refinamientos de este método fueron involucrados en la Versión 5, pero además, en 1984 la International Ozone Commission, incorporó nuevos datos de los coeficientes de absorción, lo cual dio lugar a la Versión 5. Dichos datos estaban soportados en mediciones muy cuidadosas de secciones transversales (eficaces) [Houët y Brogniez, 2004]; también se involucró en esta Versión un modelo para reprocesar defectos instrumentales, relacionados nuevamente con la reflectividad de la placa difusora del instrumento procesador a bordo del Nimbus-7 Tal corrección eliminó otros errores asociados a esta limitación [McPeters et al., 1996]. Las aplicaciones de las correcciones de la Versión 5 se introdujeron en la Versión 6, adicionando también otras correcciones y cálculos de radiancias para los perfiles de temperatura y del ozono, característicos de la época en que ocurre la disminución severa de la capa de ozono en la primavera Antártica. [McPeters et al., 1996] Pero se hizo necesaria la Versión 7, debido a que la validación de los datos obtenidos con la Versión 6 reveló varios problemas; para comenzar, se evidenciaron sesgos sistemáticos entre el ozono total TOMS de la Versión 6 y los del SBUV y los obtenidos por el espectrofotómetro Dobson. Específicamente, los valores TOMS del ozono del hemisferio norte mostraban un corrimiento en el tiempo, comparados con los valores Dobson y que además eran dependientes de la latitud, con diferencias estacionales notorias, acordes con el envejecimiento del TOMS [Wellemeyer et al., 1996]. Los valores actualizados con esta Versión fueron liberados en 1996, así que los siguientes algoritmos tendrían en cuenta los defectos que se evidenciaran desde entonces. Efectivamente, la Versión 8 apunta hacia asuntos que tienen que ver con condiciones extremas como polvo y humos densos, destellos marinos, brillos de las superficies cubiertas de hielo y nieve y mediciones con ángulos cenitales grandes. El algoritmo de esta Versión está fundamentado en la absorción diferencial del

ozono expresado por un par de radiaciones UV muy cercano i.e., de longitudes de onda muy parecidas para minimizar el efecto de la longitud de onda en los errores de modelización. Además, el nuevo algoritmo mejora los valores del ozono total al incluir efectos de los ciclos estacionales, de la dependencia latitudinal y algunos criterios de la nueva climatología; sin embargo, bajo este algoritmo, algunos aspectos no alcanzan a mostrar efectos como la variabilidad interanual y las tendencias de largo plazo. Es de notar que en esta Versión aún persiste alguna dependencia del ozono total con el ángulo cenital satelital a pesar de las correcciones que involucran aerosoles y destellos. En la Versión 8 se utilizó el canal de 331 nm en lugar del de 360 nm como canal de medición de la reflectividad; esto tuvo como efecto que los índices de aerosoles (AI, por la sigla en idioma Inglés) fuesen mayores en esta versión que en la Versión 7 [Wellemeyer et al., 2005]. Los reprocesamientos de esta Versión ya han sido aplicados a las series de datos de los satélites Nimbus-7, Meteor-3 y Earth Probe. Existen varios satélites de otros países e instituciones que realizan misiones especiales (pero no necesariamente a través del rango UV) relacionadas con el ozono, tales como el SCISAT-1/Canadian Satellite Mission, cuyo primer objetivo científico es el estudio de procesos determinantes de la pérdida del ozono estratosférico en el Artico; su instrumento primario es un espectrómetro de alta resolución espectral de transformada de Fourier que opera entre 2,3 y 13,3 m. Dado que su misión es el experimento de Química Atmosférica (ACE, por la sigla en idioma Inglés) con su espectrómetro de transformada de Fourier, se denomina ACE-FTS [Semeniuk et al., 2006]. Otro es el satélite Europeo ERS-2 entre cuyas misiones está la de determinar los perfiles de ozono hasta la troposfera, el cual se halla en órbita polar desde 1995. Alrededor de él se elaboró el programa GOME o Global Ozone Monitoring Experiment. Otro programa es el SCIAMACHY por Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Chartography a bordo del satellite Envisat [Müller et al., 2003]. Finalmente, se menciona el ADEOS de Japón, cuya misión más notoria fue la de medir gases de efecto invernadero durante los años 1996 y 1997, usando sondas de infrarrojo térmico, dentro de cuyas mediciones se incluyó el análisis de la capa de ozono [Coheur et al., 2005].

Las anteriores son las metodologías más importantes que para el abordaje del estudio de la capa de ozono se han utilizado alrededor del mundo. Equipos de investigadores de diferentes partes del mundo se han unido para comparar los resultados de sus investigaciones, notándose la tendencia a realizar estudios por regiones latitudinales, tema que será motivo del siguiente numeral.

4. Regionalización de las investigaciones

El propósito de esta sección es destacar la tendencia en la que diferentes organizaciones e instituciones científicas han desplegado sus laboratorios de tal manera que puedan hacer sus investigaciones, compartir y verificar sus resultados en una regionalización esencialmente por rangos latitudinales, sin perjuicio de que existan simultáneamente otras tendencias o prevalezcan ciertas tradiciones. Por ejemplo, no se puede desconocer que aún, muchos laboratorios trabajan aisladamente, aunque socializan sus resultados por medio de congresos y por diferentes publicaciones en libros, revistas e informes. Es importante resaltar el hecho de que organizaciones como la World Meteorological Organization, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y su Secretaría del Ozono, la NASA, Universidades e Institutos de Investigación alrededor del mundo, así como, Empresas de carácter tecnológico y científico, y los diferentes grupos de evaluación de Protocolos y Fondos Multilaterales, hayan adelantado las tareas que han permitido la consolidación de una comunidad científica tan fuerte en beneficio de la capa de ozono. La mayor parte de los estudios sobre la capa de ozono está fundamentada en la medición de la radiación ultravioleta y en las metodologías que en ella se soportan. Ello es razonable, debido a que si hay detrimento de la capa de ozono, la radiación que genera problemas es la ultravioleta B. Sin embargo, no se puede desconocer que por metodología, también se recurre a otros rangos del espectro electromagnético para el estudio de la capa de ozono. Un hecho de gran importancia es el de que como punto común, casi todos los grupos, proyectos y programas de investigación se acogen a la información satelital, bien como referente, bien como elemento a evaluar y contrastar con sus medi-

ciones terrestres. Dado que históricamente los problemas relacionados con la capa de ozono se detectaron en 1974, los laboratorios con sus proyectos de investigación y las asociaciones entre laboratorios tomó algún tiempo en comenzar a estructurarse. En 1976 el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) organiza y convoca una conferencia en la que participan representantes de varios países, para analizar la respuesta internacional al problema del ozono. En 1978 los compuestos clorofluorocarbonados (CFC) fueron declarados ilegales en los Estados Unidos; otros países como Canadá, Noruega y Suecia siguen el mismo camino. En 1981 el PNUMA acoge la propuesta de realizar un convenio mundial para proteger la capa de ozono. En 1985 un equipo Británico de inspección científica para la Antártica, descubre el “agujero de ozono” y se toma como la primera prueba del agotamiento de la capa de ozono. Finalmente, en 1987 veinticuatro países firman el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan dicha capa [PNUMA, 2008][PNUMA,2006]. El detonante para motivar la conformación de proyectos y programas internacionales de investigación fue la notoria disminución del ozono en las zonas polares y particularmente, la detección del “agujero de ozono” en la Antártica. A continuación se presenta un resumen de las más importantes redes de estaciones terrestres y de Agencias que miden y evalúan la radiación UV alrededor del planeta y que reportan informes al World Ozone and Ultraviolet Data Centre (WOUDC) [Report to OPAG, 2007]. Por el origen y reconocimiento del problema del debilitamiento de la capa de ozono en las regiones polares, las estaciones más destacadas para su estudio se hallan en dichas regiones. Son las zonas polares y de altas latitudes al norte y al sur del planeta. Una de las redes más importante de estaciones es la liderada por la National Science Foundation (NSF) con sus Programas Polares de las Redes de Monitoreo de la Radiación Ultravioleta. En la Tabla 2 se muestran estas Redes [Report to OPAG, 2007][Biospherical, Junio 2009 (<http://www.biospherical.com/nsf/sites.asp>)].

TABLA 2. RED DE ESTACIONES DESPLEGADAS EN ZONAS POLARES. Información tomada de [Biospherical, Junio 2009, (<http://www.biospherical.com/nsf/sites.asp>)

McMurdo, Antártica	77°50'S, 166°40'E	Marzo 1988/Rad. Global, UV
Palmer, Antártica	64°46'S, 64°03'W	Mayo 1988/ Rad. Global, UV
South Pole, Antártica	90°00'S	Febrero 1988/Rad. Global, UV
Ushuaia, Argentina	54°49'S, 68°19'W	Noviembre1988/Rad. Global, UV
San Diego, California*	32°46'N, 117°12'W	Noviembre1992/Rad. Global, UV
Barrow, Alaska	71°19'N, 156°41'W	Diciembre 1990/Rad. Global, UV
Summit, Greenland	72°35'N, 38°27'W	Agosto 2004/Rad. Global, UV

* La estación de San Diego aunque no está ubicada en ninguna de las zonas polares, trabaja conjuntamente dentro de la misma red; de hecho, es uno de los centros de acopio de la información de toda la red.

De otra parte, se debe notar además, que en las medias-altas y altas latitudes norte (aproximadamente, entre los 50 y 70°), existen laboratorios y redes bien estructuradas y financiadas como la Canadian Brewer Spectroradiometer Network en la cual también se mide radiación UV y dedican grandes esfuerzos para la calibración de instrumentos [Report to OPAG, 2007]. Por el lado sur, en sus grandes latitudes, Argentina (también en latitudes, comúnmente por encima de 50°S) dispone de laboratorios, algunos con una larga tradición científica en la vigilancia del ozono y de la medición de la radiación ultravioleta. En sus latitudes medias (de 25 a 50°S) dispone también de varios laboratorios en los que desde 1995 y aún con restricciones presupuestales, se han ido afianzando grupos y proyectos de investigación sobre este campo. Es importante puntualizar que en su zona norte y sobre la región andina ha desarrollado proyectos de medición de la radiación ultravioleta. En Argentina la entidad encargada de la calibración de instrumentos de la red nacional es el Grupo de Radiación Solar y Física Atmosférica de la Universidad Nacional de Rosario [Report to OPAG, 2007]. Al otro lado (lado oeste), de la cordillera de los Andes, Chile posee una extensa red de estaciones de medición de la radiación ultravioleta, dentro del rango de las latitudes medias al sur, que se extiende desde los 18°S hasta los 63°S. En Chile la actividad de calibración se desarrolla, al menos cada dos años en Valdivia. Los instrumentos

GUV-511, son calibrados cada año con un patrón enviado por el fabricante [Report to OPAG, 2007]. Por su conformación geográfica, Chile abarca una variada gama de latitudes sobre casi la misma longitud. En las latitudes medias se encuentran las redes, tal vez más organizadas, estructuradas, financiadas, coordinadas y dotadas del mundo. Son las redes desplegadas en todo el territorio de los Estados Unidos de América para la medición de la radiación ultravioleta. Además de las grandes facilidades de acceder a la información satelital actualizada, disponen de redes de medición a nivel de superficie, entre las que se destacan las siguientes: 1-. Redes de banda ancha; 2-. Redes de medidas de banda estrecha con filtro (aquí se incluye la red de la National Science Foundation); 3-. Redes de medidas espectralradiométricas. 4-. Las actividades de calibración están lideradas por la Central Ultraviolet Calibration Facility (CUCF) localizada en el Centro de Investigación David Skaggs de la NOAA en Boulder, Colorado. Además, han establecido el Programa de Investigación y Monitoreo de la Radiación UV-B, que a través de NOAA-CUCF calibra mediante lámparas halógenas diferentes equipos de las redes, bajo diferentes parámetros y condiciones [Report to OPAG, 2007]. Una región importante en redes de medición de la radiación UV, es Europa que latitudinalmente, se halla entre 30 y 70°N. Algunos países como Noruega han desplegado estaciones en latitudes de 80°N. En Europa se han realizado varios proyectos de observación relacionados con la radiación UV. Uno de ellos es la Base de Datos Europea para la Evaluación y la Climatología Ultravioleta (EDUCE), financiada completamente por la Unión Europea en 2003. Uno de los objetivos es auditar el desarrollo de proyectos para mejorar las mediciones en diferentes lugares de la región. Otro proyecto, es el COST726, denominado Cambios de Largo Plazo y Climatología de UV Sobre Europa, (Long term changes and climatology of UV radiation over Europe) que debe realizarse entre 2004 y 2009. Inicialmente se programó para obtener un registro histórico de la radiación UV y su modelamiento; sin embargo, todos los esfuerzos se han orientado a mejorar la calidad de los radiómetros UV de banda ancha, para uniformizar todos los procesos de medición y evaluación de las estaciones adscritas al programa. Allí han fijado especial cuidado en la calibración y

en la respuesta espectral. Se realizan campañas de intercomparación para lograr homogeneidad de la instrumentación [Report to OPAG, 2007]. Se estructuró el Centro Europeo de Referencia para las medidas de la Radiación UV (ECUV, por su sigla en idioma Inglés) del Joint Research Center (JRC) de la Comisión Europea, con varias dotaciones y estrategias para una efectiva prestación de servicios [Los and Gröbner, 2005] [Schreder et al., 2004]. Por el lado oriental del planeta, se resaltarán aquí las redes meteorológicas de Japón, que están desplegadas entre los 25 y los 45°N aproximadamente, y que cobijan alrededor de 25 estaciones con diversos equipos radiométricos y espectralradiométricos. Las decisiones sobre la política de investigación ambiental están regidas por el Ministry of the Environment (MOE) y por la Japan Meteorological Agency (JMA). Han centrado su interés en el monitoreo del ozono atmosférico, de los constituyentes atmosféricos y en las mediciones terrestres de UV-A y UV-B. Desde 1990 el MOE ha promocionado la cooperación entre institutos nacionales y universidades a través del Global Environmet Research Fund (GERF). El MOE también ha financiado el programa para el monitoreo de los cambios ambientales globales de largo plazo del National Institute for Environmental Studies (NIES) en el Center for Global Environmental Reseach (CGER). La Oficina de Monitoreo de la Capa de Ozono del JMA coordina las observaciones, monitoreo, y procesamiento de datos del ozono atmosférico y de la radiación UV-B [Report to OPAG, 2007]. En cuanto a las zonas intertropicales (comprendidas entre 25°S y 25°N, aproximadamente) se detectan esfuerzos aislados y a veces esporádicos de algunas universidades o de institutos de investigación gubernamentales en hacer seguimiento a la capa de ozono. Ello puede ser el resultado de que la capa de ozono estratosférico en estas latitudes es más o menos estable. Sin embargo, países como Australia, cuya mayor extensión se halla en la zona tropical del hemisferio sur, posee muchas estaciones de monitoreo de la radiación UV con el propósito de adelantar estudios relacionados con los efectos sobre la salud humana. Con base en sus estudios han desarrollado estándares protectores en la ropa y en las gafas para el sol [Report to OPAG, 2007]. Entre los esfuerzos aislados y esporádicos que se realizan en estas latitudes puede

mencionarse los realizados en Perú en el Observatorio de Huancayo (zona de alta montaña), sobre la capa de ozono [Suárez, 2000] y en Panamá, a nivel del mar, en donde disponen de una infraestructura notable con proyectos de mejorarla para desarrollar investigaciones [Report to OPAG, 2007]. En Colombia también se hacen esfuerzos esporádicos en este campo: a través de la Unidad de Planeamiento Minero-Energético (UPME) y en asociación con el Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM) ha elaborado el Atlas de Radiación de Colombia, usando los datos de sus redes de estaciones [UPME-IDEAM, 2005]. Grupos de científicos, no necesariamente asociados a institutos de investigación de las regiones tropicales, han desarrollado investigaciones aisladas sobre aspectos de la capa de ozono de estas regiones. Es de destacar el hecho de que con base en información satelital se han realizado estudios para observar el efecto que eventos climatológicos pueden tener sobre la capa de ozono, en particular sobre el ozono troposférico. Así, por ejemplo, se ha estudiado la variabilidad del ozono en la atmósfera baja por efecto de los fenómenos del Niño y de la Niña, encontrándose que, efectivamente, la columna de ozono troposférico presenta alteraciones en escalas de tiempo interanuales, significativas especialmente en Indonesia, que está ubicada en la zona ecuatorial sobre el Pacífico occidental [Ziemke and Chandra, 2003]. Se han realizado otros proyectos con grupos de investigación numerosos, que involucran varias estaciones de las zonas tropicales del hemisferio sur alrededor del planeta, es importante destacar el realizado por Thompson y sus 15 científicos asociados (2003) en el cual intercomparan las mediciones realizadas con ozonosondeos en 12 estaciones y las contrastan con las mediciones satelitales. Como resultados de este proyecto se muestran las conclusiones sobre los alcances en la exactitud de los ozonosondeos y los cuidados a tener en cuenta para lograr la homogeneidad en proyectos que utilizan estas metodologías [Thompson et al., 2003].

5. A manera de Conclusiones y un Atisbo Hacia el Futuro

En el gran conjunto de desafíos que la humanidad ha tenido que enfrentar, el del debilitamiento de la capa de ozono es uno de los más ricos en enseñanzas e ilustrativo de curiosas coincidencias:

1. En la segunda década del siglo XX, apareció una solución al problema de la conservación de alimentos, el cual tenía que ver con comodidad y con salud pública. En palabras de Carl Sagan, [Sagan, 2000 (obra póstuma)],

Todo se hizo de manera responsable, cuidadosamente, pensando en el medio ambiente. Hacia la década de los años veinte la gente creía que los frigoríficos eran algo bueno., pero ocurría que el fluido operante, cuyo calentamiento y posterior enfriamiento provocaban la refrigeración, tenía que ser amoníaco o dióxido de azufre, gases venenosos y malolientes. Un escape resultaba horrible. Se requería un sustituto. Así, químicos estadounidenses y alemanes inventaron un tipo de moléculas inexistentes hasta entonces. Los llamaron clorofluorocarbonos (CFC)... .

2. Casi simultáneamente, y sin conocer el problema que se estaba gestando con los refrigeradores, científicos como Fabry, Buisson y Dobson, entre otros, [Fabry, Buisson, 1921] estaban comenzando sus célebres y afortunados estudios sobre la capa de ozono. Sus estudios dieron lugar a la mayor parte de las metodologías que a nivel terrestre se aplican hoy en día para el estudio de la capa de ozono. Pero además, fueron el inicio de una de las comunidades científicas más numerosas y decididas que se haya formado, especialmente, a partir del último cuarto del siglo XX. De cara al siglo XXI, los desafíos son muy grandes en cuanto a los retos que hay que superar para lograr la salvaguarda de la capa de ozono y del Sistema Climático Global. Dado que la tecnología requiere cada día de nuevos materiales y sustancias, los científicos defensores del ambiente deben estar atentos para que hacia el año 2040, ni los CFC, ni las sustancias de segunda generación o HCFC, ni ninguna otra de las nuevas sustancias que puedan afectar la capa de ozono, estén siendo emitidas al ambiente. Esto forma parte del reto definido por PNUMA de que para los años 2050 a 2075, la capa de ozono vuelva a los niveles que tenía antes de 1980 [PNUMA, 2006]. Según WMO CEOS en su Informe sobre el

Ozono [WMO, 2001], para cumplir el anterior cometido se establecen unas tendencias mínimas que deberían ser logradas; así, por ejemplo, para volver a los niveles de ozono troposférico la tendencia debería ser de aumentos de 5 % decadales, para el ozono estratosférico, aumentos de 3 % decadales, y de 1 % decadal, para la columna total de ozono. Para poder detectar estas tendencias, se requiere conjuntos y series de datos con estabilidades de 1/5 de los valores anteriores, esto es, 1 % decadal para el ozono troposférico, 0,6 % decadal para el ozono estratosférico y 0,2 % decadal para la columna total de ozono. Lo anterior debe garantizarse con mediciones de niveles de exactitud superiores a 3 % en la columna total de ozono, a 5 % en el ozono estratosférico y a 10 % en el ozono troposférico.

3. Pocas comunidades científicas, como la ligada a la capa de ozono, son conscientes de la necesidad de homogenización de series de datos, de universalización de procedimientos ligados a las metodologías, y sobre todo, de la debida calibración de instrumentos. Debido a la amplia gama de instrumentos desarrollados en las diferentes regiones del planeta, la deseada universalización es complicada, pero al mismo tiempo, ese hecho se convierte en una fortaleza para los datos mismos, ya que, si por diferentes metodologías y tecnologías de medición, se logra llegar a los mismos valores, avalados por buenos patrones universales, la confiabilidad es mayor. En este sentido, los proyectos de la Unión Europea [Report to OPAG, 2007] son una estrategia a tener en cuenta.
4. Por la trascendencia y las posibles consecuencias sobre amplios sectores de poblaciones humanas, es importante estimular las investigaciones sobre los niveles de radiación UV en zonas de alta montaña y de regiones tropicales. Si bien, diferentes mediciones han verificado que la capa de ozono muestra gran estabilidad en las regiones ecuatoriales, también ha resultado evidente que son los menores niveles normales de todo el planeta, lo cual implica, los mayores niveles de radiación UV en zonas habitadas por el hombre [Suárez, 2000]. Esta

consideración sugiere la necesidad de conformar grupos de investigación y comunidad científica en estas regiones. Un tema que no debería pasar desapercibido en los estudios para estas localidades, es la variabilidad de la radiación UV en función del ciclo solar [Chacón, 1995]. La condición de alta nubosidad en la zona de confluencia intertropical, es un factor que genera frecuentes eventos de “entubamiento” de la radiación solar, que conduce a que en ocasiones se superen los valores de la constante solar; en dichos eventos, qué valores y con qué frecuencia se logran determinados valores de radiación UV?

Referencias

- [1] Ahmad, Z., Seftor, C., and Wellemeyer, C. (1987), A New Method for Monitoring Long Term Calibration of the SBUV and TOMS Instruments. Huges STX Corporation-NASA
- [2] Alonso, M., Finn, E. J. (1968), Fundamental University Physics, III, Quantum and Statistical Physics, N.Y., Addison-Wesley Series.
- [3] Allen D.J., Nogues S., Baker N.R. (1998). Ozone depletion and increased UV B radiation: is there a real threat to photosynthesis? J. Exp. Biol., 49, 1775.
- [4] Berger, D., Morys, M. UV-Biometer - A Broad-band Instrument Complementing Ozone Measurements with Ground Based UV Exposure. Presented at the Quadrennial Ozone Symposium, Charlottesville, Virginia, USA, 4-13. June 1992.
- [5] Bernhard, G., Booth, C. R., Ehramjian, J. C. (2004). Real-time UV and column ozone from multi-channel UV radiometers deployed in the National Science Foundation's UV monitoring network. Biospherical Instruments Inc. San Diego.
- [6] Bhartia, P.K., Silberstein, D., Monosmith, B., Fleig, A .J. Standard profiles of ozone from ground to 60 km obtained

- by combining satellite and ground based measurements Atmospheric ozone. (1984). Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium, Halkidiki, Greece; pp.243-247.
- [7] Brasseur, G., Simon, P. C. (1981). Stratospheric chemical and thermal response to long-term variability in solar UV irradiance *J. Geophys. Res.* 86: 7343-7362.
- [8] Carsten, L., Dameris, M., Müller, R. and Riesel, M. (2006). *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15820
- [9] Chacón, C. A., (1998). Estimación de la Columna Total de Ozono en la Banda de Absorción de 9,6 mm para una Atmósfera Tropical. Tesis de Magister en Física Universidad Nacional de Colombia.
- [10] Chance, K.V., Burrows, J. P., Perner, D., Schneider, W. (1997). Satellite Measurements of Atmospheric Ozone Profiles, Including Tropospheric Ozone, from Ultraviolet/Visible Measurements in the Nadir Geometry: A Potential Method to Retrieve Tropospheric Ozone. *J. Quant. Spectrosc. Transfer.* Vol57, No.4, pp467-476.
- [11] Clemens.. Pausz, Gerhard J. Herndl. (1999). Role of ultraviolet radiation on phytoplankton extracellular release and its subsequent utilization by marine bacterioplankton. *Aquat. Microb. Ecol.* Vol 18: 85-93.
- [12] Coheur, P.F., Barret, B., Turquety, S., Hurtmans, D., Hadji-Lazaro, J., and Clerbaux, C. (2005). Retrieval and characterization of ozone vertical profiles from a thermal infrared nadir sounder. *J. Geophys. Res.*, 110, D24303.
- [13] Dobson, G.M.B. Handbook for the Ozone Spectrophotometer. *Ann. Int. Geophys. Year*, 1957. Pergamon Press, Inc.
- [14] Fabry, C., Buisson, H. (1921). A Study of the Ultra-violet End of the Solar Spectrum. *Astrophysical Journal*. Vol. LIV,5,297-323.

- [15] Farman, J. Cap. 7-. Halocarbons, the ozone layer and the precautionary principle. From: Late Lessons From early warnings: the precautionary principle 1896-2000. (2003).
- [16] Fioletov, V. E., Kerr, J.B., McElroy, C.T., Wardle, D.I., Savastiouk, V., Grajnar, T.S, (2005). The Brewer Reference Triad. *Geophys. Res. Lett.*, 32,L20805
- [17] Fioletov, V.E. (2008). Ozone climatology, trends, and substances that control ozone. *Atmosphere-Ocean*, 46: 39-67.
- [18] Goody, R. M. (1964), *Atmospheric Radiation*, Oxford, The Clarendon Press.
- [19] Goody, R. M., Walker, J. C. G. (1975), *Las atmósferas*, Barcelona, Ediciones Omega.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change/Technology and Economic Assessment Panel (IPCC/TEAP) special report on safeguarding the ozone layer and the global climate sistem. 2005.
- [21] Houët, M., Brogniez, C. (2004). Ozone column retrieval from solar UV irradiance measurements at ground level: Sensitivity tests and uncertainty estimation. *J. Geophys. Res.*, 109, D15302
- [22] Instrumentación 1. Consejería de Medio Ambiente Junta de Andalucía. (2009). Espectrofotómetro Dobson.
- [23] Instrumentación 2. Consejería de Medio Ambiente Junta de Andalucía. (2009). Espectrofotómetro Brewer Mk III.
- [24] Jensenius, J., (1989), *Insolation Forecasting*. Chapter 7, *Solar Resources*. Edited by R.L. Hulstrom.
- [25] Jin, J.J., Semeniuk, K., Manney, G.L., Jonsson, A.I., Beagley, S.R., McConnell, J.C., Dufour, G., Nassar, R., Boone, C.D., Walker, K.A., Bernath, P.F. and Rinsland, C.P. (2006). Severe Artic ozone loss in the winter 2004/2005: observations from ACE-FTS. *Geophys. Res. Lett.*, 33,L15801.

- [26] Kerr, J. B. (2002). New Methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra. *J. Geophys. Res.*, 107(D23), 4731.
- [27] Komhyr, W. D. (1980). Operations Handbook - Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer. Prepared for the World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project. Revised September, 2006 by Robert Evans. NOAA/ESRL Global Monitoring Division.
- [28] Laatz, A.T.J., Aben, I., Roelofs, G.J. (2005). A model perspective on total tropospheric O₃ column variability and implications for satellite observations. *J. Geophys. Res.* vol. 110, d13303.
- [29] Lamsal, L. N., Weber, M., Tellmann, S., Burrows, J.P. (2004). Ozone column classified climatology of ozone and temperature profiles based on ozonesonde and satellite data. *J. Geophys. Res.*, 109, D20304.
- [30] Liou, K. N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press. Elsevier.
- [31] Los, A. and Gröbner, J. (2005). An Assessment of the UV Broad Band Filter Radiometer Measurement Accuracy. Kipp & Zonen and PMOD/WRC.
- [32] McConnell, J. C., Jin, J. J. (2008). Stratospheric Ozone Chemistry. *Atmosphere-Ocean* 46 (1) 2008, 69-92.
- [33] McPeters, R. D., Bhartia, P.K., Krueger, A.J., Herman, J.R., Schlesinger, B.M., Wellemeyer, C.G., Seftor, C.J., Jaross, G., Taylor, S.L., Swissler, T., Torres, O., Labow, G., Byerly, W., Cebula, R.P. (1996). *Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*. NASA Reference Publication. Scientific and Technical Information Branch.
- [34] Mie, G. A. F.W. (1908) *Annalen der Physik*. 25, 3, 377-445.

- [35] Molina, M. J., and F. S. Rowland. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone, *Nature*, 249, 820-812.
- [36] Montzka, S. A., et al. (1996). Decline in the Tropospheric Abundance of Halogen for Halocarbons: Implications for Stratospheric Ozone Depletion. *Science*, 272, 1318-1322.
- [37] Morys, M., Mims III, F., Hagerup, S., Anderson, S. E., Baker, A., Kia, J., Walkup, T. (2001). Design, calibration, and performance of MICROTOPS II handheld ozone monitor and Sun photometer. *J. Geophys. R.* 106,(D13),14573-14582.
- [38] Murad, A.C., Tabocchini, H.L. (1976). Variaciones del espesor de la ozonósfera sobre Buenos Aires y su relación con las condiciones meteorológicasde la trposfera y la estratosfera. *Fuerza Aérea Argentina. Servicio Meteorológico Nacional. Buenos Aires.*
- [39] Müller, M.D., Kaifel, A.K., Weber, M., Tellmann, S., Burrows, J.P. and Loyola, D. (2003). Ozone profile retrieval from Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) data using a neural network approach (Neural Network Ozone Retrieval System (NNORSY)). *J. Geophys. Res.*, 108(D16), 4497.
- [40] OMM. Organización Meteorológica Mundial. 1994. *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos.*
- [41] Pausz, C., Herndl, G. J. (1999). Role of Ultraviolet Radiation on Phytoplankton Extracellular Release and its Subsequent Utilization by Marine Bacterioplankton. *Aquat. Microb. Ecol.* 18: 85-93.
- [42] Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), (2008). *Protección del ozono estratotosférico. Informe sobre los adelantos logrados 1987-2007. Sec. Ozone. N. U.*
- [43] PNUMA. (2006). *Manual del Protocolo de Montreal Relativo a Sustancias que Agotan la Capa de Ozono. Secretaría del Ozono Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.*

- [44] PNUMA. (2006), Logros en la Protección del Ozono Estratosférico. Informe sobre los adelantos logrados entre 1987 y 2007, Secretaría del Ozono Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- [45] Quel, E., Wolfram, E., Salvador, J., Otero, L., Pallotta1, J., DÉlia, R., Godin-Beckmann, S., Pazmiño, A., Nakane, H., Ono, M., Mizuno, A., Nagahama, T. (2007), SOLAR Project: stratospheric ozone monitoring at Argentina subpolar region. (www.division-lidar.com.ar)
- [46] Randel, W. J., Wu, F. (2006). A stratospheric ozone profile data set for 1979-2005: variability, trends, and comparisons with column ozone data. Nat. Cent. Atm. Res. Boulder, Co.
- [47] Redondas, A., Cuevas, E., Sancho J. M. (1996). Investigación y Medida del Ozono Estratosférico y la Radiación Ultravioleta e el Laboratorio de Vigilancia Atmosférica de Izaña. Física de la Tierra No. 9, 29-66.
- [48] Report of a Workshop Organized by National Institute of Standards and Technology; National Polar-orbiting Operational; Environmental Satellite System-Integrated; Program Office; National Oceanic and Space Administration; National Aeronautics and Space Administration, At the University of Maryland Inn and Conference Center, College Park, MD, November 12-14, (2002), Satellite Instrument Calibration for Measuring Global Climate Change, edited by, George Ohring, NOAA/NESDIS (Consultant), Camp Springs, MD; Bruce Wielicki, NASA; Langley Research Center, Hampton, VA; Roy Spencer, NASA Marshall Space Flight; Center, Huntsville, AL; Bill Emery, University of Colorado, Boulder, CO; Raju Datla, NIST, Gaithersburg, M.D.
- [49] Report to the Commission on Instruments and Methods of Observation OPAG on Surface Observation Technology (OPAG-Surface), (2007), Expert Team on Meteorological Radiation and Atmospheric Composition Measurements On Ultra-Violet Radiation Measurements.

- [50] Sagan, C. (2000), *Billions and Billions*. Obra póstuma. Título en Español: *Miles de Millones*, España, Biblioteca de Bolsillo.
- [51] Salvador, J., Wolfram, E., Pedroni, J., Rosales, A., Tocho, J., Quel, E. (2007), *Reconstrucción de espectros de irradiancia solar global UV a partir de mediciones con radiómetro de banda angosta*. *Anales AFA*. Vol 19, 267-270
- [52] Schreder, J., Gröbner, J., Los, A., Blumthaler, M. (2004). Intercomparison of monochromatic source facilities for the determination of the relative spectral response of erythral broadband filter radiometers. *Optics Letters*, vol29, No. 13,1455.
- [53] Solar Light Co. Inc. (2006), *UV-Biometer Manual mod. 501*. Philadelphia, USA.
- [54] Solomon, S., Portmann, R. W., Sasaki, T., Hofmann, J., Thompson, D. W. J. (2005). Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica. *J. Geophys. R.* 110, D21311
- [55] Solomon, S., (1999). Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. *Reviews of Geophysics*, 37, 3 / (August 1999) pages 275-316
- [56] Staehelin, J., Kerr, J., Evans, R., Vanicek, K. Comparison of total ozone measurements of Dobson and Brewer spectrophotometers and recommended transfer functions. *WMO/GAW*. No. 149. (2003).
- [57] Stolarski, R. S., Frith, S. M., (2006). Search for evidence of trend slow-down in the long-term TOMS/SBUV total ozone data record: the importance of instrument drift uncertainty. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4057-4065.
- [58] Strong, K., Bailak, G., Bartons, D., Bassford, M.R., Blatherwick, R.D., Brown, S., Chartrand, D., Davies, J., James, R., Drummond, R., Fogal, P.F., Forsberg, E., Hall, R., Jofre, A., Kaminski, J., Kosters, J., Laurin, C., McConnell, J.C., McElroy, C.T., McLinden, C.A., Melo, S.M.L., Menzies, K., Midwinters, C., Murcray, F.J., Nowlan, C., Olson, R.J., Quine, B.M.,

- Rochon, Y., Savastiouk, V., Solheim, B., Sommerfeldt, D., Ullberg, A., Werchohlad, S., Wu, H. and Wunch, D. MANTRA - A Balloon Mission to Study the Odd-Nitrogen Budget of the Stratosphere. (2005). *Atmosphere-Ocean* 43 (4) 283-299
- [59] Suárez, L. F. (2000). El Estudio de la Capa de Ozono en el Observatorio de Huancayo. *Revista de Trabajos de Investigación*. Lima, Perú. pp 15-22.
- [60] Thompson, A. M., Witte, J.C., McPeters, R. D., Oltmans, S.J., Schmidlin, F. J., Logan J.A., Fujiwara, M., Kirchhoff, V.W.J.H., Posny, F., Coetzee, G.J.R., Hoegger, B., Kawakami, S., Ogawa, T., Johnson, B.J., Vömel, H., Labow, G. (2003). Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) 1998-2000 tropical ozone climatology. 1. Comparison with Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) and ground-based measurements. *J. Geophys. Res.*, 108(D2), 8238.
- [61] UPME-IDEAM. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*.
- [62] Vaisala. (1996). *Ozonesonde User's Guide*. Technical Description.
- [63] Wellemeyer, C.G., Taylor, S.L., Jaross, G., DeLand, M.T., Seftor, C.J., Labow, G., Swissler, T.J., and Cebula, R.P. (1996). Final Report on Nimbus-7 TOMS. Versio 7 Calibration. Contract NAS5-31755.
- [64] Wellemeyer, C.G., Bhartia, P.K., Taylor, S.L., Qin, W., Ahn, C. (2005). Version 8 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Algorithm. Science Systems and Applications Inc., 10210 Greenbelt Road, Lanham, Maryland, USA NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA.
- [65] Wild, O., Sudent, J. K., Prather, M. J., Isaksen, I. S.A., Akiyoto, H., Browell, E.V., Oltmans, S.J. (2003). Chemical transport model ozone simulations for spring 2001 over the western Pacific: Comparisons with TRACE-P lidar, ozonsondes, and Total Ozone Mapping Spectrometer columns. *J. Geophys. Res.* 108(D21),8826.

- [66] WMO-CEOS. (World Meteorological Organization) Report on Ozone. (2001). Citado por ref. 51. Confirmados por IPCC/TEAP Spetial Report on Safeguarding the ozone layer and the Global Climatic System: Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. (2004).
- [67] World Meteorological Organization/Global Atmospheric Watch, No.149. (2003). Comparison of total ozone measurements of Dobson and Brewer Spectrophotometers and recommended transfer functions.
- [68] Wolfram, E. A., Salvador, J., Pallotta, J., D´Elia, R., Pazmiño, A., Godin-Beeckmann, S., Quel, E. (2006). Monitoreo de perfiles de ozono estratosféricos. Anales AFA. Vol 18,321-326
- [69] Wolfram, E., Otero, L., Salvador, J., D´Elia, R., Pallotta1, J., Dworniczak, J.C., Vilar, O., Porteneuve, J., Godin-Beeckmann, S., Nakane, H., Quel, E. (2005). Sistemas lidar en la campaña SOLAR. Anales AFA. Vol 17,353-357.
- [70] Yavorsky B.M., Detlaf A.A. (1972), Manual de Física. Editorial MIR. Moscú.
- [71] Ziemke, J.R., and Chandra, S. (2003). La Niña y el Niño- Induced variabilities of ozone in the tropical lower atmosphere during 1970-2001. Geos. Res. Lett., 30(3), 1142.
- [72] NASA, (Junio 2009). (<http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone.html>)
- [73] Biospherical, (Junio 2009). (<http://www.biospherical.com/nsf>)