

MEDIDAS DE ALBEDO EN EL SALAR DE UYUNI¹

Marcos F. Andrade², Francesco Zaratti³

*Laboratorio de Física de la Atmósfera
Instituto de Investigaciones Físicas
FCPN—UMSA*

RESUMEN

Se estudió el efecto de superficies altamente reflectantes sobre la irradiancia ultravioleta eritémicamente efectiva. Para este fin se realizaron medidas en el Salar de Uyuni ubicado en la parte sur de Bolivia. El Salar es el más grande del mundo con una superficie aproximada de 12 000 km². La característica más destacable del Salar para este estudio es la homogeneidad óptica de su superficie durante la mayor parte del año. Además, al estar situado a 3800 m snm, el lugar recibe intensidades de UV relativamente altas en condiciones de baja contaminación atmosférica. Las medidas de albedo realizadas por un radiómetro UV para radiación eritémicamente efectiva muestran un valor de 0.69 ± 0.02 . Este valor tiene una dependencia muy débil de la altura del sol lejos de las orillas del Salar lo cual indica la homogeneidad óptica de la superficie del mismo. Sin embargo, cerca de las orillas del Salar el efecto de borde es considerable. Para una elevación del sol del orden de 50° el índice UV, usado como medida de la intensidad UV, muestra que es un 20 % más alto cerca del centro del Salar que cerca de las orillas del mismo. Para valores menores de elevación del sol estos valores son algo menores.

Descriptores: Radiación UV, Albedo, Ozono.

1. INTRODUCCIÓN

Existe amplia evidencia acerca de los efectos dañinos a la salud humana de la excesiva exposición a la Radiación UV (RUV) solar [1,2]. Gente que vive en los trópicos ve incrementado este riesgo a causa de los niveles naturalmente bajos de ozono [4]. Adicionalmente, debido a que la intensidad de la RUV que llega a la superficie terrestre se incrementa con la altura de la misma [3,4], la población que habita en la región andina se encuentra en especial riesgo. En el caso de Bolivia alrededor de tres millones de personas viven por encima de los 3 000 m snm [10]. Por esta razón es importante caracterizar adecuadamente los parámetros relacionados con la RUV en esta región del planeta. En este sentido, dado su tamaño, altitud, propiedades ópticas y baja contaminación local, el Salar de Uyuni es un laboratorio natural muy interesante.

Estudios teóricos con base en modelos tridimensionales sugieren que las propiedades reflectantes de la superficie, aun a decenas de kilómetros del sitio de medida, influyen de manera significativa en la radiación

UV [6]. Estos estudios, basados en superficies con albedos de 0.03 para vegetación y 0.85 para nieve, han sido realizados para una variedad de condiciones y en áreas del orden de 200 km x 200 km. Los resultados para la región UV indican que el máximo incremento de la irradiancia UV debido a cambios del albedo de la superficie de 0.03 a 0.85 está cerca del 50 % para longitudes de onda cercanas a los 330 nm y alrededor de 35 % para 300 nm. Estos resultados están en excelente concordancia con otros estudios teóricos publicados anteriormente [7]. El radio del área circular alrededor del detector que produce un 80 % del máximo efecto debido al alto albedo de la superficie es del orden de 22.5 km para 330 nm y 6 km para 300 nm. Hasta ahora los estudios experimentales que abordaron el tema de los efectos de albedo sobre la RUV se realizaron en la Antártica [8,9] y las regiones glaciares de los Alpes [10]. Estos estudios, sin embargo, encontraron dificultades relacionadas con las inhomogeneidades del terreno y el acceso a la zona fronteriza entre las regiones de alto y bajo albedo. Estos problemas se reducen al mínimo en el caso del Salar de Uyuni. Aún más, debido al alto albedo reportado en la zona del visible para el Salar [11] y la elevada intensidad UV en el lugar es de esperar que un estudio experimental en esta zona arroje nuevas luces acerca del comportamiento de las RUV. Los datos que se reportan en el presente trabajo fueron obtenidos en una campaña de campo realizada en Mayo del año 2005. Durante el periodo de medida

¹Este artículo es una adaptación del artículo completo: *Investigations on the effect of high surface albedo on erythemally effective UV irradiance: Result of a campaign at the Salar de Uyuni, Bolivia*. Publicado en el *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 87 (2007) 1-8, cuyos autores son, además de los autores de esta adaptación: Joachim Reuder, Flavio Ghezzi, Eduardo Palenque y René Torrez.

²Email: mandrade@atmos.umd.edu.bo

³Email: zaratti@fiumsma.edu.bo

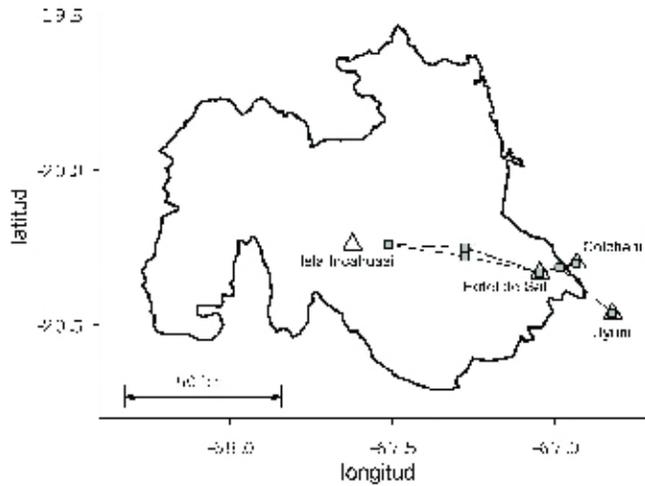


Figura 1. Mapa del Salar de Uyuni con los sitios de medida durante la campaña de Mayo del 2005.

se utilizaron varios radiómetros de banda ancha. Se espera que las irradiancias y albedos medidos puedan contribuir a la validación de modelos de transferencia radiativa así como a la evaluación e interpretación de datos satelitales relacionados.

2. DESCRIPCIÓN DEL SALAR

El Salar de Uyuni está situado en la parte sudoeste del Altiplano boliviano entre 19.7° y 20.7° S y 66.9° y 68.3° O a una altitud media de 3 700 m snm. La extensión aproximada del Salar es de unos 12 000 km² con una extensión máxima meridional de 120 km y una zonal máxima de 150 km. El tamaño real del Salar oscila estacionalmente debido a que parte de sus orillas son una mezcla variable de barro, sal y agua. Aunque la mayor parte del año el Salar presenta una superficie relativamente homogénea de sal, en la estación lluviosa (Diciembre-Marzo) una delgada capa de agua entre 5 a 30 cm de altura cubre prácticamente todo el Salar.

Dado que el Salar se encuentra a una altura similar a la del Laboratorio de Física de la Atmósfera (16.54° S, 68.07° O, 3420 m snm) es razonable utilizar los datos de la columna de ozono medidos por un instrumento Brewer situado en este laboratorio. Otra opción es utilizar los datos medidos por el instrumento TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer por sus siglas en inglés). En ambos casos el valor medio para el mes de Mayo es del orden de 250 DU (Unidades Dobson, 1 DU=1matm cm, o 2.69×10^{16} moléculas cm⁻²). Dada la lejanía del Salar de los grandes centros urbanos (la única población cercana con aproximadamente 10 000 habitantes se encuentra en la orilla oriental del Salar) es de esperar que la contaminación superficial sea baja. Las pocas medidas realizadas en la zona sugieren que la concentración de ozono superficial está en el orden 20 ppbv [17]. En el caso de los aerosoles, medidas realizadas en La Paz con un radiómetro CIMEL que es parte de la red Aeronet muestran que el espesor óptico de los aerosoles (AOD)

es del orden 0.1-0.2 en la ciudad de La Paz para el mes de Mayo (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Es de esperar entonces que en la zona del Salar los valores de AOD sean de ese orden o menores.

3. CAMPAÑA E INSTRUMENTACIÓN

La campaña de campo se llevó a cabo del 10 al 16 de mayo del año 2005. La irradiancia efectiva UV, representada por el índice UV, fue medida por tres radiómetros UV de banda ancha. Dos de ellos (un UVS-E-T, fabricado por Kipp & Zonen, número serial 001, y otro SCINTEC, número serial 399) fueron proporcionados por el Instituto de Meteorología de la Universidad de Munich en tanto que el tercero (un UVB-1, Yankee Environmental Systems, número serial 137) fue proporcionado por el Laboratorio de Física de la Atmósfera. Adicionalmente, durante la campaña se contó con un medidor de la columna de ozono Microtops II [13] así como un equipo NOLL para medir el espesor óptico debido a los aerosoles [14].

Para obtener medidas a fin de estudiar tanto el albedo como los efectos de borde del Salar sobre éste, se tomaron datos de forma simultánea a las orillas como en regiones dentro del Salar lejos de su borde. Para calcular el albedo se colectaron datos durante una tarde y una mañana consecutivas colocando un radiómetro apuntando hacia arriba y abajo de manera alternada. Para estimar los efectos de borde se colocó unos de los radiómetros sobre el techo de un “todo terreno” y se manejó el mismo por dos días hacia el centro del Salar y desde allí hacia una orilla. La figura 1 muestra los lugares donde las medidas fueron colectadas.

4. MEDIDAS

Las irradiancias UV fueron medidas utilizando los instrumentos detallados en la sección 3. Todos los radiómetros allí descritos han sido diseñados para que su respuesta espectral coincida con el espectro de acción eritémica definido por CIE [15] de tal modo que midan la irradiancia UV eritémicamente efectiva. Dado que el índice UV se calcula a partir de esta irradiancia efectiva [16,19], en el presente trabajo las medidas se reportan en “unidades” IUV (1 IUV = 25 mW/m² de irradiancia efectiva) como si la misma fuera una unidad física. Ahora bien, debido a que ningún detector responde exactamente igual a la definición CIE mencionada anteriormente, es necesaria una calibración de los instrumentos a fin de obtener datos confiables [21]. En este sentido todos los instrumentos fueron calibrados cuidadosamente. Esto incluyó el trabajo de laboratorio para obtener una matriz de calibración dependiente de la columna total de ozono así como de la altura del sol [17,18].

4.1. Intercomparación de radiómetros

A fin de obtener el albedo, se usaron los dos radiómetros del mismo tipo (Kipp & Zonen, números seriales 001 y 399). Ambos detectores colectaron datos lado a lado antes y después de la campaña en diferentes localidades

TABLA 1

Sitios y fechas en los que se tomaron datos, con los instrumentos lado a lado, para fines de intercalibración.
(n* es el número de días en los que se midió el IUV.)

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)	t (n*)	Fecha
Munich (MIM)	48.13°N	11.57°E	530	10	23.04.-02.05.2005
La Paz (LFA)	16.54°S	68.07°O	3450	3	07.05.-09.05.2005
Uyuni	20.46°S	66.82°O	3700	1	11.05.2005
Colchani	20.30°S	66.93°O	3690	2	12.05.-13.05.2005
La Paz (LFA)	16.54°S	68.07°O	3450	3	18.05.-20.05.2005

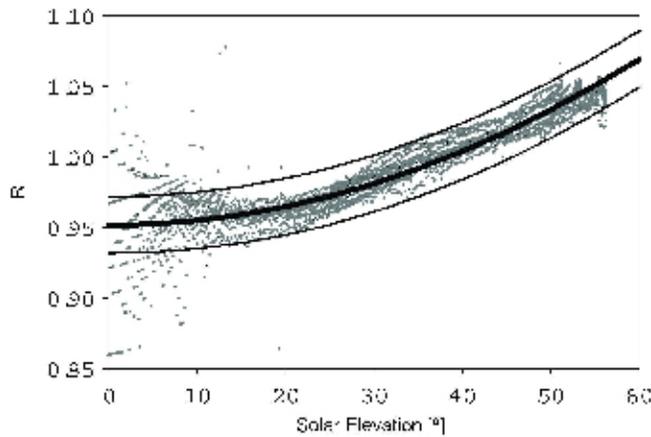


Figura 2. Razón R entre los IUV medidos por los detectores UV-E-S-T 399 y UV-E-S-T 001. Los datos fueron colectados cada minuto durante 9 días de medidas con los instrumentos lado a lado. La línea gruesa muestra un ajuste cuadrático a los datos mientras que las líneas delgadas indican el intervalo $\pm 2\%$ alrededor de este ajuste.

a fin de evaluar cualquier diferencia en las medidas entregadas por los mismos. La tabla 1 resume las localidades y tiempos para tal efecto. Las razones R de todas las medidas de IUV entre los dos instrumentos (IUV_{399}/IUV_{001}) están graficadas en la Fig. 2. Se observa que las medidas de ambos instrumentos coinciden razonablemente bien en el orden del 5% que es la precisión esperada para este tipo de radiómetros [20]. Sin embargo R muestra claramente una dependencia con la elevación del sol. La razón R está alrededor de 0.95 para elevaciones pequeñas mientras sube a aproximadamente 1.05 para 55° de elevación (máxima elevación durante la campaña). Esta dependencia, atribuible principalmente a la diferente sensibilidad espectral de los instrumentos así como a la diferente respuesta coseno de los mismos debe ser tomada en cuenta a la hora de calcular el albedo. La ventaja de calcular este último es, naturalmente, que el albedo es la razón de las medidas realizadas por los dos instrumentos de forma tal que ajustando un instrumento al otro la dependencia con la elevación deja de ser importante. Para este propósito se realizó un ajuste cuadrático a los datos

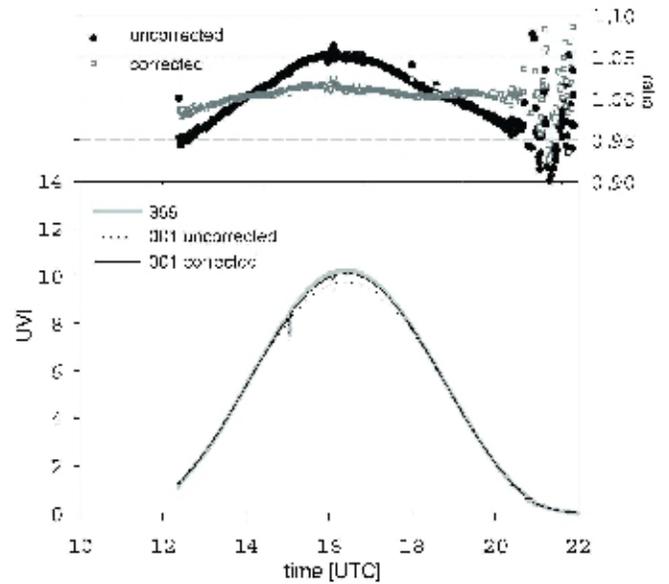


Figura 3. Ilustración del efecto de aplicar la función de corrección entre los instrumentos 001 y 399 para Mayo 11 en Uyuni.

tomados cada minuto. La figura 2 muestra los datos, la curva de ajuste (línea gruesa) así como el intervalo del 2% alrededor de esta curva de ajuste (líneas delgadas). De este modo, para evaluar el albedo, se corrigieron los datos entregados por el instrumento 001 por la curva de ajuste. Los datos así corregidos coinciden mejor que al 2% para ángulos mayores a 15° . La figura 3 muestra los datos originales y los corregidos. Como se observa, la dependencia con la altura desaparece casi por completo una vez que la corrección es realizada. Todos los datos medidos durante la campaña fueron corregidos correspondientemente.

4.2. Albedo

Las medidas de albedo fueron tomadas a 20.333°S y 67.046°O , unos 15 km dentro del Salar a aproximadamente 20 kilómetros al este de la población de Colchani. Un radiómetro (número serial 001) y un piranómetro fueron instalados en un soporte a aproximadamente 2 m

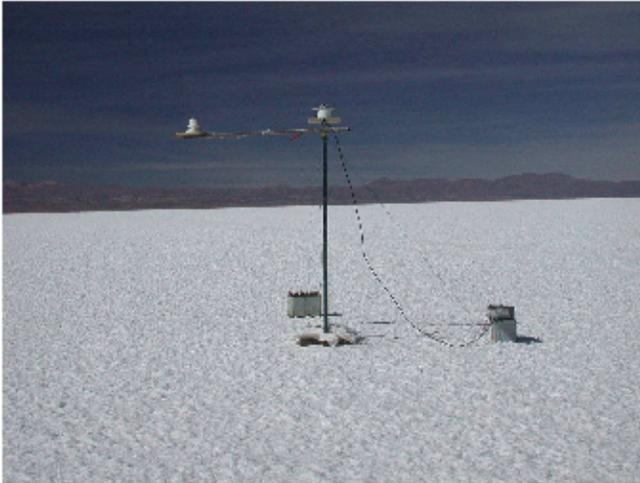


Figura 4. Arreglo experimental para la determinación del albedo en el Salar de Uyuni.

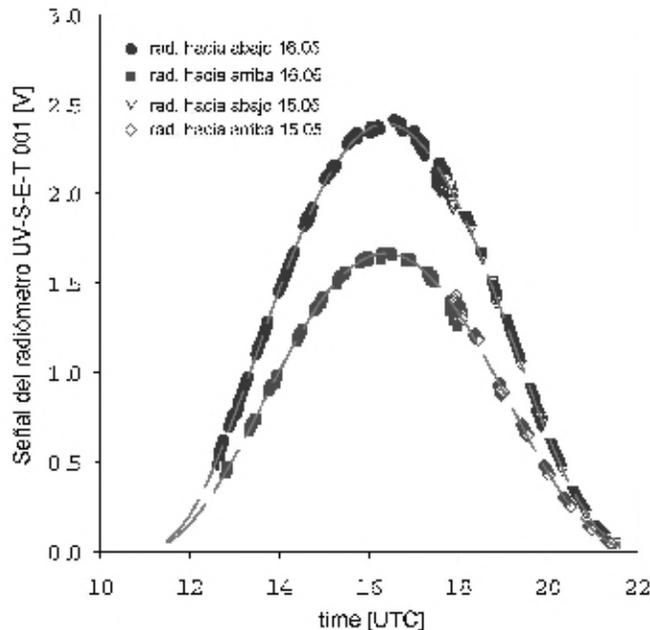


Figura 5. Datos tomados por el instrumento 001 durante la tarde del 15 de mayo y la mañana del 16 de mayo del 2005. Los datos son desplegados de tal forma que indican el comportamiento diario. La dirección de los detectores fue cambiada manualmente cada 10 a 20 min. La línea ploma es un ajuste a los datos para poder calcular el albedo de manera continua.

de la superficie (ver figura 4). Aproximadamente cada 15 min la orientación de ambos fue modificada manualmente girando el brazo en el que los instrumentos estaban instalados. La horizontalidad de ambos instrumentos fue controlada por niveles de burbuja. Las medidas se realizaron la tarde del 15 de Mayo, a partir de las 17:30 UTC (13:30 hora oficial local) y la mañana del 16 de las 12:30 a las 18:00 UTC. Las medidas de ambos días se combinaron para mostrar el comportamiento diario mostrado en la figura 5. Los datos obtenidos durante la transición “arriba-abajo” fueron descartados. El día 15 en la tarde

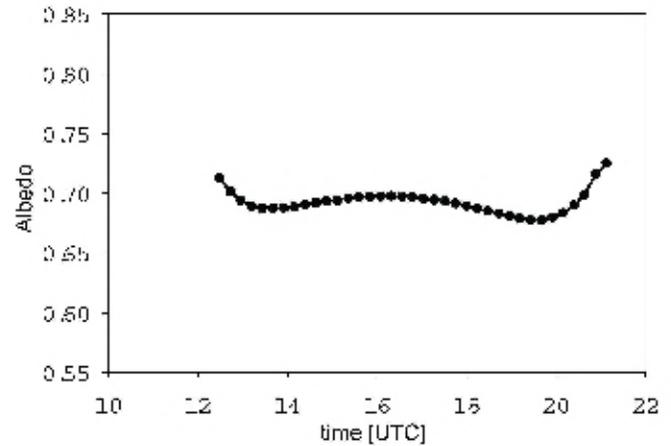


Figura 6. Variación diaria del albedo para irradiancia eritémicamente efectiva derivada de datos colectados el 15 y 16 de mayo del 2005 (vea también la Fig. 5).

aproximadamente dos octavos del cielo estaban cubierto por delgadas nubes cirrus que no afectaron notablemente la radiación UV. En cambio el día 16 en la mañana amaneció con cuatro octavos del cielo cubierto por cirrus. La nubosidad se incrementó hasta seis octavos hacia el mediodía. Más importante, las nubes se tornaron ópticamente mucho más densas hacia el mediodía. Esto se ve reflejado en la mayor la variabilidad de los datos a partir de las 16:00 UTC.

Para obtener una función continua de la irradiancia recibida y reflejada se ajustaron curvas a los datos combinados del día 15 y 16 (figura 5). Estas curvas fueron luego usadas para el cálculo del comportamiento diario del albedo válido para la irradiancia eritémicamente efectiva. El comportamiento temporal del albedo puede ser observado en la figura 6. Entre las 12:30 UTC y las 20:30 UTC (8:30 a las 16:30 hora local), correspondientes a elevaciones mayores a 15° , el albedo es bastante estable con un valor 0.69 ± 0.02 . Las variaciones que se observan para ángulos menores están probablemente relacionadas con la respuesta coseno del detector. Debido a falta de datos de calibración de los instrumentos para la radiación reflejada se decidió usar los datos “crudos” tal como fueron entregados por los detectores. Por tanto, desviaciones de la respuesta ideal coseno de los instrumentos así como la baja sensibilidad de los mismos ante la débil radiación para ángulos bajos pueden contribuir al comportamiento mostrado por el albedo en la figura 6.

4.3. Medidas simultáneas dentro y fuera del Salar

El día 14 de mayo se realizaron medidas simultáneas con el detector UV-S-E-T-399 en Colchani (a aproximadamente 5 km fuera del Salar) y el detector UV-S-E-T-001 en la Isla Incahuasi la cuál se halla cerca del centro del Salar (ver figura 1). Esta isla tiene una extensión aproximada de 0.75 km por 1 km con el punto más elevado a unos 50 m de la superficie del Salar. El radiómetro fue instalado en la parte noreste sobre una roca a unos 20 m de la superficie del Salar. El comportamiento diario y

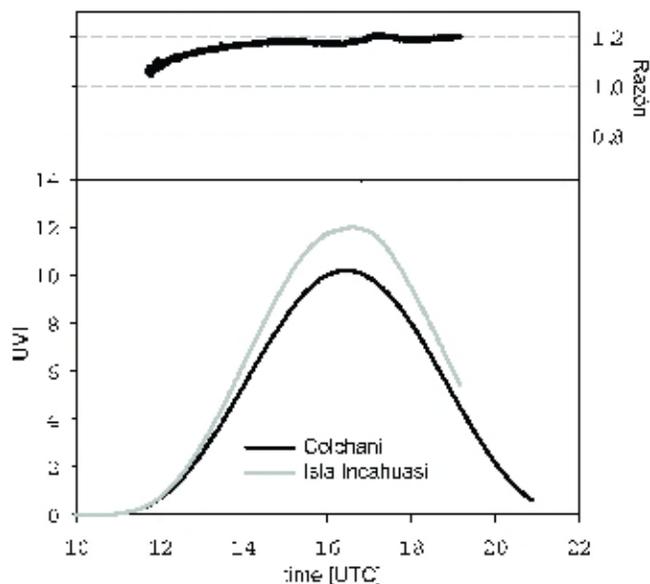


Figura 7. Intercomparación de los IUV medidos en Colchani (instrumento 399), fuera del Salar, y en la Isla Incahuasi (instrumento 001) cerca al centro del Salar de Uyuni en mayo 14, 2005.

la razón de las medidas realizadas por los dos detectores puede observarse en la figura 7. Los datos del detector 001 fueron corregidos de acuerdo al análisis realizado en la sección 2 (ver figura 2). Por esta razón la mayor parte de las desviaciones observadas entre los dos instrumentos puede atribuirse al efecto del albedo sobre la irradiancia eritémicamente efectiva. La mayor parte del día los niveles de radiación UV medidos en la Isla Incahuasi, dentro del Salar, son aproximadamente 20% más altos que los medidos en Colchani. Esta razón, sin embargo, muestra una disminución para ángulos solares bajos en la mañana, comportamiento que puede ser atribuido a una distinta respuesta azimutal de los dos detectores o a variaciones en la respuesta coseno. Además, dada la localización de los sitios de medida, al menos en el caso de Colchani, puede observarse que existe una clara asimetría en la radiación UV entre la tarde y la mañana. Lamentablemente, por razones logísticas, no se pudieron hacer mayores verificaciones de estas hipótesis.

5. SIMULACIONES

Simulaciones del efecto del albedo se realizaron con el modelo STAR [22,23]. La figura 8 muestra el resultado de un análisis de sensibilidad del IUV para diferentes alturas solares y características de la superficie típicas del Altiplano boliviano. Las simulaciones se realizaron para una elevación de la superficie de 3 700 m snm y una presión correspondiente de 650 hPa. La columna de ozono se fijó a 250 DU, valor promedio para esa época del año. Basados en las medidas del fotómetro NOLL se decidió usar como dato de entrada al modelo aerosoles tipo “continental limpio” con un espesor óptico de 0.05 a 550 nm [24].

En general el IUV se incrementa fuertemente con la

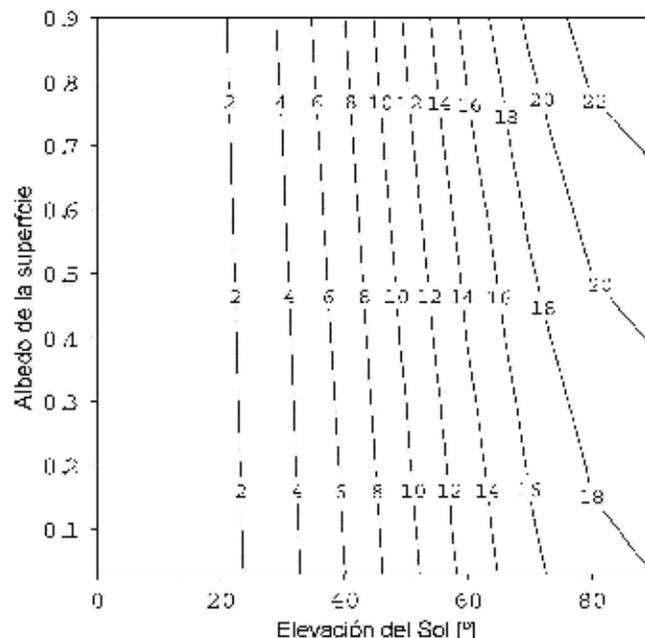


Figura 8. IUV modelado como función de la elevación del sol y el albedo de la superficie. El contenido total de ozono fue fijado en 250 DU; la presión en 650 hPa; la altitud en 3 700 m snm; y el espesor óptico de los aerosoles a 550 nm en 0.05.

elevación del sol debido a la reducción del camino óptico a través de la atmósfera. Hay además un marcado incremento del IUV con la reflectividad de la superficie. Procesos de dispersión múltiple, especialmente por moléculas de aire, redirigen hacia abajo parte de la radiación reflejada por la superficie, reforzando de este modo la radiación que va hacia dicha superficie. La figura 9 presenta el efecto del incremento del albedo de la superficie sobre la irradiancia eritémicamente efectiva medida por el IUV. En esta simulación se incrementó el albedo de la superficie de 0.2 [25,26] a 0.7 [27,28] para simular los valores esperados [29] y medidos de las superficie alrededor y dentro del Salar. La simulación se llevó a cabo para alturas a nivel del mar y 3 700 m snm. El incremento del IUV debido a los cambios de albedo muestra solamente una débil dependencia con altura del sol. Un máximo suave ocurre alrededor de 20°. El efecto del albedo a nivel del mar (símbolos abiertos) es marcadamente más alto que a 3 700 m snm (símbolos llenos) lo que muestra la fuerte dependencia de los procesos de dispersión múltiple con la densidad del aire.

6. DISCUSIÓN

Se investigó el efecto que tiene una superficie con alto albedo sobre la irradiancia UV eritémicamente efectiva. Medidas obtenidas a través de una campaña de campo en el Salar de Uyuni, y cálculos a través de modelos fueron empleados para este propósito. La irradiancia UV eritémicamente efectiva fue medida a través de tres radiómetros colocados simultáneamente dentro y fuera del Salar a diferente distancia del borde del mismo. Para poder realizar una adecuada comparación e interpretación

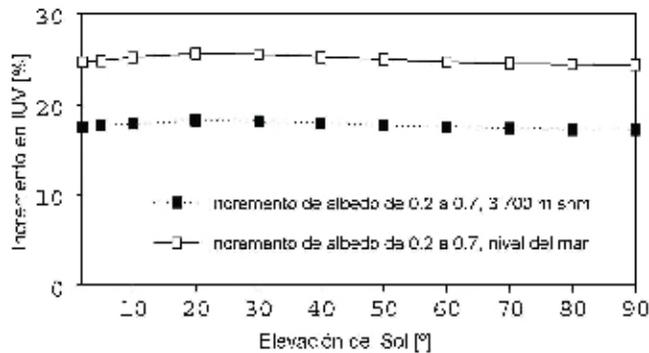


Figura 9. Incremento porcentual en el IUV, derivado de modelos, debido al incremento del albedo de la superficie como función de la elevación del sol. Los parámetros usados son los mismos que los especificados en la Fig. 8.

de los datos, los instrumentos fueron calibrados entre sí. El resultado de esta intercalibración mostró que las respuestas entregadas por los radiómetros tenían una exactitud relativa del 2%, valor que es más alto que el 5% típico para radiómetros del tipo usados en el experimento. Las medidas tomadas dentro del Salar muestran un claro incremento de irradiancia UV eritémicamente efectiva respecto de medidas tomadas donde el albedo no es tan alto (i.e. en las afueras del Salar). Eso muestra la aún importante contribución de procesos de dispersión múltiple por las moléculas de aire a la altura del Salar. Los valores medidos en Isla Incahuasi, casi en el centro del Salar, muestran un incremento de alrededor del 20% comparado con las medidas tomadas en Colchani, a solo 5 km del borde del Salar para una elevación del sol de 50°. Estas medidas muestran también que este valor se reduce para alturas solares menores. A pesar de eso, para alturas que están entre 25° y 50°, máxima altura del sol durante la campaña, existe una excelente correspondencia entre el incremento medido del IUV (usado en este trabajo como medida física de la irradiancia UV eritémicamente efectiva) y los cálculos de transferencia radiativa realizados en una dimensión cuando el albedo se incrementa de 0.2 a 0.7. Sin embargo, en contraposición a lo medido, los cálculos hechos por los modelos predicen un débil máximo para alturas del sol alrededor de 20° y prácticamente ningún efecto debido alturas del sol pequeñas. Esta discrepancia puede deberse a la pérdida de precisión en las medidas UV de los radiómetros para ángulos del sol bajos (debido también a la baja intensidad incidente para dichos ángulos) por lo que cualquier diferencia sistemática entre los radiómetros puede dar una falsa dependencia con la altura del sol. Adicionalmente, es posible que exista una dependencia del medio al albedo local debido a la presencia de asimetrías (rocas, vegetación, tipo de suelo, etc.) en los lugares de medida. Además debe tomarse en cuenta que el albedo medido en un punto está influenciado por las condiciones circundantes las cuales tiene un efecto hasta de decenas de kilómetros. Un estudio detallado de este efecto sólo será posible a través de un estudio más largo

y minucioso en el futuro.

La reflectividad para radiación UV eritémicamente efectiva se determinó que vale 0.69 ± 0.02 . Este valor no muestra prácticamente dependencia con la altura del sol, lo cual sugiere la homogeneidad de la superficie, al menos para esta parte del espectro electromagnético, y propiedades de reflexión prácticamente isotrópicas en el Salar. Estas propiedades ópticas juntamente a condiciones climáticas poco variables, bajo ozono total, poca presencia de aerosoles y baja nubosidad la mayor parte del año, hacen del Salar de Uyuni un lugar ideal para realizar estudios de transferencia radiativa así como para la calibración de instrumentos a bordo de satélites.

REFERENCIAS

- [1] WHO, Global solar UV Index – A practical guide, A joint recommendation of WHO, WMO, UNEP, and ICNIRP, 2002.
- [2] J. Longstreth, F.R.d. Gruil, M.L. Kripke, S. Abseck, F. Arnold, H.I. Slaper, G. Velders, Y. Takizawa, J.C.v.d. Leun, Health risks, *J. Photochem. Photobiol. B* 46 (1–3) (1998) 20–39.
- [3] M. Pfeifer, P. Koepke, J. Reuder, Effects of altitude and aerosols on UV radiation, *J. Geophys. Res.* 111 (2006) D01203, doi:10.1029/2005JD006444.
- [4] F. Zaratti, R. Forno, J. Garcia-Fuentes, M. Andrade, Erythemally weighted UV variations at two altitude locations, *J. Geophys. Res.* (2003), doi:10.1029/2001JD000918.
- [5] INE, National Institute of Statistics, Bolivian census, 2001.
- [6] M. Deguenther, R. Meerkoetter, A. Albold, G. Seckmeyer, Case study on the influence of inhomogeneous surface albedo on UV irradiance, *Geophys. Res. Lett.* 25 (19) (1998) 3587–3590.
- [7] J. Lenoble, Modeling of the influence of snow reflectance on ultraviolet irradiance for cloudless sky, *Appl. Opt.* 37 (12) (1998) 2441–2447.
- [8] I. Smolskaia, M. Nunez, K. Michael, Measurements of erythemal irradiance near Davies Station, Antarctica: effect of inhomogeneous surface albedo, *Geophys. Res. Lett.* 26 (10) (1999) 1381–1384.
- [9] S. Wuttke, G. Seckmeyer, G. König-Langlo, Measurements of spectral snow albedo at Neumayer, Antarctica, *Ann. Geophys.* 24 (2006) 7–21.
- [10] M. Huber, M. Blumthaler, J. Schreder, B. Schallhart, J. Lenoble, Effect of inhomogeneous surface albedo on diffuse UV sky radiance at a high-altitude site, *J. Geophys. Res.* 109 (2004) D08107, doi:10.1029/2003JD004013.
- [11] R.A.C. Lamparelli, F.J. Ponzoni, J. Zullo Jr., G.Q. Pellegrino, Y. Arnaud, Characterization of the Salar de Uyuni for in-orbit satellite calibration, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41 (6) (2003) 1461–1468.
- [12] G. Honninger, N. Pobrowski, E.R. Palenque, R. Torrez, U. Platt, Reactive bromine and sulfur emissions at Salar de Uyuni, Bolivia, *Geophys. Res. Lett.* 31 (2004) L04101.
- [13] M. Morys, F.M. Mims III, S. Hagerup, S. Anderson, A. Baker, J. Kia, T. Walkup, Design, calibration and performance of MICROTUPS II handheld ozone monitor and Sun photometer, *J. Geophys. Res.* 106 (D13) (2001) 14573–14582.
- [14] G.A. d'Almeida, R. Jaenicke, P. Roggendorf, D. Richter,

- New sunphotometer for network operation, *Appl. Opt.* 22 (23) (1983) 3796–3801.
- [15] A. McKinley, B. Diffey, A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin, *Commission Int. Eclairage (CIE)* 6 (1987) 17–22.
- [16] WMO, Report of the WMO meeting of experts on UV-B measurements, data quality and standardization of UV indices, WMO Technical Report No. 95, 1994.
- [17] A. Oppenrieder, P. Hoeppe, P. Koepke, J. Reuder, J. Schween, J. Schreder, Simplified calibration for broadband solar ultraviolet radiation measurements, *Photochem. Photobiol.* 78 (6) (2003) 603–606.
- [18] B.A. Bodhaine, E.G. Dutton, R.L. McKenzie, P.V. Johnston, Calibrating broadband UV instruments: ozone and solar zenith angle dependence, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 15 (1998) 916–926.
- [19] WMO, Report of the WMO–WHO meeting of experts on standardization of UV indices and their dissemination to the public, WMO Technical Report No. 143, 1997.
- [20] WMO, Report of the LAP/COST/WMO intercomparison of erythemal radiometers (Thessaloniki, Greece, 13–23 September 1999), WMO Technical Report No. 141, 2001.
- [21] WMO, Instruments to measure solar ultraviolet radiation, part II: broadband instruments measuring erythemally weighted solar irradiance, WMO-GAW Report No. 164, 2005.
- [22] A. Ruggaber, R. Dlugi, T. Nakajima, Modelling radiation quantities and photolysis frequencies in the troposphere, *J. Atmos. Chem.* 18 (1994) 171–210.
- [23] H. Schwander, P. Koepke, A. Kaifel, G. Seckmeyer, Modification of spectral UV irradiance by clouds, *J. Geophys. Res.* 107 (D16) 4296. doi:10.1029/2001JD001297.
- [24] M. Hess, P. Koepke, I. Schult, Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, *Bull. Am. Met. Soc.* 79 (1998) 831–844.
- [25] M. Blumthaler, W. Ambach, Solar UVB-albedo of various surfaces, *Photochem. Photobiol.* 48 (1) (1988) 85–88.
- [26] R.L. McKenzie, M. Kotkamp, Upwelling UV spectral irradiances and surface albedo measurements at Lauder, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.* 23 (14) (1996) 1757–1760.
- [27] T.C. Grenfell, S.G. Warren, P.C. Mullen, Reflection of solar radiation by the Antarctic snow surface at ultraviolet, visible, and near infrared wavelength, *J. Geophys. Res.* 99 (1994) 18669–18684.
- [28] S.G. Warren, W.J. Wiscombe, A model for the spectral albedo of snow. II: snow containing atmospheric aerosols, *J. Atmos. Sci.* 37 (1980) 2734–2745.
- [29] P. Koepke, J. Reuder, H. Schwander, Solar UV radiation and its variability due to the atmospheric components, *Recent Res. Devel. Photochem. Photobiol.* 6 (2002) 11–34.