

MEDIDAS DE ALBEDO EN UV-B EN EL SALAR DE UYUNI ALBEDO'S MEASUREMENTS IN UV-B AT UYUNI'S SALT LAKE (BOLIVIA)

FRANCESCO ZARATTI[†], RICARDO FORNO, GONZALO GUTIÉRREZ,
ROGER APAZA & FERNANDO VELARDE

Laboratorio de Física de la Atmósfera

Instituto de Investigaciones Físicas, FCPN, UMSA

(Recibido el 28 de julio de 2010; aceptado el 11 de agosto de 2010)

RESUMEN

Se reportan los resultados finales del proyecto bianual, centrado en dos campañas de medición de la Radiación Ultravioleta (RUV) en el Salar de Uyuni: la primera en mayo de 2008 y la otra en noviembre de 2008. Los datos recogidos en ambas campañas y el análisis respectivo han permitido llegar a importantes resultados en los dos objetivos principales del proyecto: medida del albedo superficial en la banda UV y cuantificación del alcance del mismo en la región circundante al Salar. En el primer objetivo, se han encontrado indicios sólidos de que el albedo depende no sólo de la estación del año, como se podría esperar debido al régimen de lluvias localizado en los meses de enero a marzo, sino también de los cambios climáticos que se están dando en la región, lo que podría conllevar una disminución del albedo, señal del “ensuciamiento” del Salar. Adicionalmente se ha medido el alcance de los efectos de albedo en el Salar, pero el análisis no muestra aún resultados concluyentes.

Descriptores: radiación UV — procesos radiativos — radiación solar (albedo)

Código(s) PACS: 61.80.Ba, 92.60.Vb

ABSTRACT

We report the final results of a biannual project concerning two measurement campaigns of ultraviolet radiation (RUV) at Uyuni Salt Lake: in May and November 2008. The gathered data and their respective analysis resulted in important findings relating to the projects principle objectives: the measurement of superficial albedo of the UV band and the quantification of the extent of albedo in the area surrounding the Uyuni salt lake. In the first case we found that the albedo depends not only on the time of year, such as, the rainy season between January and March but also on climate change effects in the region which could lead to a decrease in albedo, a sign of the salt lakes environmental contamination in particular from anthropogenic activities. In addition we measured the extent of the albedo effect in the salt lake and surrounding area however the analysis of these results has so far given inconclusive findings.

Subject headings: UV radiation — radiative processes — solar radiation (albedo)

1. ANTECEDENTES

El año 2004 se realizó una campaña, junto a colegas de la Universidad e Munich en el Salar de Uyuni para medir el albedo “plano” en UV y realizar mediciones de la irradiancia solar en la banda UV. Si bien esa campaña resultó exitosa en cuanto se pudo medir el albedo y la irradiancia UV en diferentes sitios del Salar, quedaron algunas preguntas abiertas que el presente trabajo intenta responder. En especial nos interesaba conocer el alcance que tiene el albedo UV del Salar en su entorno, o sea hasta dónde afecta a la irradiancia total el cambio de albedo UV del suelo, con la mirada puesta en la problemática del cambio de uso de suelo.

El desarrollo, dificultades y resultados de la

I campaña en el Salar (mayo de 2008), han sido reportadas en el artículo “Resultados preliminares del proyecto: *Medidas de albedo en el Salar de Uyuni*” presentado en noviembre de 2009. A partir de los resultados de esa campaña, en el presente artículo analizaremos los datos colectados en la II campaña (noviembre de 2008).

2. OBJETIVOS

El proyecto fue planificado para un período de dos años, mediante dos campañas, una exploratoria y otra final. La campaña exploratoria, realizada en mayo de 2008, tenía el objetivo de medir el albedo del Salar en diferentes lugares, diferentes por su distancia a la orilla o por las características de la superficie (Zaratti et al. 2008).

La hipótesis para verificar era que la superficie del Salar no es homogénea y le corresponde más de un

[†]Email: fzaratti@fiumsma.edu.bo

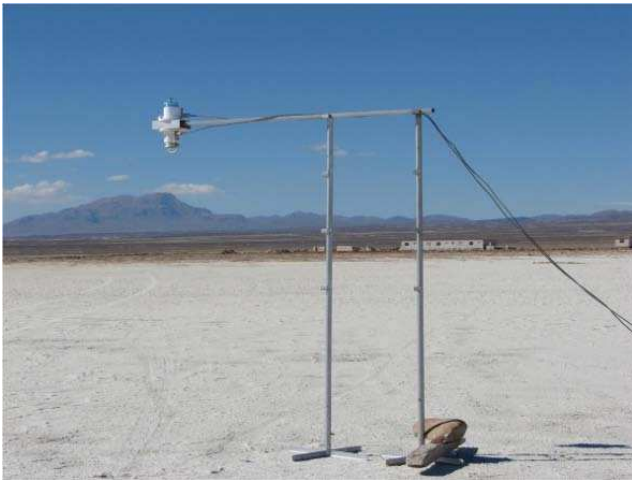


FIG. 1.— Arreglo experimental utilizado para medir el albedo. El sistema permite la variación de altura entre los domos y el suelo y, además, permite calibrar la horizontalidad.

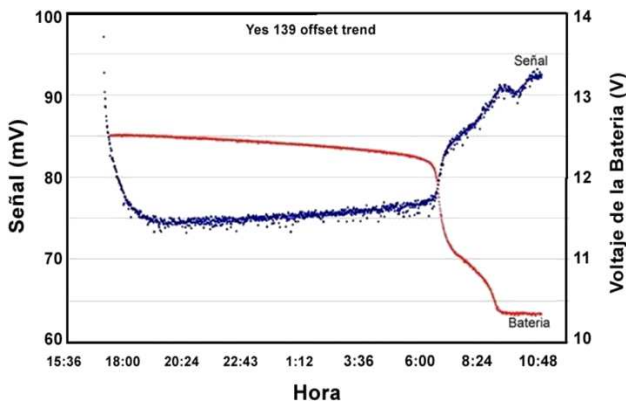


FIG. 2.— La imagen muestra la dependencia del valor del offset del radiómetro YES_139 con el valor del voltaje proporcionado por la batería de alimentación en un experimento realizado en laboratorio.

valor de albedo. Asimismo, se asume que el albedo depende de la época del año, razón por la cual se planeó repetir la campaña en noviembre, aplicando las lecciones aprendidas.

El otro objetivo del proyecto era medir la irradiancia en función de la distancia a la orilla, suponiendo que, a medida que nos adentramos en el Salar la irradiancia aumenta y a medida que nos alejamos hacia el altiplano la irradiancia disminuye. La pregunta interesante es: ¿a qué distancia de la orilla se deja de percibir el efecto de borde?

3. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA

En la campaña de noviembre de 2008 participaron dos investigadores, un tesista y un técnico y en ella se realizaron varias innovaciones, como consecuencia de los resultados de la campaña de mayo.

La lección principal aprendida en la campaña de mayo fue la dificultad de realizar mediciones alimentando los equipos con baterías. En un primer momento se optó por usar baterías de motos, por su fácil manejo y recarga, pero los resultados no fueron buenos, debido al elevado consumo de carga de los equipos durante las más de seis horas de trabajo dentro

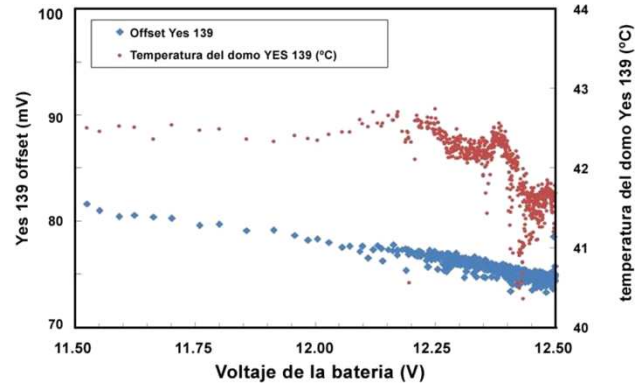


FIG. 3.— Variación del Offset y de la temperatura del domo del instrumento YES 139 con el valor del voltaje de la batería.

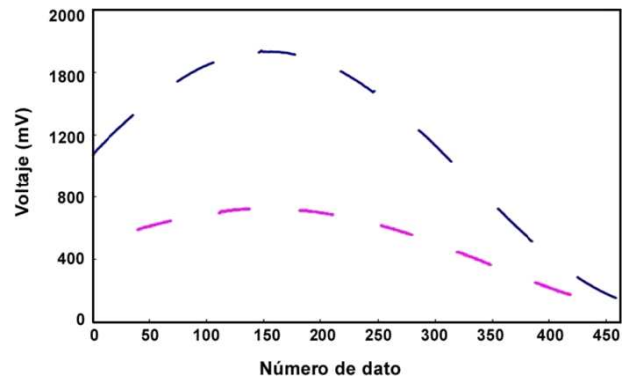


FIG. 4.— Datos originales (en milivoltios) tomados por el instrumento YES 139 conectado a un datalogger Campbell que tenía un divisor de voltaje para evitar saturaciones. La curva superior es la irradiancia medida con el domo mirando al cenit, la inferior mirando al nadir.

del Salar, sin posibilidad de recarga. Las consecuencias principales se manifestaban en variaciones de los valores del offset de los radiómetros, en función del voltaje de las baterías.

El equipo instrumental consistía de dos radiómetros de radiación ultravioleta YES UVB-1. Se trata de dos radiómetros de banda ancha (280-320 nm) fabricados por *Yankee Environmental System Inc.* que miden la radiación solar global UV-B. Usan filtros de vidrio colorado y fósforo UV-B que convierte la radiación UV-B en luz verde, la cual es medida por fotodetectores de estado sólido. Sus principales características de operación son (Yankee Environmental System (YES) 1997): respuesta espectral característica (Diffey simulada), respuesta de coseno $\pm 5\%$ (para $0^\circ < \text{SZA} < 60^\circ$), tiempo de respuesta ± 0.1 s y temperatura de operación entre -40°C y $+40^\circ\text{C}$.

El primero de los radiómetros funciona en el LFA desde el año 1998 (YES 138) y otro ha sido recientemente adquirido (llamado YES 139). Asimismo se contó con dos dataloggers Campbell CR-200 que fueron adecuados para funcionar con los radiómetros y dos GPS para registrar la posición de los sitios de medición.

Un aspecto preocupante era el desgaste que presentaba el YES 138 después de más de 10 años de operación casi continua y en ambientes extremos,

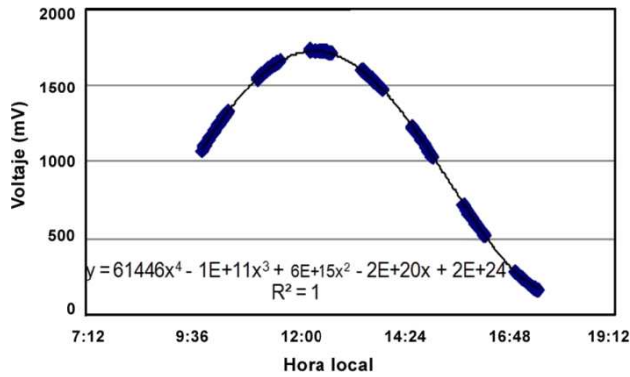


FIG. 5.— Curva de irradiancia UVB, representada en mV, del YES 139 con el domo mirando al cenit (día 17/11/08) interpolada con un polinomio de cuarto grado.

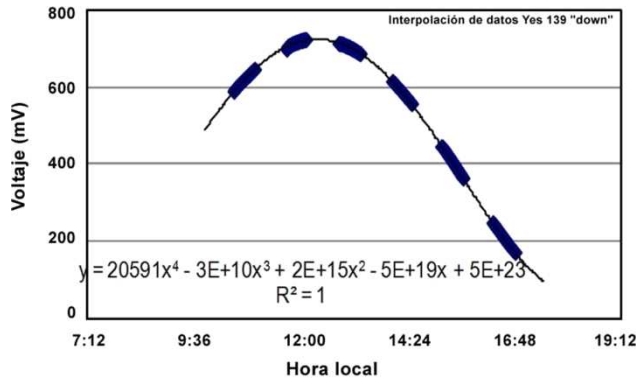


FIG. 6.— El equivalente de la Fig. 5 con el domo mirando hacia abajo (día 17/11/08).

como Chacaltaya. Por esa razón se planificó realizar medidas “en paralelo” de los dos radiómetros, en el sentido que cada instrumento tomara datos independientemente del otro, como se explicará más adelante.

4. REALIZACIÓN DE LA CAMPAÑA

Las medidas de la segunda campaña se realizaron durante cinco días, del 15 al 19 de noviembre, con el apoyo logístico de una agencia de turismo local. Los cinco días fueron despejados, registrándose la insolación máxima anual, debido al paso del sol por el cenit de esa localidad. La rutina diaria fue ajustada a los resultados del día y a la emergencia de algunos problemas que se presentaron con las medidas.

En efecto, los primeros dos días se realizaron medidas de albedo en el mismo sitio de las medidas de albedo de la anterior campaña ($20^{\circ} 27' 41''$ S, $67^{\circ} 15' 24''$ W, 3670 msnm), esto es, casi en el centro del Salar, pero con los dos radiómetros en posición fija (uno mirando al zenit y el otro al nadir), utilizando el mismo arreglo experimental ya probado durante la campaña de mayo (ver Fig. 1).

El tercer día, debido a algunas dificultades de intercalibración bajo condiciones térmicas y eléctricas diferentes, como se explicará más adelante, se repitieron las medidas alternando la posición de los radiómetros cada 20 minutos.

El día martes 18 se realizó el cruce del Salar midiendo la irradiancia RUV mediante uno de los

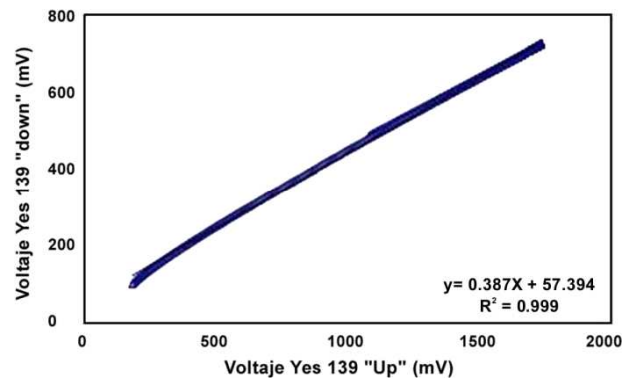


FIG. 7.— Valor del albedo UVB, medido mediante comparación de las curvas de irradiancia con domo mirando hacia arriba (eje abscisas) y hacia abajo (eje ordenadas) para el día 17/11/08. Los valores, en mV, representan la mitad del valor real.

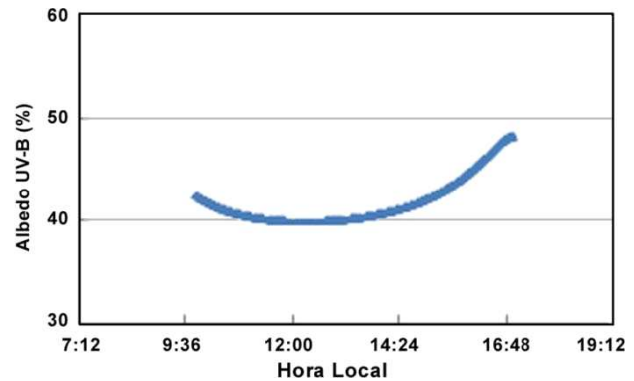


FIG. 8.— Curva del albedo UVB instantáneo del YES 139 (día 17/11/09).

radiómetros en sitios distantes unos 15 km entre sí, a medida que nos adentrábamos en el Salar hasta el centro del mismo. Luego, a la vuelta, se repitieron las medidas hasta unos 10 km desde la orilla en el altiplano. El segundo radiómetro se quedó midiendo en un lugar fijo (el Hotel de Sal a unos 6 km de la orilla), como referencia.

Finalmente, el día miércoles 19 se realizó una medida de absorción sobre superficies con diferente inclinación.

Cabe añadir que, en cada sitio donde se realizaron medidas, se tomaron muestras de la superficie de sal para ser analizadas posteriormente.

5. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE ALBEDO

Con base a las lecciones aprendidas de la primera campaña, se puso particular atención a los problemas del offset (y de corriente oscura) de cada instrumento.

En efecto, el estudio realizado en el LFA ha mostrado la dependencia del offset del voltaje de la batería, siendo estable entre 12 y 12.5 V, condiciones que no siempre se puede mantener cuando se trabaja en el campo.

Asimismo se puso en evidencia un transitorio en el tiempo de estabilización de la temperatura del sensor de aproximadamente 20 minutos, lo que invalidaba algunos datos que se tomaron durante ese tiempo, después de conectar los instrumentos a la batería (ver Figs. 2 y 3).

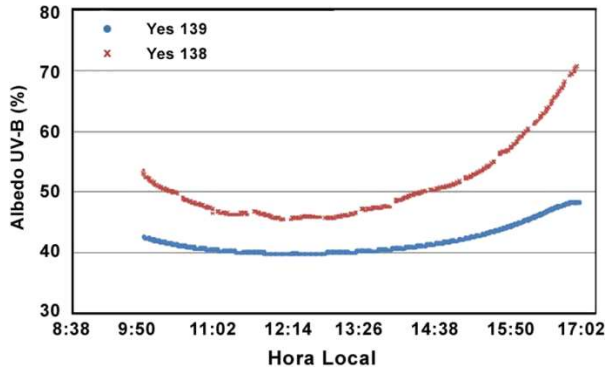


FIG. 9.— Variación temporal del albedo medido en la campaña de mayo de 2008. Es evidente el desgaste del instrumento YES 138.

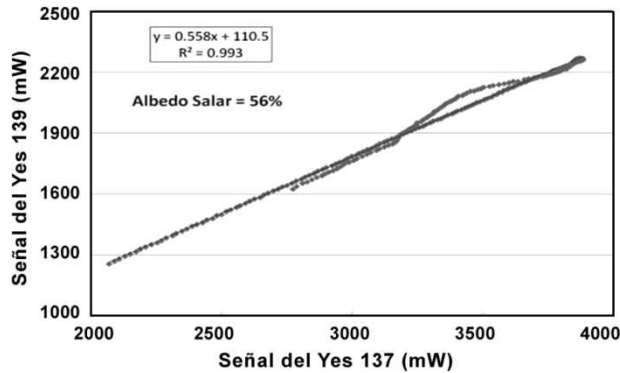


FIG. 10.— Intercomparación de las señales de los domos YES 139 (en dirección al nadir) y YES 137 (en dirección al cenit) durante la campaña de mayo 2008. La pendiente de la recta de regresión nos muestra el albedo del lugar.

En particular, se llegó a la conclusión de que era preferible utilizar medidas de cada instrumento por separado (como se hizo el día 17) que intentar corregir y recalculer los datos con radiómetros en posición fija (datos de los días anteriores). Por tanto, sobre la base de los datos originales, mostrados en la Fig. 4, se procedió a reconstruir, por interpolación las curvas con el domo arriba y con el domo abajo.

Para simplificar el cálculo se normalizaron los datos de ambas series, se hizo un ajuste de curva de cuarto grado, lo más apropiado en torno al mediodía, se interpolaron las curvas y se volvió a los datos en mV. Las figuras siguientes muestran el resultado final.

Una vez obtenidas las curvas anteriores, sin necesidad de mayores ajustes, tratándose del mismo instrumento, se calculó el valor del albedo en UV con diferentes métodos. El primero consiste en graficar las dos curvas una contra la otra y deducir, de la pendiente, el valor del albedo A. De ese modo, se halla el valor: $A = 0.387 \pm 0.001$ (Fig. 7).

Si se obligara a la recta de ajuste a pasar por el origen, lo que parece lógico tratándose de un mismo instrumento, el valor del albedo resultaría: $A' = 43\%$.

El otro método consiste en calcular el valor instantáneo del albedo, para cada dato, y luego calcular el valor medio. La Fig. 8 muestra los valores del albedo “instantáneo” medidos.

En el intervalo temporal 10am – 4pm, las horas

TABLA 1
VALORES DEL ALBEDO MEDIDOS EN LAS TRES CAMPAÑAS REALIZADAS POR EL LFA-UMSA.

Fecha	Albedo medido
mayo 2005	69%
mayo 2008	56%
noviembre 2008	39%

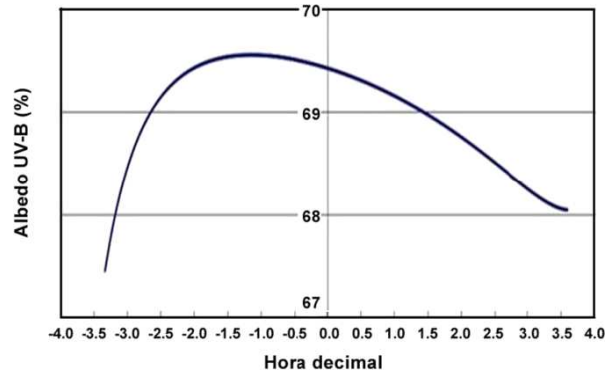


FIG. 11.— Variación temporal del albedo medido en la campaña de mayo de 2005 en torno al medio día (cero en las abscisas). La asimetría cenital es despreciable.

centrales del día, el albedo resulta $A'' = 41.0\% \pm 1.2\%$. En resumen, el albedo medido con el radiómetro YES 139 está entre 39 y 41 %.

Cuando analizamos los datos del YES 138, tomados al mismo tiempo que los del YES 139 pero en sentido invertido, obtenemos los valores respectivos:

$$A = 39\% (R^2 = 1).$$

$$A' = 47.6\% (R^2 = 0.92) \text{ entre } 10\text{am y } 4\text{pm}.$$

$$A'' = (49 \pm 3)\% \text{ entre } 10\text{am y } 4 \text{ pm}.$$

Las significativas diferencias en el albedo instantáneo del YES 138, se deben posiblemente a variaciones de valores del offset con la temperatura y el voltaje de la batería a lo largo del día, pero es importante recordar, además, que el YES 138 se ha demostrado muy poco confiable, debido a su largo tiempo de vida (10 años). Una prueba de esta afirmación es la curva temporal del albedo del YES 138, comparada con la equivalente del YES 139 (Fig. 9).

6. DISCUSIÓN DE LAS MEDIDAS DE ALBEDO

Como se mencionó en la sección 4, en mayo y en noviembre de 2008 las medidas de albedo se realizaron en el mismo sitio, localizado con los GPS y con señales dejadas en el lugar. La Fig. 10 muestra el resultado obtenido con dos radiómetros, el 137 y el 139, en esa campaña.

Además se cuenta con las medidas de albedo realizadas, con otra clase de radiómetro (Scie-tech), en mayo del año 2005 (Reuter et al. 2007). Por tanto, podemos intentar una comparación somera entre las tres medidas, de acuerdo a la Tabla 1:

La Tabla 1 nos muestra dos fenómenos. Por un lado no debería sorprender que el albedo en noviembre sea inferior al albedo en mayo, por la simple razón que en mayo el Salar resiente todavía de la época de lluvias, mientras en noviembre la superficie viene de soportar más de seis meses de sequía y vientos

que suelen transportar polvo y tierra hacia el Salar desde el Altiplano. Desde luego, el exacto valor de esa disminución del albedo dependerá de las particularidades de la estación de lluvias primero y de vientos después. En efecto, cuando se analizan cortes de la costra del Salar es posible reconocer diferencias en la acumulación de tierra en el subsuelo del Salar, dependientes del clima.

Más interesante es la disminución de un 20% del albedo en el mes de mayo a distancia de tres años. Si bien se trata de instrumentos diferente, y por tanto con una diferente respuesta coseno y espectral, es posible asumir que esas diferencias no son suficientemente significativas como para explicar las diferencias de los albedos, particularmente para pequeños ángulos cenitales, como a los que se hicieron las medidas en el mes de noviembre.

Asimismo los lugares de observación fueron distintos; sin embargo, en vista de que el año 2005 se realizó la medida a menos de 10 km de la orilla del Salar (y, por tanto, dentro del rango de influencia de la frontera Salar-Altiplano), es más llamativo que esa medida resulte bastante mayor a la realizada en mayo de 2008.

Por tanto, sin descartar fluctuaciones locales del clima, es posible avanzar la hipótesis, con cargo a comprobación futura, de un real "ensuciamiento", o obscurecimiento, del Salar, debido no tanto, como a veces se escucha, a los efectos del turismo masivo sino a un verdadero cambio climático de la región que se manifiesta, de acuerdo a algunos datos meteorológicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en lluvias más concentradas en los primeros tres meses del año, con períodos de sequía más prolongados.

De hecho los resultados de los modelos climáticos más acreditados apuntan a patrones climáticos como el que acabamos de describir (mayor duración de la época seca) en la región de los Andes Occidentales (Magrin et al. 2007).

7. MEDIDAS DEL ALCANCE DEL ALBEDO

El otro objetivo del proyecto era medir el alcance de la influencia de una región con determinado albedo (el altiplano) sobre la irradiancia medida a diferente distancia de aquella en una región de diferente albedo (Salar).

Para ese fin se diseñó un experimento para medir, estáticamente, la irradiancia durante períodos de 20 minutos en diferentes puntos dentro del Salar (en lo posible sobre el mismo paralelo, para evitar correcciones de latitud), y así poner en evidencia el porcentaje de disminución de la irradiancia al acercarse a

la orilla del Salar. Para fines de comparación, uno de los radiómetros (YES 138) se quedó midiendo en un punto fijo, cerca del Hotel de Sal, a 6 km de la orilla.

El análisis de los resultados se ha revelado más complejo de lo esperado y requiere más tiempo y dedicación. De hecho, las diferencias que se quieren medir no son muy significativas, debido a que están tomadas cerca al mediodía y las correcciones temporales son bastante delicadas. Adicionalmente se tuvieron algunos percances experimentales que obligaron a un trabajo aún más complejo de reconstrucción de la curva con base a los valores del día anterior.

Por todas estas razones estimamos que este tema merece un artículo a parte, el cual ya está bastante avanzado.

8. CONCLUSIONES

Las dos campañas, llevadas a cabo en el marco del proyecto bianual, han permitido aprender algunas lecciones y han logrado importantes resultados.

Las lecciones se refieren principalmente a la dificultad, no siempre considerada, de realizar medidas ópticas en condiciones extremas, con fuentes de potencia no confiables, con instrumentos que requieren particular cuidado, debido a su tiempo de uso y al tiempo limitado que se dispone.

No obstante, se han logrado resultados que ponen en discusión anteriores conclusiones, por la dinámica climática de la región del Salar. El principal es el ensuciamiento progresivo del Salar, debido posiblemente a la acumulación de polvo por la reducción del período anual de lluvias, aspecto que deberá ser confirmado por el análisis de datos meteorológicos.

Desafortunadamente la estación situada en la isla central del Salar (Incahuasi) ha estado parada y abandonada en los últimos años, pero se tienen datos de la estación de Uyuni.

En todo caso, los resultados obtenidos, alientan al Laboratorio de Física de la Atmósfera a emprender otra campaña en un futuro próximo para confirmar y cuantificar las anomalías encontradas.

AGRADECIMIENTOS

Nuestros sinceros agradecimientos al personal del Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) por el apoyo generoso en la ejecución de las campañas, empezando por el Director Dr. Wilfredo Tavera. Asimismo agradecemos el apoyo logístico proporcionado satisfactoriamente por las empresas Peru Bolivian Tours y Licancabur. Finalmente, agradecemos a la Empresa Ferroviaria Andina por el transporte gratuito de los equipos a Uyuni.

REFERENCIAS

- Magrin, G., Gay García, C., Cruz Choque, D., Giménez, J., Moreno, A., Nagy, G., Nobre, C., & Villamizar, A. 2007, Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615)
- Yankee Environmental System (YES). 1997, UVB-1 Ultraviolet Pyranometer (Installation and User Guide, Version 2.0)
- Reuter, J., Ghezzi, F., Palenque, E., Torrez, R., Andrade, M., & Zaratti, F. 2007, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 87, 1
- Zaratti, F., Forno, R., Gutierrez, G., Apaza, R., & Velarde, F. 2008, Resultados preliminares del proyecto Medidas de albedo en el Salar de Uyuni (IIF-UMSA, Informe gestión 2008)