

MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR DIFUSA EN SALTA: DETERMINACIÓN CUALITATIVA DE ANISOTROPÍA DE CIELO.

G. A. Salazar¹, L. A. Hernandez^{1,2}, G. G. Romero¹ y L. R. Saravia^{1,2}.

1-Facultad de Ciencias Exactas, 2-INENCO

Universidad Nacional de Salta

Avda. Bolivia 5150 - CP 4408FVY - Salta - Argentina

salazarg@unsa.edu.ar

RESUMEN. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al medir radiación solar difusa en la provincia de Salta haciendo hincapié en dos aspectos de la misma: sus valores en altura sobre el nivel del mar y sus características angulares. Se analizan los datos con el objeto de determinar la anisotropía en el cielo a medida que se mueve el Sol por la esfera celeste.

PALABRAS CLAVE: radiación difusa, medición en altura, espectros, anisotropía.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar global que recibimos a nivel de suelo presenta dos componentes: radiación solar directa, la que se recibe desde el disco, y la radiación solar difusa, que es el producto de la dispersión y de la absorción (y re-emisión) que experimenta la radiación al interactuar con las moléculas de gases presentes en la atmósfera.

Si bien para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, cuando se desean predecir valores de radiación solar global, los mismos se estiman utilizando modelos empíricos que usan una aproximación no espectral (de gran ancho de banda), la mayoría de los modelos usan aproximaciones empíricas y físicas, donde en la parte física se da importancia a los efectos que contribuyen a los procesos de extinción de la luz en la atmósfera. Es allí donde el análisis de espectros cobra importancia ya que éste permite estudiar detalladamente estos procesos (Gueymard 1993).

La radiación difusa se compone de tres partes: la primera es una parte isotrópica que se recibe uniformemente desde toda la esfera celeste. La segunda es la circunsolar difusa, resultante de la dispersión hacia delante (forward scattering) de la radiación solar y concentrada en la parte del cielo alrededor del disco solar y la tercera es el brillo de horizonte que se concentra cerca del horizonte y que es pronunciada en días de cielos claros. Estos tres ítems se tienen en cuenta en la mayoría de los modelos que estudian la radiación incidente total sobre superficies inclinadas (Duffie & Beckman 1991).

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN Y METODOLOGÍA PARA MEDIR.

Las mediciones de radiación solar difusa se realizaron en el Campus de la Universidad Nacional de Salta (lat. -24° 43' 45" long. -65° 24' 35.2") a 1216 metros s.n.m., en el Observatorio Astronómico de la U.N.Sa y en el paraje conocido como El Rosal (lat. -24° 23' 36" long. -65° 46' 6.9") a 3.350 metros s.n.m.. Las condiciones atmosféricas presentes en el momento de las mediciones eran de cielo claro y sin nubes (cloudless sky conditions).

El equipo utilizado para realizar las mediciones fue un espectroradiómetro LICOR LI-1800 provisto de un pequeño telescopio al que estaba conectado mediante una fibra óptica. El telescopio se adosó al cabezal de un trípode de cámara fotográfica, lo que le brindaba tres grados de libertad.

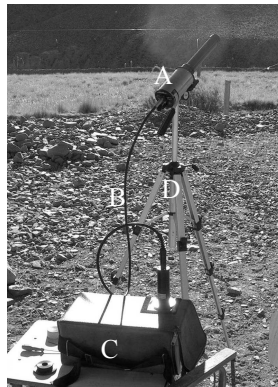


Imagen 1: Sistema de registro de espectros. A) Telescopio. B) Fibra óptica. C) Espectroradiómetro. D) Trípode.

El rango de longitudes de onda registrado fue de 400 nm a 1100 nm (es decir, visible e IR cercano), con lo cual se cubre aproximadamente un 66% del espectro solar total. La apertura del telescopio fue de 4°, es decir, la porción de cielo que se registraba en cada medición era muy pequeña. La resolución del instrumento es de 2 nm. El espectralradiómetro se calibró contra un piranómetro Eppley CM21, encontrándose que el error de medición es del orden del 1%.

Para las mediciones se eligieron 4 direcciones cardinales: Norte, Oeste, Sur y Este. Para cada dirección cardinal se tomaron 5 ángulos de inclinación del telescopio respecto del plano horizontal, α : 15°, 30°, 45°, 60° y 80°. De esta manera se obtuvieron datos de 20 puntos del cielo en cada serie de mediciones.

Luego de procesar los archivos se representaron los datos en una gráfica en cuya abcisa se tiene longitudes de onda y en la ordenada una escala que representa la irradiancia por longitud de onda ($W/m^2 \cdot nm$).

Para cada espectro registrado se calculó el valor de la irradiancia (W/m^2), realizando la integración de cada curva. De esta manera se dispone del valor de irradiancia proveniente de cada porción del cielo sensada.

RESULTADO DE LAS MEDICIONES

Mediciones realizadas en el Campus de la U.N.Sa:

En la Universidad se realizó una serie de toma de datos de radiación solar difusa en el observatorio astronómico. La ventaja de éste sitio, es que al encontrarse a más de 20 metros del suelo, se puede acceder al horizonte. Dichas mediciones se realizaron el 12 de mayo de 2005, entre las 8:30 y las 9:00 hora solar. El Sol se encontraba a una altitud promedio de 26,9° y el ángulo azimutal cambió de 125° a 131°.

En el gráfico 1 se presentan los espectros registrados para la inclinación 0° en todas las direcciones cardinales. Puede verse que los espectros registrados en las direcciones Este y Norte predominan sobre los demás. Esto es porque el Sol está en el cuadrante Este-Norte, mas cerca del Este.

Debe tenerse en cuenta también que al realizar las mediciones existía una condición atmosférica caracterizada por gran cantidad de polvo en suspensión. Esto se debe a que la zona donde se realizaron las mediciones (Ciudad de Salta) presenta otoños e inviernos secos. Además debe notarse que a menos de 1 Km. del sitio de medida se estaba construyendo una autopista, lo que provocó aumento de la cantidad de polvo presente en la atmósfera cercana al sensor.

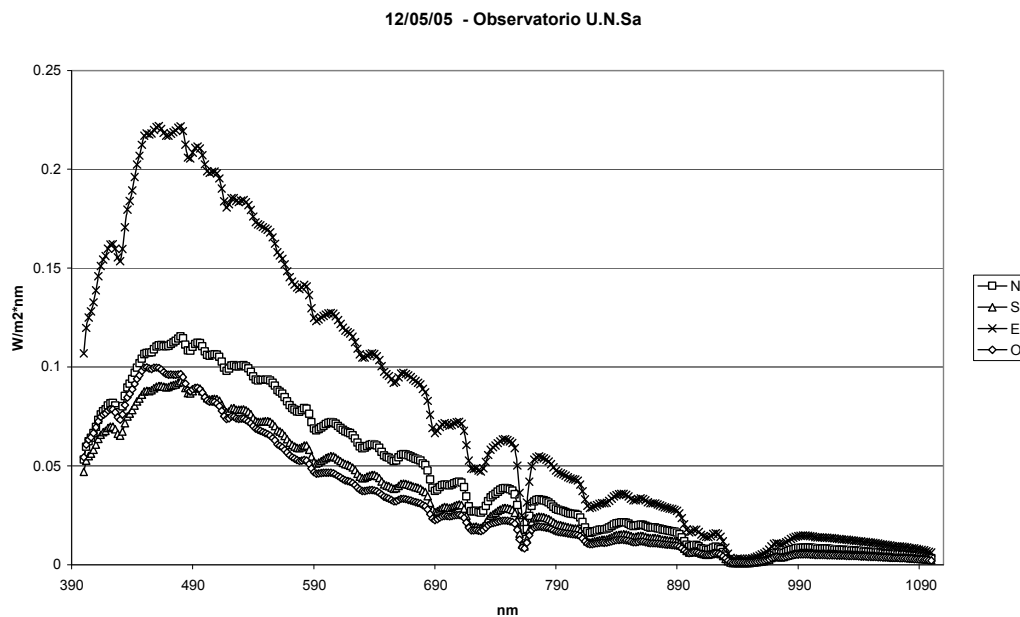


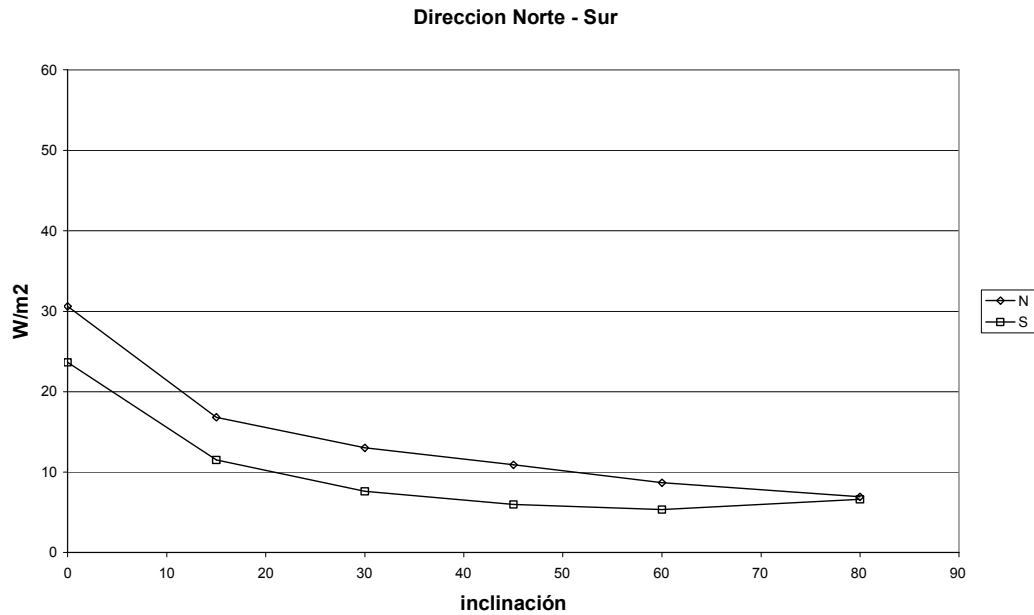
Grafico 1: Espectros medidos para 0° de inclinación del telescopio.

En la Tabla 1 se dan los valores calculados para las irradiancias en todas las direcciones y para todas las inclinaciones.

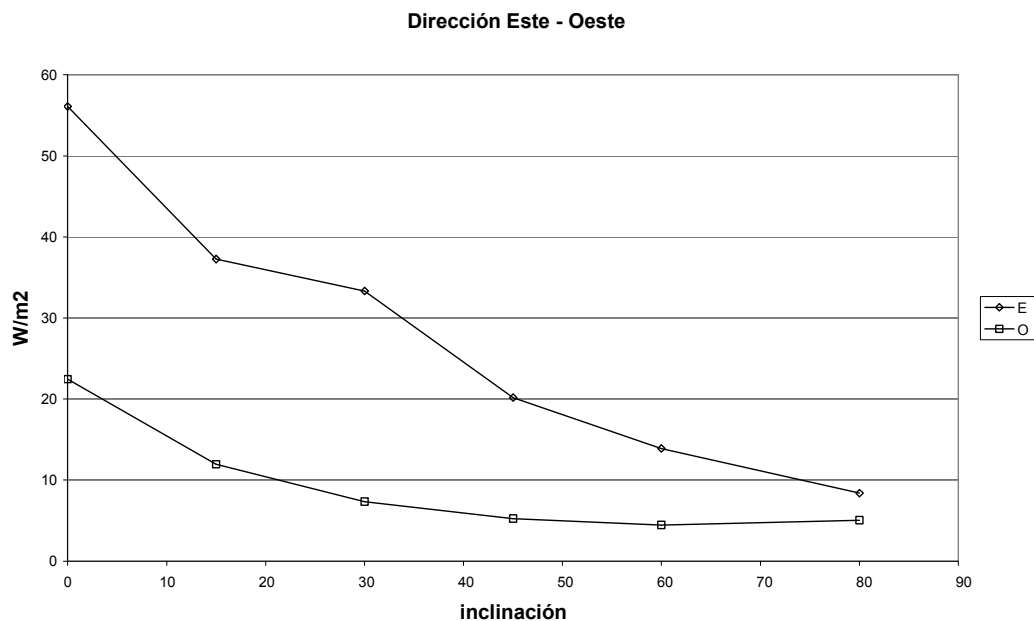
Inclinación	Norte	Sur	Este	Oeste
$\alpha = 0^\circ$	30.6	23.6	56.1	22.4
$\alpha = 15^\circ$	16.8	11.5	37.3	11.9
$\alpha = 30^\circ$	13	7.6	33.3	7.3
$\alpha = 45^\circ$	10.9	5.9	20.2	5.2
$\alpha = 60^\circ$	8.7	5.3	13.9	4.4
$\alpha = 80^\circ$	6.9	6.6	8.4	5

Tabla 1: Irradiancias difusas (W/m^2) para el día 12 de mayo de 2005 en el Observatorio Astronómico de la U.N.Sa.

En las graficas 2 y 3 se ven los valores de irradiancia discriminados por direcciones. En la grafica 3 se aprecia en la curva correspondiente a la dirección Este que para la inclinación $\alpha = 30^\circ$ existe un pico de irradiancia debido a que la inclinación del telescopio se aproximaba a la altura solar α_s en el momento de la medida, razón por la cual se sensó más radiación que sólo la difusa isótopa.



Grafica 2: Valor de irradiancia para las direcciones N-S



Grafica 3: Valor de irradiancia para la dirección E-O.

Mediciones realizadas en El Rosal:

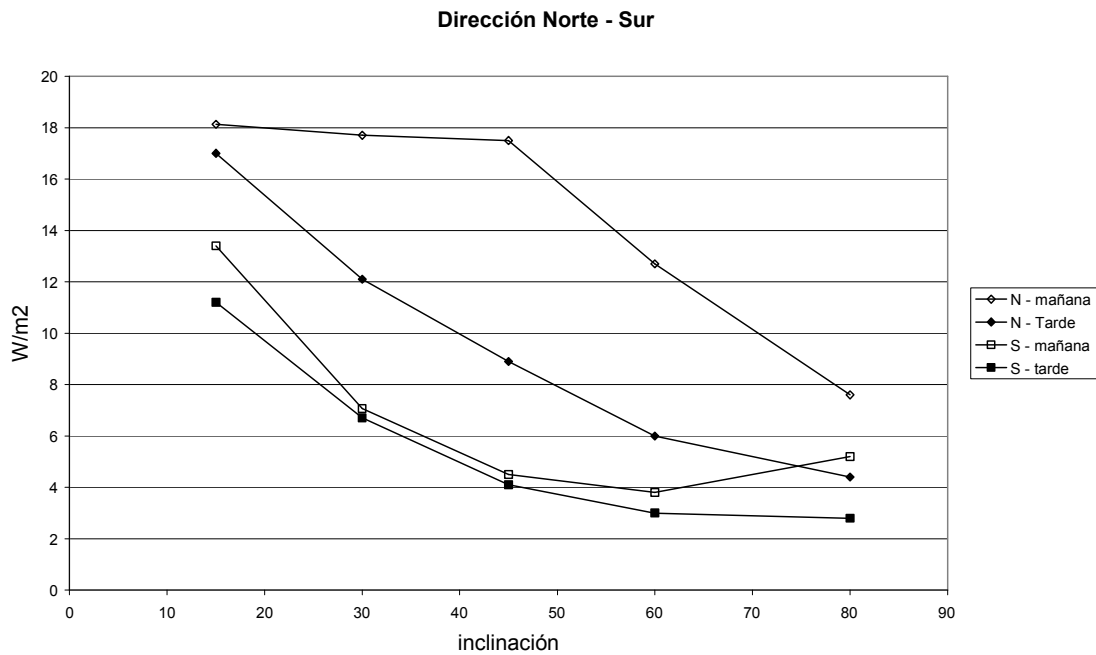
Se realizaron dos series de medida el 1 de junio de 2005: la primera se realizó cerca del mediodía solar (entre las 11:13 y las 11:37 hora solar) y la segunda en horas de la tarde (entre las 15:13 y las 15:37 hora solar). En el caso de las mediciones realizadas por la mañana, el Sol tenía una altura de 42° y un ángulo azimutal de entre 165° y 172° . En el caso de la tarde, el Sol se encontraba a una altura de entre 24° y 19° , y un ángulo azimutal de entre -130° y -126° . Estas variaciones de altura y ángulo azimutal se deben a que el registro de los espectros no es instantáneo: se requiere de aproximadamente un minuto para registrar y cambiar de dirección y/o inclinación del telescopio.

En la Tabla 3 se muestran los valores de irradiancia calculados para todas las direcciones e inclinaciones tanto al mediodía como a la tarde.

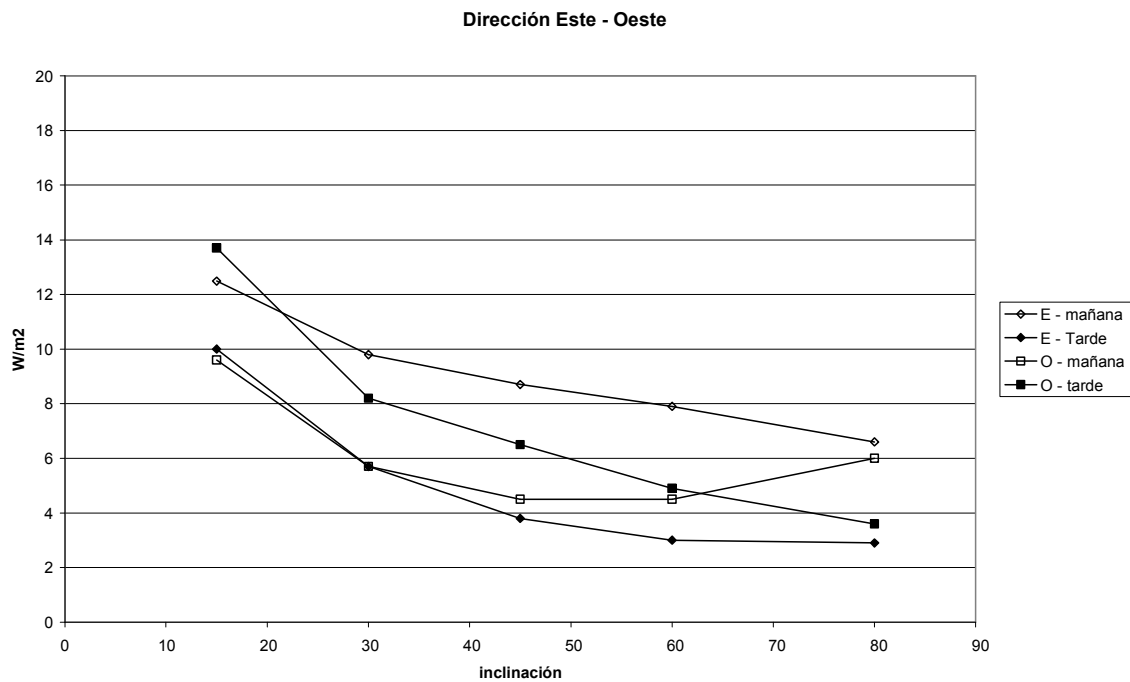
Inclinación		Norte	Sur	Este	Oeste
15°	Mediodía	18.1	13.4	12.5	9.6
	Tarde	17	11.2	10	13.7
30°	Mediodía	17.7	7.1	9.8	5.7
	Tarde	12.1	6.7	5.7	8.2
45°	Mediodía	17.5	4.5	8.7	4.5
	Tarde	8.9	4.1	3.8	6.5
60°	Mediodía	12.7	3.8	7.9	4.5
	Tarde	6	3	3	4.9
80°	Mediodía	7.6	5.2	6.6	6
	Tarde	4.4	2.8	2.9	3.6

Tabla 3: Datos de irradiancia difusa obtenidos el 1 de junio de 2005 en El Rosal (Pcia de Salta).

En las graficas 4 y 5 se muestran los valores de irradiancia calculados para todas las direcciones e inclinaciones.



Grafica 4: Valores de irradiancia para la dirección Norte - Sur



Grafica 5: Valores de Irradiancia para la dirección Este - Oeste.

En la dirección Norte al mediodía puede verse una variación marcada en la radiación sensada para la inclinación correspondiente a 45°. Esto se debe a que la altura del Sol en ese momento era cercana a esa inclinación: el sensor mide parte de la radiación circunsolar. Esto no se aprecia en las mediciones de la tarde, que se realizaron con alturas de entre 24° y 19°, ya que eso no sucede. Esto concuerda con las estimaciones que se tienen sobre la extensión de la radiación circunsolar: entre 1,5° y 3° alrededor del disco solar.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos al medir radiación solar difusa mediante un espectroradiómetro LICOR LI-1800 en dos sitios de la provincia de Salta, situadas a distintas alturas sobre el nivel del mar: Salta Capital a 1.216 m.s.n.m., y en El Rosal a 3.350 m.s.n.m.

En los resultados obtenidos se observa claramente el carácter anisotrópico de la radiación difusa de cielo, siendo en todos los casos más brillante en las cercanías del horizonte. En la ciudad de Salta, bajo las condiciones estudiadas, el cielo incluido en el cuadrante Sur–Oeste (opuesto al que contiene al sol) puede considerarse isótropo para ángulos de altitud comprendidos entre 30° y 80°. En el cuadrante Norte–Oeste el cielo se oscurece sensiblemente para todos los ángulos estudiados a medida que el azimut aumenta de 180° a 270°, pero su anisotropía en el ángulo de altitud es mayor que para el cuadrante S-O debido a la presencia del sol en el cuadrante Norte-Este. En este último, la marcada anisotropía angular de la irradiancia difusa proviene de la dispersión del haz directo a medida que atraviesa la atmósfera, iluminando el cielo con valores de irradiancia muy superiores a los de los otros cuadrantes.

El cielo del Rosal es marcadamente anisótropo tanto a la mañana como a la tarde en todas las direcciones estudiadas, con valores de irradiancia difusa mucho más bajos que en la ciudad de Salta debido a la menor masa de aire existente a los 3.300 m. La disminución de la masa de aire con la altura tiene como consecuencia directa la disminución del fenómeno de dispersión de la radiación solar, presentándose la esfera celeste, en general, más oscura que la correspondiente a menores alturas respecto del nivel del mar. Nuevamente se observa que el sector más iluminado corresponde al anillo situado sobre el horizonte. Tanto a la mañana como a la tarde, el cielo en la dirección Norte está más iluminado que el de la dirección Sur (Gráfico 4). Pero en la dirección E-O por la mañana está más iluminado el cielo del Este y por la tarde el cielo del Oeste. Es decir, debido a la menor dispersión de la radiación solar, la irradiancia difusa traducida en el “brillo” del cielo sigue al derrotero del Sol.

En futuros estudios, se realizarán mediciones para orientaciones (ángulos de azimut del telescopio) intermedias entre las 4 presentadas en este trabajo. El inconveniente principal para lograr esto radica en que el tiempo necesario para realizar cada serie de medidas (5 ángulos de altura del telescopio para cada zmut) es del orden de 5 minutos, cantidad que debe multiplicarse por el número de orientaciones elegido. Durante el tiempo que lleva completar 4 orientaciones, por ejemplo, el Sol se desplaza 5° sobre la eclíptica. Una metodología posible consiste en realizar las mediciones en distintos días (lo más parecidos posible en cuanto a claridad del cielo) pero a la misma hora, de modo tal de completar sólo 4 orientaciones por día para esa hora.

Se tiene previsto, además, realizar mediciones de irradiancia difusa circunsolar mediante un dispositivo que se agrega al telescopio con una abertura angular del orden de 3° y un centro oscuro de ancho angular 0,5° para oscurecer el disco solar.

REFERENCIAS

Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª edición . Wiley Interscience, New York.

Gueymard C. (1.993). Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. Solar Energy. Vol. 51 – Nº 2. pp 121 – 138.

DIFFUSE SOLAR RADIATION MEASUREMENTS IN SALTA. QUALITATIVE DETERMINATION OF SKY ANISOTROPY.

ABSTRACT. In this work, solar diffuse radiation measurements in the province of Salta are shown. The data were obtained focusing the interest on two main aspects: the dependence of the irradiance data values at heights above sea level and the angular directions. Data analysis was carried out to determine sky anisotropy as the Sun moves through the sky.

KEYWORDS: diffuse radiation, heights above sea level measurements, spectra, anisotropy.