

INFLUENCIA DE LA NUBOSIDAD EN LA ATENUACIÓN DE RADIACIÓN UV EN SITUACIONES DE TRANSPORTE DE MASAS DE BAJO OZONO EN LATITUDES MEDIAS

Lusi, Anabela^{1,2}; Orte, Facundo²; Carmona, Facundo^{2,3}; Wolfram, Elian^{1,4} y Rivas, Raúl²

1: UNIDEF-CEILAP (MINDEF-CONICET)
Juan Bautista de La Salle 4397 – (B1603ALO) Villa Martelli
e-mail: anabelalusi@gmail.com; pfacundo.orte@gmail.com; ewolfram@gmail.com

2: Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA)
Paraje Arroyo Seco, Campus Universitario – (B7000) Tandil
e-mail: facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar

3: Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnica (CONICET)

4: Facultad Regional Buenos Aires – Universidad Tecnológica Nacional (UTN)
Medrano 951 – (C1041AAJ) Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Resumen. *Durante la primavera de los años '80, se detectaron evidencias claras del adelgazamiento de la capa de ozono sobre la Antártida. Este cambio sin precedente en la columna total de ozono incentivó una gran cantidad de investigaciones sobre la química y dinámica de la atmósfera. En el presente trabajo se estudian eventos de transporte de masas de bajo ozono hacia latitudes medias y el efecto que generan los mismos sobre la radiación solar ultravioleta (UV). Se analiza el impacto en superficie teniendo en cuenta la influencia de la nubosidad a través de la comparación del Índice Ultravioleta (IUV) calculado para diferentes condiciones. Para ello, se utilizaron mediciones de satélite (OMI, CERES), y un modelo paramétrico que se aplicó en 4 sitios de Argentina a diferentes latitudes (Río Gallegos ~51°S, Comodoro Rivadavia ~45°S, Trelew ~43°S y Buenos Aires ~34°S). Se identificaron 23 situaciones de transporte de masas de bajo ozono y se determinó un impacto potencial de las mismas sobre la radiación solar en superficie de 40%, 26%, 24% y 14% para Río Gallegos, Comodoro Rivadavia, Trelew y Buenos Aires respectivamente. Por otro lado, se determinó la importancia de la cobertura nubosa en la atenuación de los efectos sobre la radiación solar UV en superficie, disminuyendo en un 38% los valores para la mayor latitud estudiada (~51°S).*

Palabras clave: Ozono, IUV, OMI, CERES

1. INTRODUCCIÓN

El ozono (O_3) tiene su máxima concentración en la estratosfera (15 a ~30 km) donde actúa como protector solar natural para el planeta, absorbiendo la radiación ultravioleta del Sol antes de que pueda alcanzar la superficie de la Tierra. Esta absorción se realiza a través de una serie de ciclos naturales de formación y destrucción del O_3 .

Sin embargo, en la década del '80 en la Antártida se reportaron registros de niveles muy bajos de O_3 con disminuciones de más de 50% durante la primavera (Farman, 1985). Este fenómeno, conocido como de 'agujero de ozono' se ha seguido registrando regularmente cada primavera sobre la Antártida hasta la actualidad, a causa de la contaminación antropogénica por diferentes compuestos que fueron emitidos a la atmósfera. Los mismos se conocen con el nombre de clorofluorocarbonos (CFC's) y sus aplicaciones son múltiples; como propulsores en aerosoles, refrigerantes, en la fabricación de recipientes desechables, etc (Monatersky, 1988).

Llevar registros del comportamiento de la capa de O_3 es importante ya que su agotamiento conduce a un aumento de la radiación UV sobre la superficie debido a que es un absorbente eficaz de la misma, entre otros impactos naturales. La radiación UV es la más energética que alcanza la superficie terrestre y su intensidad puede expresarse a través del Índice Ultravioleta (IUV):

$$IUV = (40 m^2 W^{-1}) \int B(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Donde $I(\lambda)$ es la irradiancia espectral solar expresada en ($W m^{-2} nm^{-1}$) en la superficie de la Tierra, $B(\lambda)$ es el espectro de acción de McKinlay y Diffey (McKinley, 1987) para la inducción del eritema en los seres humanos, y λ la longitud de onda (Madronich, 2007). Un espectro de acción define la eficacia relativa de las diferentes longitudes de onda en la generación de una respuesta biológica particular, en este caso la inducción a eritema en seres humanos. Los valores del IUV se dividen en categorías de exposición, y se recomiendan como un método para informar al público acerca de los posibles efectos perjudiciales para la salud de la exposición a la radiación UV y para alertar a la gente de la necesidad de adoptar medidas de protección (Karel Venicek, 1999) (Sivasakthivel, 2011). Por lo tanto, es de suma importancia estudiar la dinámica y química del O_3 y adoptar medidas preventivas para controlar equitativamente el total de emisiones mundiales de las sustancias que lo agotan.

Por otra parte se debe tener en cuenta que la variabilidad del O_3 no es el factor determinante que afecta a la radiación UV recibida en superficie. También se debe considerar el ángulo incidente de la radiación proveniente del Sol, conocido como ángulo cenital solar (sza) y la variabilidad de la cobertura de nubes. La importancia de este último se ilustra de manera clara por los resultados de una red de sensores UV eritémicos que cubren una amplia gama de latitudes en Argentina (Cede, 2002) y de análisis globales basados en datos de satélite (McKenzie, 2003).

En este estudio se utilizaron medidas de diferentes misiones satelitales. Por un lado, la Columna Total de Ozono (CTO) diaria para cada ciudad se obtuvo del Ozone Monitoring Instrument (OMI) a bordo del satélite Aura de la NASA. Por otra parte, el instrumento CERES a bordo de los satélites Terra + Aqua proporcionó información sobre el IUV con

datos diarios cada 3 h.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan los procedimientos necesarios para determinar el transporte de masas pobres en O_3 y el impacto en la radiación UV. Se realiza una descripción del sitio a estudiar, la información satelital de interés para el análisis y los criterios establecidos para determinar los eventos de bajo O_3 . Además, se describe el procedimiento para la obtención del IUV en condiciones de cielo despejado y cómo determinar la influencia que tiene la nubosidad en el estudio. La sección 3 introduce los resultados, dando a conocer los eventos de transporte de bajo O_3 , la relación entre el O_3 y el IUV, y presentando la influencia de la nubosidad a partir de la comparación del IUV calculado para diferentes condiciones. Finalmente, la sección 4 resume la conclusión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar el transporte de O_3 bajo hacia latitudes medias y el impacto en la radiación UV se analizaron bases de datos satelitales de Columna Total de Ozono (CTO) y de IUV en 4 sitios de Argentina ubicados a diferentes latitudes. Por otro lado, se determinó un criterio particular para definir un evento de transporte de bajo O_3 y se calculó el IUV para condiciones de cielo despejado por medio de un modelo paramétrico. A través de los resultados obtenidos, se estimó la nubosidad y el rol que presenta en la atenuación de la radiación.

2.1. Descripción del sitio: latitudes medias y altas de Argentina

Se obtuvieron mediciones de la CTO en diferentes latitudes de Argentina. Los datos fueron previstos por información satelital para las ciudades de Río Gallegos ($51^{\circ}38'S$ $69^{\circ}14'O$), Comodoro Rivadavia ($45^{\circ}52'S$ $67^{\circ}30'O$), Trelew ($43^{\circ}15'12''S$ $65^{\circ}18'34''O$) y Buenos Aires ($34^{\circ}35'59''S$ $58^{\circ}22'55''O$) (ver Fig. 1). Dado que la causalidad de este estudio es la aparición del agujero de O_3 , las mediciones de la CTO se adquirieron para los meses de septiembre a diciembre en un periodo de 11 años (2005-2015).

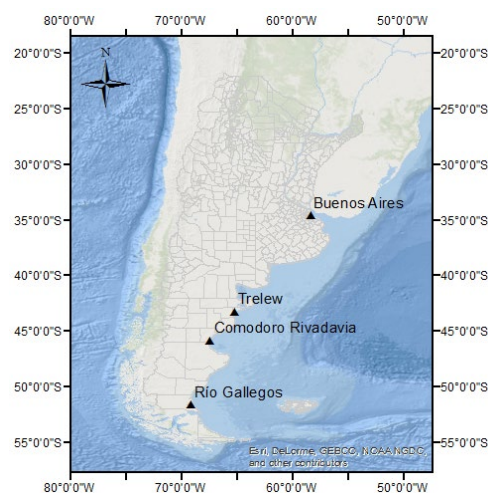


Figura 1. Sitios de estudio.

2.2. Mediciones satelitales

Las mediciones satelitales utilizadas en este trabajo son la CTO del Ozone Monitoring Instrument (OMI) y el IUV del Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) (Su, 2005). El instrumento OMI a bordo del satélite Aura de la NASA, es el sucesor del Total Ozone Monitoring System (TOMS) y continúa su registro desde el año 2004 (Levelt, 2006). Este instrumento mide la radiación solar reflejada y la retrodispersada en el UV-VIS. Tiene un ancho de barrido de 2600 km que permite una cobertura global diaria con una resolución espacial de 13x24 km en nadir. Para la CTO se utilizó el producto de datos OMDOAO3 L2, el cual emplea un algoritmo que aprovecha las capacidades hiperspectrales del instrumento OMI basándose en la Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial (DOAS).

Por otro lado se utilizó el instrumento CERES para la obtención del IUV, el cual se denominará de aquí en adelante como IUV_C . El mismo se encuentra a bordo de los satélites Aqua y Terra, y está compuesto por dos radiómetros de banda ancha en el VIS-IR (Loeb, 2017). En este trabajo se utilizó la versión Ed3A del producto CERES_SYN1deg. El término -SYN (Synoptic Radiative Fluxes and Clouds) indica que la versión proporciona datos de radiación en condiciones de cielo despejado y nublado, y -1deg indica que tiene una resolución espacial de 1 grado de latitud/longitud (Smith, 2011). En el presente trabajo se utilizaron datos diarios cada tres horas.

2.3. Criterio de selección para los eventos de transporte de bajo ozono

Para la selección de los eventos de transporte de masas pobres en O_3 hacia latitudes medias se determinaron medidas estadísticas de interés. A partir de los datos de CTO del instrumento OMI se obtuvo la climatología de O_3 diaria, promediando el valor de O_3 del mismo día para todos los años (ej. media de todos los primeros de enero de todos los años de la base de datos). La base de datos comprendió las mediciones obtenidas en los años 2005-2015, es decir, durante un periodo de 11 años. Luego de obtener la climatología de O_3 , se computó la desviación estándar de la misma y la media móvil tomando una longitud de 30 días. Finalmente se obtuvo la desviación estándar de la media móvil y de esta manera se obtuvieron las medidas estadísticas de interés. Luego de obtener estas medidas, se estableció como criterio para definir un evento de transporte de bajo O_3 observar que la CTO diaria para cada ciudad sea menor al valor medio de O_3 menos una desviación estándar en un periodo máximo de 4 días consecutivos para todas las ciudades de estudio. Determinar una situación de O_3 extremo bajo en la latitud mayor (Río Gallegos) da indicios del paso del agujero de O_3 sobre esta ciudad o vestigios de O_3 bajo como consecuencia de la formación del mismo, y observar un escenario similar en el resto de las ciudades en no más de 4 días genera una alta probabilidad de que los valores se deben a una influencia del fenómeno.

2.4. Índice Ultravioleta Potencial

Existen diferentes modelos de transferencia radiativa (RTM's) para estimar el IUV. Madronich (2007) utilizó el Modelo Troposférico UV-VIS (TUV) bajo condiciones de cielo despejado, libre de contaminación y albedo superficial de 5% para definir la siguiente fórmula analítica que permite inferir el índice UV en superficie para un determinado momento, en forma sencilla y sin tener que resolver la ecuación de transferencia radiativa

correspondiente:

$$IUV \sim 12,5 \mu_0^{2,42} \left(\frac{\Omega}{300} \right)^{-1,23} \quad 2$$

Donde μ_0 es el coseno sza y Ω es la CTO (en UD). La precisión de este modelo es de 10% o menor para ángulos cenitales dentro del rango 0-60° y para CTO entre 200-400 UD. El IUV obtenido a partir de este modelo se define de aquí en adelante como IUV_p (Índice Ultravioleta Potencial), fue calculado para el mediodía solar (valor mínimo de sza) y es el que se presentaría en condiciones de cielo despejado para cada día de estudio y para cada ciudad analizada.

2.5. Nubosidad

La nubosidad actúa sobre la radiación solar UV y VIS influyendo fuertemente en el balance radiativo atmosférico. El efecto de las nubes sobre las medidas instantáneas de ζUVER va desde pequeños aumentos hasta una reducción prácticamente total. Estupiñán et al. (1996) han medido los efectos de la cobertura total de nubes sobre UVER, y han detectado variaciones de + 30 a - 99 % en la irradiancia UV recibida en la superficie, en comparación con la que se obtendría en condiciones de cielo despejado. Estos estudios se han realizado en nuestro país, particularmente en la Patagonia Austral, arribando a resultados similares (Wolfram, 2013 y 2017). De manera indirecta, es posible estimar la atenuación que producen las nubes mediante la comparación del IUV calculado para diferentes condiciones de nubosidad. En este trabajo se realizó una comparación entre el IUV_p y el IUV_c para determinar la atenuación de la radiación, atribuyendo la discrepancia a la cobertura nubosa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Eventos de transporte de bajo ozono

Acorde al criterio establecido, se detectaron 101 situaciones extremas de bajo O_3 en Río Gallegos de las cuales 23 fueron calificadas como eventos de transporte de masas pobres en O_3 hacia latitudes medias más al norte, ya que se registraron disminuciones de la CTO con respecto a los valores medios correspondientes en el resto de las ciudades en no más de 4 días consecutivos. Se destaca un evento ocurrido en el año 2005 dado que se registró el valor mínimo de CTO en toda la serie histórica de datos, resultando en 176 UD el día 8 de octubre para Río Gallegos. En la Fig. 2 se muestran las medidas estadísticas calculadas para este caso. La línea de color representa la CTO diaria para cada ciudad, la línea blanca el valor medio y la sombra gris la desviación estándar. La Fig. 3 presenta mapas para los 4 días en los que transcurre el evento (del 8 al 11 de octubre de 2005) donde se observa cómo las masas pobres en O_3 (indicada por colores más oscuros de acuerdo a la escala cromática debajo de la Figura) son desplazadas debido a la dinámica y elongación del agujero de O_3 , alcanzando latitudes medias.

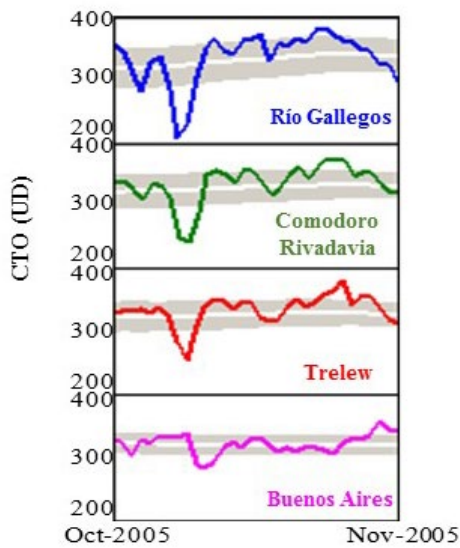


Figura 2. Medidas estadísticas para el evento de octubre de 2005

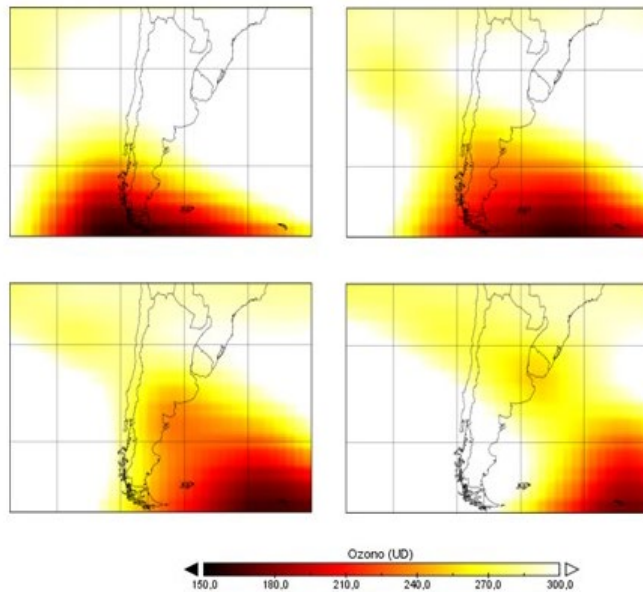


Figura 3. Mapas de transporte de O₃ para el evento del 8 al 11 de octubre de 2005

3.2. Relación entre la CTO y el IUV_p

Para los 23 eventos de transporte de masas pobres en O₃ detectados se determinó el valor medio de la disminución en la CTO diario con respecto al valor medio. Por otra parte se calculó el valor medio del aumento del IUV_p diario con respecto al valor medio. En la Tabla 1 se presenta una comparación entre estos valores para cada ciudad, y en la Fig. 4 se representa esta situación a partir de las medidas estadísticas calculadas para el evento de octubre de 2005, a modo de ejemplo de un caso particular.

Tabla 1. Media de la disminución de O₃ en los eventos de transporte.

CIUDAD	MEDIA DE LA DISMINUCIÓN DE CTO (%)	MEDIA DEL INCREMENTO DE IUV _p (%)
RÍO GALLEGOS	24	40
COMODORO RIVADAVIA	17	26
TRELEW	16	24
BUENOS AIRES	10	14

En la Tabla 1 se observa que la disminución media de la CTO sigue el mismo orden que el incremento del IUV_p. Esta afirmación también se puede observar en la Fig. 4, donde para el evento de octubre de 2005 los valores mínimos de CTO coinciden con los máximos de IUV_p, es decir, siguen un comportamiento inverso (estos casos se observan entre línea punteada negra).

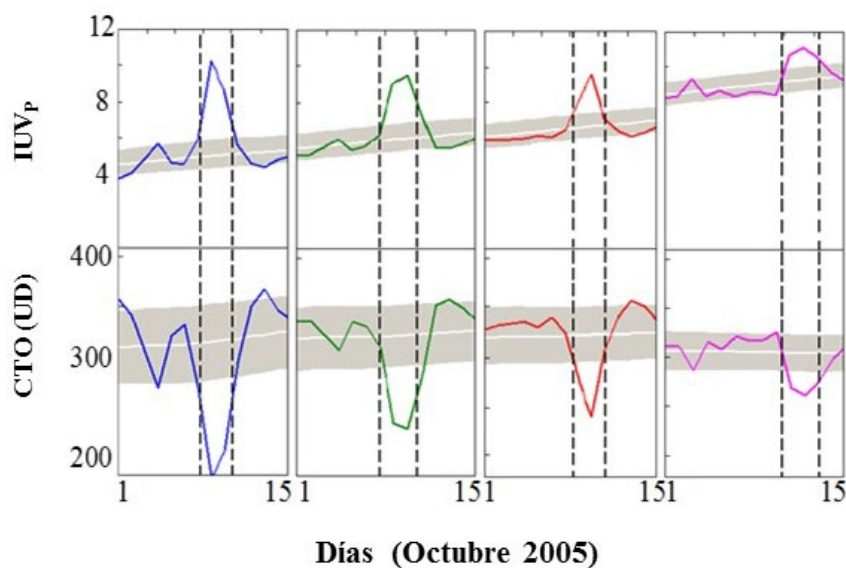


Figura 4. Comparación de medidas estadísticas para la CTO y el IUV_p en el evento de octubre de 2005.

3.3. Influencia de la nubosidad

Para determinar la influencia de la nubosidad, se realizó una comparación del IUV_c con los valores del IUV_p para los 23 eventos de transporte de bajo O₃. La Tabla 2 indica la diferencia porcentual relativa de los valores de IUV_p e IUV_c para los 23 eventos de transporte de bajo O₃. Además, la Fig. 5 presenta una comparación entre ambos índices para cada ciudad detectados en el evento de octubre de 2005 con barras de error del 10% para los valores del modelo y barras de error del 5% para el satélite típicas de este tipo de mediciones.

Tabla 2. Promedio de la comparación de IUV_p con IUV_c para los 23 eventos de transporte.

CIUDAD	RÍO GALLEGOS	COMODORO RIVADAVIA	TRELEW	BUENOS AIRES
Δ (IUV)	3	2,3	2,5	3,3
Δ (%)	38	27	29	33

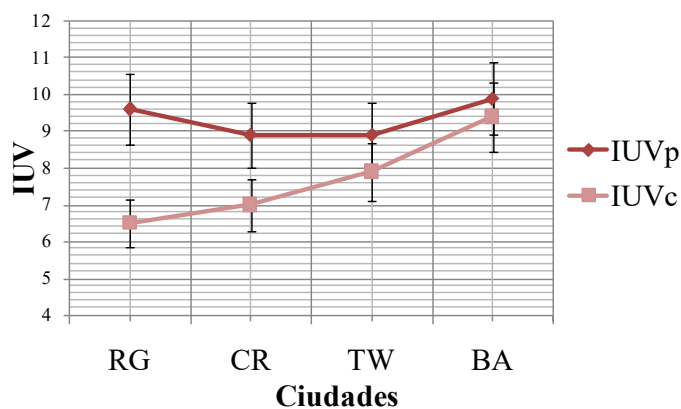


Figura 5. Comparación de IUV_p - IUV_c para el evento de octubre de 2005. (RG: Río Gallegos, CR: Comodoro Rivadavia, TW: Trelew, BA: Buenos Aires)

De acuerdo a la Tabla 2, los porcentajes varían indicando una atenuación de radiación UV no uniforme en las ciudades, aunque es posible indicar una mayor influencia de la cobertura nubosa en Río Gallegos y Buenos Aires para el promedio de los 23 eventos. En la Fig. 5, que muestra los valores de IUV para el evento de octubre de 2005, se observa que la cobertura nubosa determinó una atenuación de radiación fuerte en Río Gallegos y muy débil en Buenos Aires, suceso que puede ser constatado con mapas de IUV_C para cada uno de los días del evento presentados en la Fig. 6, donde se indica la variación de la radiación UV con colores que van del azul al rojo, tal como indica la escala cromática debajo de la Figura.

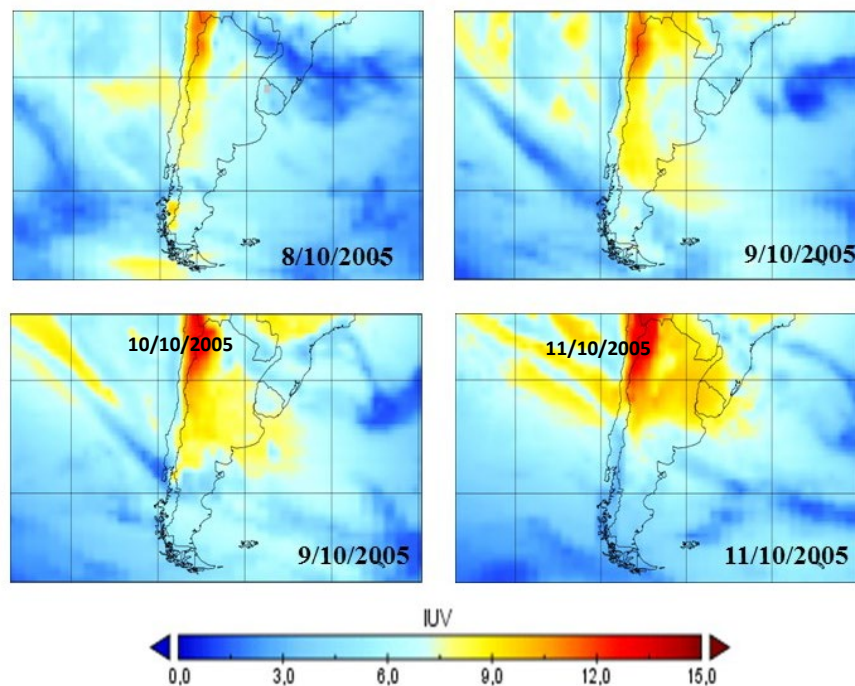


Figura 6. Mapas de IUV_C para el evento de octubre de 2005.

Se puede observar, en líneas generales, que Río Gallegos y Comodoro Rivadavia presentan valores moderados de IUV_C (~4), y esto en contraposición con el IUV_P, indica una cobertura nubosa prominente que atenúa la radiación. En cambio, en Trelew y Buenos Aires, en dos oportunidades se presentan valores muy altos de IUV_C (~9), que indican una menor cobertura nubosa y una mayor similitud en los valores presentados en la Fig. 5 para estas ciudades.

4. CONCLUSIONES

- A partir de las medidas estadísticas calculadas fue posible detectar 101 situaciones de valores extremos bajos de CTO en Río Gallegos, de los cuales 23 fueron registrados en latitudes medias y se consideraron eventos de transporte de masas de bajo O₃ que alcanzaron Buenos Aires. El promedio de la disminución de CTO con respecto al valor medio para estos eventos fue comparado con el promedio del incremento de IUV_P, resultando en un 24%, 17%, 16% y 10% de disminución promedio de CTO para Río

Gallegos, Comodoro Rivadavia, Trelew y Buenos Aires, y un aumento medio de IUVP de 40%, 26%, 24% y 14% en el mismo orden para cada ciudad. Estos resultados muestran un comportamiento inverso que afirma el papel fundamental del O₃ en cuanto a la atenuación de la radiación UV. Los valores de IUVP (a cielo despejado) recobran importancia en campañas de protección solar donde es útil indicar las situaciones extremas, es decir, la situación de mayor riesgo en cuanto a los valores de radiación solar que se pueden presentar en superficie.

- Los valores de IUVC fueron comparados con los de IUVP para determinar la influencia de la nubosidad en la atenuación de la radiación solar UV, evitando potenciales casos de sobreexposición UV por la presencia de nubes. Se encontró que el IUVP supera al IUVC en promedio para los 23 eventos de transporte detectados en un 38%, 27%, 29% y 33% para las ciudades de Río Gallegos, Comodoro Rivadavia, Trelew y Buenos Aires, respectivamente. Por lo tanto para este tipo de eventos, donde se presentan valores altos de IUVP a causa de masas pobres en O₃, la nubosidad es de gran importancia y se debe tener en cuenta porque minimiza el impacto de la radiación UV en la superficie de la Tierra.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la JICA (Japanese International Cooperation Agency) por la financiación de parte del equipamiento utilizado en la red de monitoreo de radiación solar y al programa de colaboración bilateral Argentina-Francia que financia el proyecto ECOS-Sud A160U01, en el cual se enmarcan los estudios que se abordan en este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

Cede, A. (2002). Monitoring of erythemal irradiance in the Argentina ultraviolet network. *Journal of Geophysical Research*.

Estupiñan, J.G. (1996). Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *Journal of Geophysical Research*. 101, D11, 16807-16816.

Farman, J. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x /NO_x interaction. *Nature*, 315, 207-210.

KarelV. (1999). UV- Index for the Public. Brussels COST-713 Action.

Levelt, P.F (2006). The Ozone Monitoring Instrument. *IEEE. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 5, 1093-1101.

Loeb, N. (2017) Web: <https://ceres.larc.nasa.gov/> (último acceso: 4 de Julio de 2017).

Madronich, S. (2007). Analytic Formula for the Clear-sky UV Index. *Photochemistry and Photobiology*, 83, 1537-1538.

McKinley, A.C. (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal*, 6, 17.

Monatersky, R. (1988). Decline of the CFC Empire. *Science News* 133.

McKenzie, R. (2003). Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2, 5-15.

Sivasakthivel, T. (2011). Ozone Layer Depletion and Its Effects: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2, 1.

Smith, G. (2011). Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present and future. *Adv. Space Res.*, 48, 254-263.

Su, W. (2005). Deriving surface ultraviolet radiation from CERES surface and atmospheric radiation budget: Methodology. *J. Geophys.*, 110.

Wolfram, E. (2013). Study Of Cloud Enhanced Surface UV Radiation At Atmospheric Observatory Of Southern Patagonia, Río Gallegos, Argentina. *AIP Conference Proceedings*. Melville, New York: AIP Conference Proceedings, 1531, 907-910.

Wolfram, E. (2017). Study of UV Cloud Modification Factors In Southern Patagonia. *AIP Conference Proceedings* 1810, 110012.