

PARÁMETROS ÓPTICOS DE NUBES EN UN SITIO COSTERO DEL DESIERTO DE ATACAMA, CHILE, A PARTIR DE MEDICIONES PIRANOMÉTRICAS DE IRRADIANCIA SOLAR

Eduardo Luccini^{1,2}, Miguel Rivas³, Elisa Rojas³, Rubén Piacentini^{1,4}, Pablo Canziani⁵

¹ Grupo de Energía Solar, Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNRosario). Bv. 27 de Febrero 210bis, CP 2000, Rosario, Argentina. e-mail: luccini@ifir-conicet.gov.ar, piacentini@ifir-conicet.gov.ar

² Facultad de Química e Ingeniería "Fray Roger Bacon", Pontificia Universidad Católica Argentina. Mendoza 4197, CP 2000, Rosario, Argentina.

³ Laboratorio de Radiación Solar Ultravioleta, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Tarapacá, Casilla 7-D, Arica, Chile. e-mail: mrivas@uta.cl, erojas@uta.cl

⁴ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNRosario). Pellegrini 250, Rosario, Argentina.

⁵ Equipo Interdisciplinario Para el Estudio de Procesos Atmosféricos en el Cambio Global (PEPACG), Instituto Para la Integración del Saber, Pontificia Universidad Católica Argentina - CONICET. Ramón Freire 183, CP 1426, Capital Federal, Argentina. e-mail: canziani@uca.edu.ar

RESUMEN: Se determinaron parámetros ópticos de nubes para condiciones de cielo totalmente cubierto en Arica, desierto de Atacama, norte de Chile, a partir de mediciones piranométricas de irradiancia solar total (ToSI) y ultravioleta eritémica (UVESI) promediadas cada 10 minutos durante el periodo 2002-2003. El tipo de nube predominante es estratocúmulo marino. La transmitancia efectiva de nubes (CET) se obtiene mediante un método empírico, posibilitado por las estables condiciones meteorológicas de la región. Se utilizaron modelos de transferencia radiativa 1D en los rangos ToSI y UVESI para establecer la relación teórica entre CET, el espesor óptico de nubes (COD) y el ángulo zenital solar (SZA) para condiciones de cielo completamente nublado. La misma permite estimar COD a partir del CET medido y de SZA. Se determinaron valores promedio de CET iguales a 0.36 en rango ToSI y 0.45 para UVESI, así como COD promedios de 21 para ToSI y 22 para UVESI.

Palabras clave: nubes, transmitancia, espesor óptico, piranómetro, Atacama.

INTRODUCCION

Las nubes desempeñan un rol fundamental en el ambiente de nuestro planeta. Conocer sus propiedades microfísicas y ópticas es crucial para comprender y cuantificar sus efectos radiativos sobre el clima.

Las propiedades ópticas de las nubes se obtienen de manera remota por medio de receptores pasivos básicamente de dos formas: desde arriba de las nubes midiendo radiación solar reflejada hacia arriba por las nubes (e.g. Harshvardhan et al., 2004), o desde abajo de las nubes midiendo la radiación solar transmitida por las nubes, incluyendo las múltiples reflexiones entre la superficie del planeta y la base de las nubes. La más difundida de estas últimas técnicas consiste en medir radiancia/irradiancia solar espectral/banda-ancha mediante instrumentos, especialmente piranómetros, en la superficie de la tierra o a bordo de embarcaciones en el océano (e.g., Fitzpatrick and Warren, 2005).

El espesor óptico de nubes (COD) es la integral de línea del coeficiente de extinción a lo largo de la extensión vertical de la nube, es un parámetro clave para cualquier análisis del equilibrio y evolución químico-dinámico-radiativo de la atmósfera. Las condiciones de cielo completamente nublado son particularmente propicias para estudiar propiedades de nube, dado que se pueden simular con precisión mediante modelos unidimensionales plano-paralelos de transferencia radiativa atmosférica, y sus propiedades ópticas se pueden caracterizar mediante tan solo el radio efectivo de gota de nube (r_e) y el COD, que es a su vez proporcional al camino de agua líquida (LWP). La transmisión de radiación solar por las nubes es mucho más sensible a cambios en COD que a cambios en r_e (Leontyeva and Stamnes, 1994), lo cual permite desarrollar algoritmos simples para inferir COD a partir de la radiación solar transmitida y el ángulo zenital solar (SZA), una vez definido un valor apropiado de r_e . Dada la extensión de las redes de medición piranométrica, aquellos algoritmos que infieren COD a partir de la irradiancia solar total (300-3000 nm) transmitida por las nubes son muy valorables y amplían la posibilidad de obtener propiedades ópticas de nubes en distintas regiones del mundo. Este es el tipo de algoritmo que empleamos en el presente trabajo.

El desierto de Atacama, que se extiende desde la región central de Chile hasta el sur de Perú a lo largo de la costa sudamericana del Océano Pacífico, es el más árido y antiguo sobre la Tierra. Las nubes son parte importante de este sistema, cuya meteorología diurna es de extrema regularidad durante el año, con mañanas que por lo general presentan nubosidad total la cual se disipa hacia el mediodía dando como resultado tardes despejadas. Este fenómeno provee un método empírico para establecer la irradiancia equivalente a cielo despejado durante las horas matutinas. Las nubes son de tipo estratocúmulos no precipitantes y constituyen una capa definida que puede ser muy bien representada por modelos de transferencia radiativa unidimensional.

En este trabajo se determinan las propiedades ópticas de las nubes típicas de la región de Arica, ciudad costera del desierto de Atacama en el norte de Chile, sobre la base de mediciones piranométricas de irradiancia solar total (ToSI, 300-3000 nm) y ultravioleta (UVESI, 280-400 nm).

MEDICIONES

Las mediciones de irradiancia solar a plano horizontal se realizaron durante el periodo Marzo 2002 - Septiembre 2003 en la ciudad costera de Arica (18.47°S, 70.31°W, 20 m s.n.m.), en el desierto de Atacama, norte de Chile. La figura 1 muestra la base de datos seleccionada completa en función de la fecha y también en función de la hora local. ToSI (300-3000 nm) fue medida mediante un piranómetro Solar Light 1141 S/N 5019. UVESI, 280-400 nm siguiendo el espectro de acción eritémico típico de la piel humana (McKinlay and Diffey, 1987), fue medida mediante un UV-biometer Solar Light 501A S/N 4425. Los datos fueron grabados en promedios cada 10 minutos mediante una datalogger Campbell CR10X S/N X21235. El SZA para cada medición se estableció en el centro de cada intervalo de 10 minutos. Se empleó la calibración de fábrica de los instrumentos, la cual es generalmente inapropiada para analizar valores absolutos (e.g., Leszczynski et al., 1998), pero esto no representa un inconveniente en este caso ya que todo el trabajo se basa en valores relativos, como se explicará en la siguiente sección.

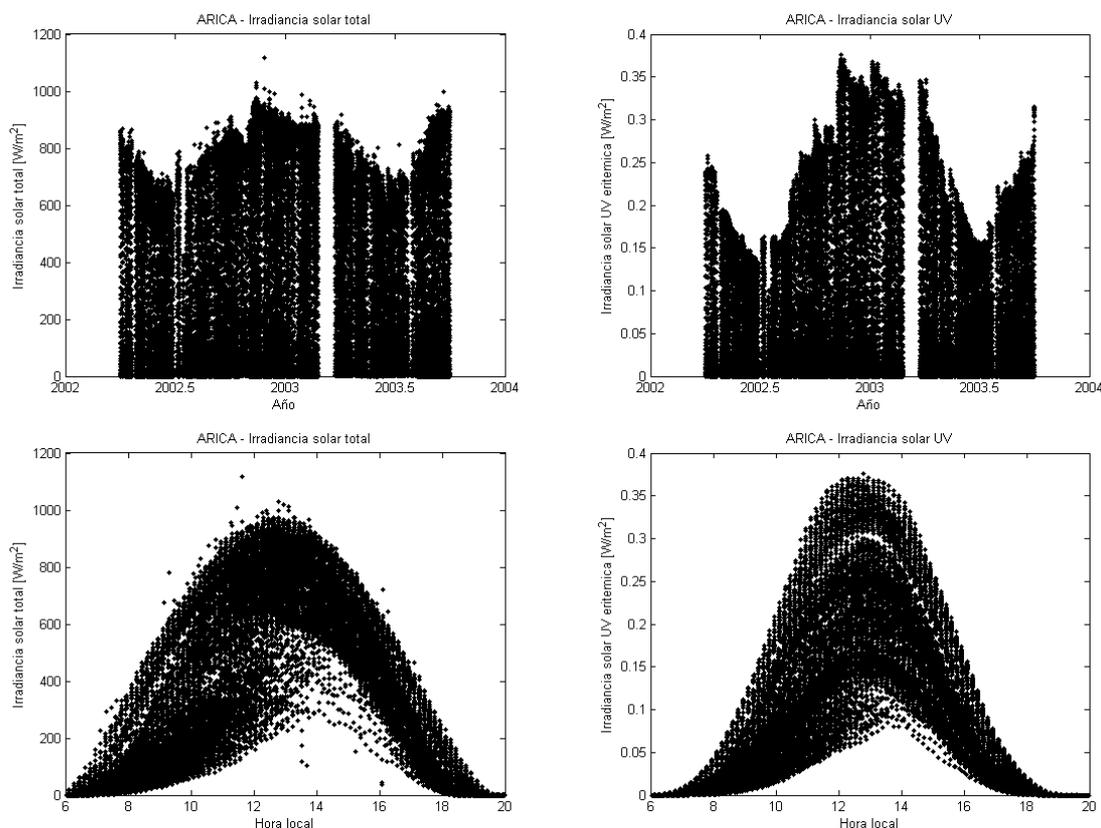


Figura 1. Mediciones de irradiancia solar total (izquierda) y UVE (derecha) en Arica durante los años 2002-2003 en función del día del año (superior) y de la hora local (inferior), en días cuyas tardes permanecieron mayormente despejadas.

DETERMINACION DE LA TRANSMITANCIA EFECTIVA DE NUBES

CET se define como la razón entre la irradiancia medida bajo toda condición de cielo y la irradiancia equivalente a cielo despejado. Para obtener esta última, se hace uso de las notablemente regulares condiciones climáticas de la región, con mañanas que presentan generalmente nubosidad total tipo estratocúmulos no precipitantes, que luego se disipan hacia el mediodía resultando en tardes despejadas. Entonces, la irradiancia luego del mediodía solar se interpola a modo de espejo en los mismos SZA de la mañana, y se usa como irradiancia solar equivalente a cielo despejado durante la mañana que permaneció nublada. La figura 2 muestra un ejemplo del método utilizado, para el día 02 de Enero de 2003. La selección de días cuyas tardes fueron despejadas, graficados en la figura 1, reportó 365 días sobre un total de 517, es decir el 70% de los días de la base de datos completa correspondió a tales condiciones.

Este método presenta varias ventajas. CET se obtiene directamente y no es necesaria ninguna estimación indirecta, como por ejemplo cálculos con modelos. No se requiere calibración absoluta de los instrumentos, dado que CET es un parámetro relativo que se obtiene a partir de la razón entre mediciones realizadas por el mismo instrumento. Además, dado que se basa en mediciones tomadas durante el mismo día, no tienen relevancia los valores específicos que hayan tenido otros parámetros como columna vertical de ozono y aerosoles, y basta considerar que se han mantenido constantes durante el día, como es habitual en este tipo de aplicaciones.

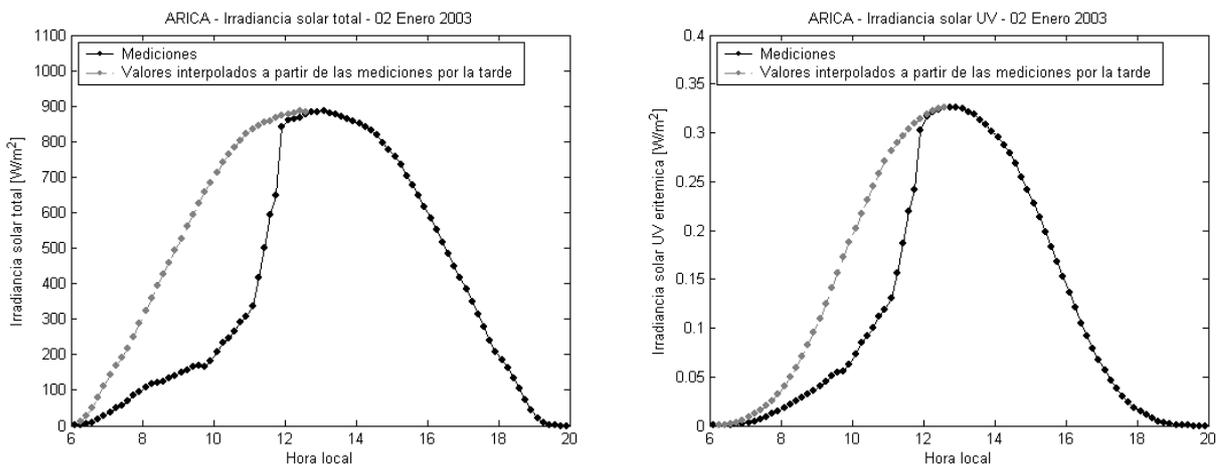


Figura 2. Ejemplo del método de análisis para mediciones correspondientes al día 02 de Enero de 2003 en Arica, en rango total (izquierda) y UVE (derecha). Los valores por la tarde se emplean como referencia de cielo despejado durante la mañana.

Este método fue aplicado a cada día seleccionado. La figura 3 muestra CET determinado en rangos ToSI y UVESI a partir de cada medición de irradiancia durante la mañana, cuando el cielo se presenta generalmente nublado por completo. Datos correspondientes a $SZA > 80^\circ$ fueron excluidos, dado que las incertezas tanto en mediciones como en modelización se incrementan sustancialmente en tales condiciones (e.g. Barnard and Long, 2004).

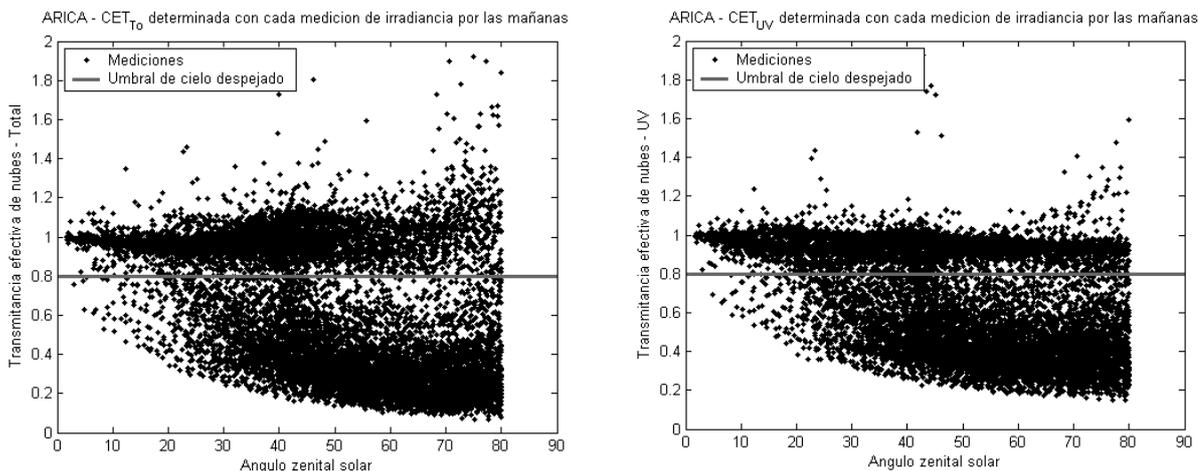


Figura 3. Transmitancia efectiva de nubes (CET) determinada a partir de cada medición de irradiancia solar en rango total (izquierda) y UVE (derecha) en función del ángulo zenital solar.

La nubosidad presente desde el amanecer ocasiona los valores más bajos de CET para SZA grandes, los cuales se mantienen a medida que el SZA disminuye hasta que próximos al mediodía solar (mínimo SZA en cada día del año) la nubosidad se disipa y los valores de CET se agrupan alrededor de $CET \sim 1$. Los escasos puntos con $CET > 1.1$ corresponden a momentos ocasionales cuando alguna nube aislada por la tarde obstaculizó el sol directo. Como se observa, todos los efectos de nubes (atenuación o incremento de irradiancia) son mas acentuados en el rango total que en rango UVE, confirmando otras referencias (e.g., Cede et al., 2002). También, la figura 3 indica que un valor de $CET = 0.80$ se puede considerar un límite empírico para distinguir casos de cielo despejado en ambos rangos, de modo que todos aquellos puntos con $CET < 0.80$ serán considerados como eventos correspondientes a cielo nublado. Este umbral ha sido previamente observado en otros trabajos (e.g., Fitzpatrick and Warren, 2005) y, si bien se han especulado algunas hipótesis sobre la microfísica del proceso de condensación de gotas de nube, aun no se ha encontrado una explicación concluyente a dicho fenómeno ni a las condiciones en las que se hace más o menos evidente.

CALCULOS CON MODELO RELACIONANDO CET, SZA Y COD

La relación de COD como función CET y SZA se obtuvo mediante cálculos con modelos 1D plano-parallel, los cuales representan apropiadamente el presente caso de nubosidad total uniforme tipo estratocúmulos marinos (Loeb and Coakley 1998). Se asume una única capa nubosa, de modo que el efecto de niebla o eventualmente otras nubes por sobre la capa homogénea se atribuyen a esa capa simple. Esta es una consideración apropiada, dado que el porcentaje típico de nubes altas por sobre la capa de estratocúmulos en la región es menor al 15% (Ayers et al. 2001; 2002). Las características de las nubes en el modelo fueron definidas a partir del trabajo de Cereceda et al. (2008) y del asesoramiento de los expertos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Arica, definiéndose una capa nubosa homogénea infinita plano-paralela de 400 m de espesor con base en 900 m s.n.m. y tope en 1300 m s.n.m. En ambos rangos, ToSI y UVESI, se empleó un albedo medio de

superficie de 0.10, columna media total de ozono de 270 DU característica de la región (e.g. Rivas et al., 2000), y espesor óptico de aerosoles 0.3 en 340 nm con exponente de Angstrom 1.2. Todos los cálculos se realizaron en el rango de SZA [0°-90°].

Los cálculos en rango ToSI se realizaron mediante el código online de Fu-Liou (Diurnal Simulation page, <http://snowdog.larc.nasa.gov/cgi-bin/rose/flp200503/sun/flsun.cgi>) (Fu and Liou, 1992; 1993; Rose and Charlock, 2002), algoritmo four-stream, con una estructura vertical tropical estándar de la atmósfera. Se ha observado que r_c es relativamente mas pequeño en las proximidades de la Bahía de Arica, probablemente debido a las emisiones de azufre de las grandes minas de cobre de la región (Huneus et al., 2006), y se empleó un valor $r_c = 8 \mu\text{m}$ estimado a partir de las mediciones del instrumento satelital MODIS (Wood et al., 2006).

Los cálculos en rango UVESI se realizaron mediante un modelo basado en el algoritmo de Ordenadas Discretas (DISORT) con corrección pseudo-esférica para la componente directa de la irradiancia (e.g. Luccini et al., 2006). La capa de nube incluye un espesor óptico de nubes (COD) uniforme, albedo de scattering simple de 1 y factor de asimetría de 0.87 en rango UV, extrapolados a partir de sus valores en 550 nm (Hess et al., 1998).

Los cálculos en ambos rangos, ToSI y UVESI, se realizaron para COD iguales a 0 (cielo despejado), 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100, y para el rango de SZA [0°-90°]. Entonces se determinó CET como la razón entre el caso nublado y el caso despejado, para cada valor de COD en función del SZA. La figura 4 muestra el CET modelizado en función del SZA para el rango completo de COD calculados en los casos de ToSI (COD_{To}) y de UVESI (COD_{UV}), así como los valores medidos de CET correspondientes a la condición nublada impuesta en la figura 3 ($\text{CET} < 0.80$). Se puede observar que, para un SZA fijo, existe una relación bi-unívoca entre CET y COD modelizados, lo cual hace posible obtener el COD correspondiente a cada valor medido de CET en su dado SZA.

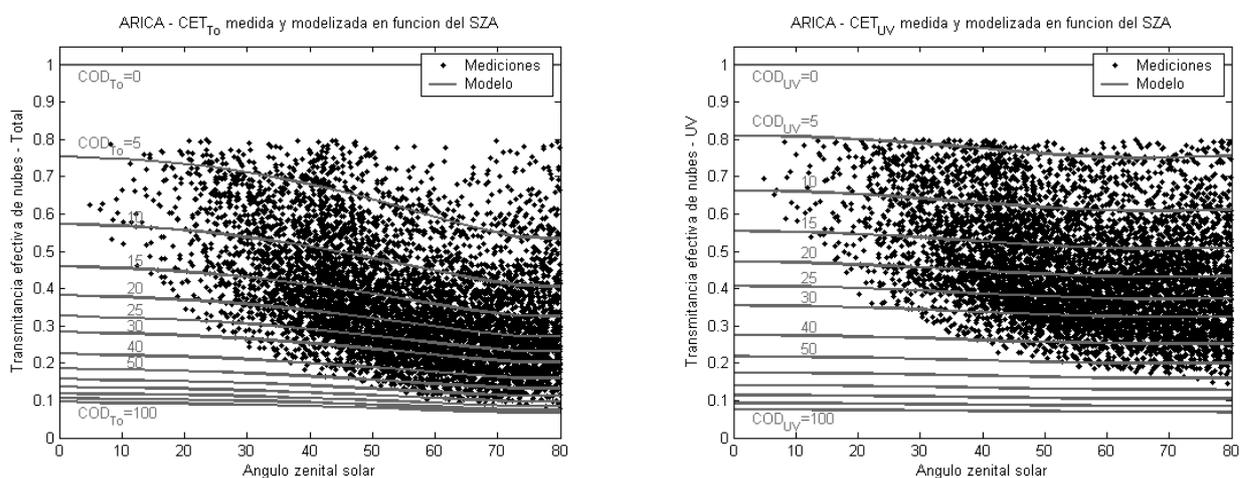


Figura 4. Transmitancia efectiva de nubes (CET) para condiciones de nubosidad ($\text{CET} < 0.80$) extraídas de la figura 3 en rango total (izquierda) y UVE (derecha) en función del ángulo zenital solar. Las líneas grises representan la CET modelizada en función del ángulo zenital solar para espesores ópticos de nubes (COD) desde 0 a 100 en ambos rangos. Se seleccionaron datos correspondientes a $\text{SZA} < 80^\circ$.

RESULTADOS

La figura 5 muestra el histograma normalizado de los valores medidos de transmitancia efectiva de nube en rango ToSI y UVESI correspondientes a la figura 4.

Aun cuando las distribuciones no son simétricas, analizaremos el valor promedio como una referencia. Los promedios son $\text{CET}_{\text{To}} = 0.36$ y $\text{CET}_{\text{UV}} = 0.45$. Esto implica que bajo condiciones de nubosidad total, presentes mayormente durante las horas matinales, la ToSI es atenuada en promedio aproximadamente un 60-65%, y 50-55% la UVESI en la zona con respecto a condiciones de cielo despejado. Se puede notar que el mínimo absoluto CET es alrededor de 0.1 en ToSI y 0.2 en UVESI, imponiendo un límite relativamente pequeño al máximo COD de las nubes en la región. La figura 5-derecha presenta la relación entre la transmitancia efectiva de nubes en rango ToSI y en rango UVESI. Acorde a otras referencias en el tema, se verifica que los efectos atenuadores de nubes en rango ToSI son siempre mayores que en rango UVESI, y además que las mediciones y modelo coinciden marcadamente dentro del rango de variabilidad establecido por los distintos SZA correspondientes.

Sólo aquellos puntos con $\text{CET} < 0.80$, mostrados en la figura 4, son considerados eventos bajo condiciones de nubosidad, y ellos se emplean para determinar COD utilizando el método descrito. La figura 6-izquierda muestra los histogramas normalizados de COD obtenidos a partir de las mediciones. Los valores promedio son $\text{COD}_{\text{To}} = 21$ y $\text{COD}_{\text{UV}} = 22$. Se observa que el mínimo CET referido en el párrafo anterior significa que en esta región prácticamente nunca se registran valores de COD mayores a ~60. La figura 6-derecha muestra que COD_{To} y COD_{UV} están relacionados de forma bastante lineal con una pendiente cercana a 1. Las mayores diferencias se presentan hacia COD grandes en que COD_{To} crece mas

rápidamente que COD_{UV} , efecto que se puede atribuir a la absorción por las gotas de agua y eventualmente vapor de agua en rango infrarrojo cercano (NIR, $\sim 800-3000$ nm) el cual está presente en la irradiancia total pero no en la UV.

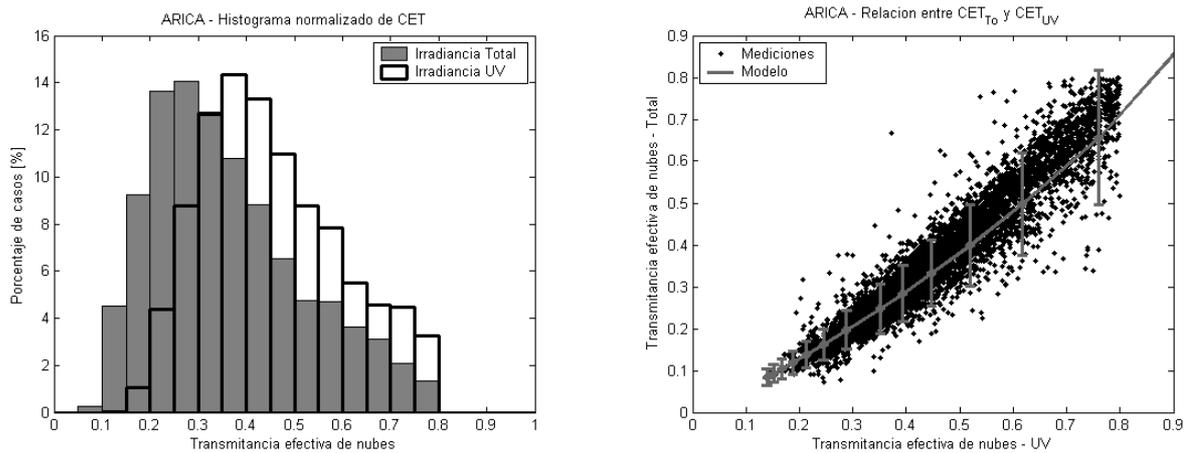


Figura 5. Izquierda: Histogramas de la transmitancia efectiva de nubes (CET) de la figura 4 en rango total (barras grises) y UVE (barras de contorno negro). Derecha: relación entre CET en rango total (CET_{T0}) y UVE (CET_{UV}) a partir de mediciones (puntos) y de cálculos con modelos (líneas), las barras de incerteza se deben al rango de SZA considerados.

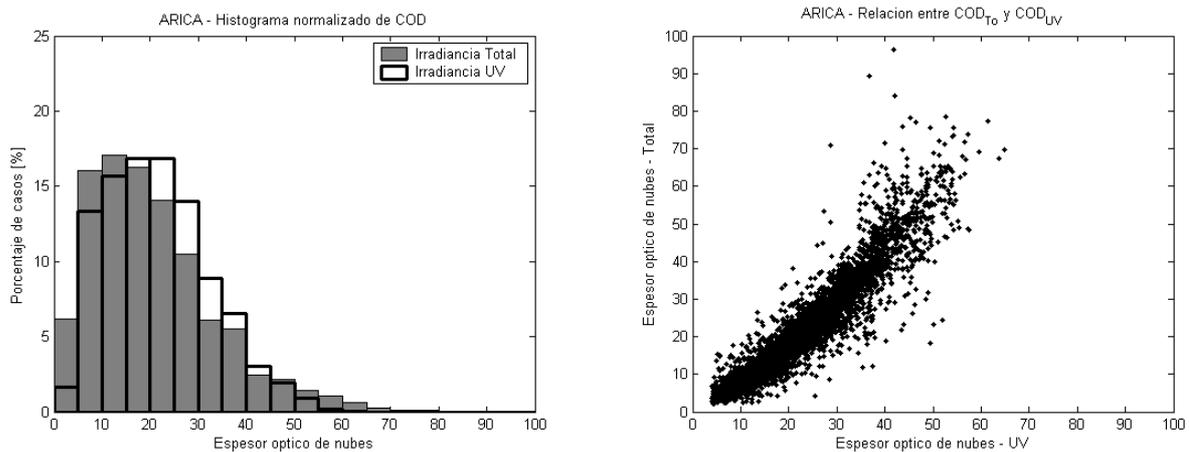


Figura 6. Izquierda: Histogramas del espesor óptico de nubes (COD) determinados a partir de la figura 4 en rango total (barras grises) y UVE (barras de contorno negro). Derecha: relación entre COD en rango total (COD_{T0}) y UVE (COD_{UV}) a partir de las mediciones.

CONCLUSIONES

Se ha determinado la transmitancia efectiva de nubes y el espesor óptico de nubes tipo estratocúmulos no precipitantes para el caso de cielo completamente nublado en la localidad de Arica, ciudad costera del desierto de Atacama en el norte de Chile, empleando mediciones de irradiancia solar total y ultravioleta realizadas con piranómetros. La notable regularidad climática de la zona presenta dicha nubosidad total durante las mañanas, disipándose hacia el mediodía dando como resultado tardes despejadas. Esto permite establecer un método empírico para determinar CET, y a través de cálculos con modelos 1D se obtienen relaciones que permiten determinar COD a partir de CET y su correspondiente SZA.

Se ha determinado que más del 50% de la irradiancia UVE es atenuada por las nubes durante las mañanas, valor relevante en una región tropical donde se registran niveles extremos de Índice UV (mayores que 11) durante gran parte del año (e.g. Rivas et al., 2000). COD promedio de 21 en rango total y de 22 en rango UV indican que las nubes de la región son ópticamente no muy densas.

Antes que un estudio definitivo, el presente trabajo es una base para ampliar en el futuro, dadas las características geográficas de esta región y muchas referencias que indican que las particularidades atmosféricas merecen un análisis más detallado:

- Un fuerte gradiente longitudinal en la elevación de la superficie, desde el nivel del mar en el Océano Pacífico hasta el Altiplano Andino por sobre 4000 m hacia el Este.
- Un marcado gradiente longitudinal, y aun un gradiente latitudinal sobre la costa, sobre todos los parámetros relevantes como: fracción nubosa media, altura de nubes, radio efectivo de gotas de nube, número medio de gotas de nube y COD.

- Las emisiones de azufre provenientes de las minas de cobre de la región, y las ocasionales emisiones volcánicas transportadas por los vientos zonales cambian la disponibilidad de núcleos de condensación y las propiedades absorptivas de las nubes.
- El alto contenido de aerosoles atmosféricos locales.
- El marcado ciclo diurno de la cubierta nubosa parece ser mucho más pronunciado que sobre otras regiones del planeta.
- La proximidad a la región donde los fenómenos El Niño y La Niña se desarrollan puede modificar periódicamente el comportamiento total y estacional de las características de las nubes.

Agradecimientos: Esta investigación contó con el aporte del Proyecto de Investigación Mayor Universidad de Tarapacá, código 4720-09, “Radiación solar ultravioleta, parámetros atmosféricos”, Arica, Chile, del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y de la Pontificia Universidad Católica de Argentina.

REFERENCIAS

- Ayers J. K., P. Minnis, D. F. Young, W. L. Smith, Jr., y L. Nguyen (2001). Development of a climatology of cloud properties over the Southeastern Pacific for PACS. *Proc. AMS 11th Conf. Satellite Meteorology and Oceanography*, pp 176-179.
- Ayers J. K., P. Minnis, P. W. Heck, A. D. Rapp, D. F. Young, W. L. Smith, Jr., y L. Nguyen (2002). A one-year climatology of cloud properties derived from GOES-8 over the Southeastern Pacific for PACS. *Proc. AMS 11th Conference on Cloud Physics*.
- Barnard J. C., y C. N. Long (2004). A simple empirical equation to calculate cloud optical thickness using shortwave broadband measurements. *J. Appl. Meteorol.*, 43, 1057-1066.
- Cede A., E. Luccini, L. Nuñez, R. Piacentini, y M. Blumthaler (2002). Effects of clouds on erythemal and total irradiance as derived from data of the Argentine Network. *Geophys. Res. Lett.*, 29(24), 2223, doi: 10.1029/2002GL015708.
- Cereceda P., H. Larrain, P. Osses, M. Farias, y I. Egaña (2008). The spatial and temporal variability of fog and its relation to fog oases in the Atacama Desert, Chile. *Atmos. Res.*, 87, 312-323.
- Fitzpatrick M. F., y S. G. Warren (2005). Transmission of solar radiation by clouds over snow and ice surfaces. Part II: cloud optical depth and shortwave radiative forcing from pyranometer measurements in the Southern Ocean. *J. Climate*, 18, 4637-4648.
- Fu Q., y K. N. Liou (1992). On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogenous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 49, 2139-2156.
- Fu Q., y K. N. Liou (1993). Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2008-2025.
- Harshvardhan G. G., R. N. Green, Z. Qu, y T. Y. Nakajima (2004). Remotely sensed microphysical and thermodynamic properties of nonuniform water cloud fields. *J. Atmos. Sci.*, 61(21), 2574-2587.
- Hess M., P. Koepke, y I. Schult (1998). Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 831-844.
- Huneus N., L. Gallardo, y J. A. Rutllant (2006). Offshore transport episodes of anthropogenic sulfur in northern Chile: Potential impact on the stratocumulus cloud deck. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19819, doi:10.1029/2006GL026921.
- Leontyeva E., y K. Stamnes (1994). Estimations of cloud optical thickness from ground-based measurements of incoming solar radiation in the Arctic. *J. Climate*, 7, 566-578.
- Leszczynski K., K. Jokela, L. Ylianttila, R. Visuri, y M. Blumthaler (1998). Erythemally weighted radiometers in solar UV monitoring: results from the WMO_STUK intercomparison. *Photochem. Photobiol.*, 67, 212-221.
- Loeb N. G., y J. A. Coakley Jr. (1998). Inference of marine stratus cloud optical depths from satellite measurements: Does 1D theory apply?. *J. Climate*, 11, 215-232.
- Luccini E., A. Cede, R. Piacentini, C. Villanueva, y P. Canziani (2006). Ultraviolet climatology over Argentina. *J. Geophys. Res.*, 111, D17312, doi:10.1029/2005JD006580.
- McKinlay A. F., y B. L. Diffey (1987). A reference action spectra for ultraviolet induced erythema in human skin, in *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, edited by W. R. Passchier y B. M. F. Bosnjakovich, pp. 83– 87, Elsevier, New York.
- Rivas M., E. Luccini, E. Rojas, y R. Piacentini (2000). Irradiancia eritémica y riesgo solar en Arica, norte de Chile. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8, 13-16.
- Rose F. G., y T. P. Charlock (2002). New Fu-Liou code tested with ARM Raman Lidar and CERES in pre-CALIPSO exercise. Extended abstract for 11th Conference on Atmospheric Radiation (AMS), Ogden, Utah.
- Wood R., C. Bretherton, B. Huebert, C. R. Mechoso, y R. Weller (2006). VOCALS-SouthEast Pacific Regional Experiment (REx), Scientific Program Overview.

ABSTRACT: Broadband overcast cloud optical parameters were determined at Arica, Atacama Desert, Northern Chile, from 10-minutes averaged pyranometer measurements of total solar irradiance (ToSI) and ultraviolet solar irradiance (UVESI) during the period 2002-2003. The predominant cloud type is marine stratocumulus. The cloud effective transmittance (CET) is obtained by an empirical method using the stable meteorological conditions of the region. 1D radiative transfer models in ToSI and UVESI ranges are used to establish the theoretical relationship between the overcast CET, the cloud optical depth (COD) and the solar zenith angle (SZA). This is used to estimate the COD from the measured CET and the SZA. Average CET of 0.36 for ToSI and 0.45 for UVESI, and average COD of 21 for ToSI and 22 for UVESI were found.

Keywords: clouds, transmittance, optical depth, pyranometer, Atacama.