

EVALUACIÓN DEL ALBEDO EN LA ESTACIÓN SOLARIMÉTRICA DE LUJÁN, SUELO CARACTERÍSTICO DE LA PAMPA HÚMEDA

Paula Iturbide; Valeria Stern; Raúl Righini; Rosana Aristegui

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar)

Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES). Univ. Nacional de Luján. Ruta 5 y 7, Luján, CP 6700, Buenos Aires. (54) (2323) 442041. E mail gersolar.unlu@gmail.com

RESUMEN: Determinar el albedo del suelo es una tarea de importancia relevante en muchos modelos que lo utilizan como base de sus cálculos. A título de ejemplo pueden citarse modelos de determinación de la irradiación solar media recibida por un plano inclinado, contando con el dato de irradiación en el plano horizontal; también lo utilizan los modelos de estimación de la radiación solar a nivel de la superficie terrestre que emplean imágenes satelitales. Ya sea que se estime o se mida, la evaluación de la cobertura nubosa de la superficie requiere el imprescindible conocimiento de cuánta de la radiación solar es reflejada por el suelo.

El albedo del suelo de la estación de medición de la radiación solar que el GERSolar opera en el predio de la UNLu ha sido estudiado midiendo durante un extenso período de tiempo. El análisis se ha hecho en base minutal, horaria, diaria y media mensual, reflejando el comportamiento característico del tipo de suelo estudiado, representativo de una porción importante de la provincia de Buenos Aires.

Palabras clave: albedo, plano horizontal, suelo característico pampeano.

INTRODUCCIÓN

El uso de la radiación reflejada por el suelo en el rango de ondas cortas ($0,4 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$) constituye una variable relevante en lo que hace al modelado de diversas aplicaciones relacionadas con la evaluación y uso del recurso solar. Tal como indica Artero (1997), Carter (1978), Duffie (1991), Grossi Gallegos y Raichijk (2018), entre otros, la determinación correcta del albedo de superficie resulta clave para evaluar la radiación recibida por un plano inclinado un determinado ángulo respecto de la horizontal. El modelo isotrópico más empleado es el de Iqbal (1983), aunque otros modelos brindan buenos resultados, en algunos casos resultando más simples de emplear que el de Iqbal (Denegri, 2014). Según Righini y Grossi Gallegos (2001), una incorrecta determinación del albedo de la superficie puede traer aparejadas diferencias del orden del 30% en los ángulos óptimos de inclinación de los planos de colección de sistemas de aprovechamiento energético de la radiación solar, lo que a su vez supone diferencias (en casos extremos) del 11% de la energía colectada durante el período invernal.

También la determinación correcta del albedo de superficie es importante en múltiples modelos de evaluación de la irradiación solar a nivel de la superficie terrestre, estimados usando imágenes satelitales. Tal como indican Dedieu et al. (1987) y Diabaté et al. (1988 y 1989) y Noia et al. (1993 a y b), la cobertura del campo de nubes sobre la superficie en la que se estimará la irradiación solar depende básicamente de la correcta evaluación del albedo de la superficie. Este parámetro es fundamental para discriminar cuándo el satélite está observando la superficie y cuándo nubes.

En este sentido, el presente artículo reporta resultados de la medición sistemática del albedo de una superficie que resulta representativa de una porción importante del área rural de la provincia de Buenos Aires.

Se efectúan caracterizaciones estacionales del albedo, el cual es medido empleando diversas bases temporales para ello: minutal, horaria, diaria y media mensual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con datos de medición de irradiación global en el plano horizontal tomados durante los años 2017 (año entero) 2018 y 2019 (septiembre 2018 a agosto 2019) provenientes de la estación Luján perteneciente a la red pampeana que GERSolar administra junto con el INTA.

Se utilizaron datos medidos cada segundo e integrados cada minuto provenientes de mediciones realizadas con un radiómetro neto CNR4 que fabrica Kipp & Zonen, regularmente calibrado en el Laboratorio de Calibración que GERSolar opera en el predio de la Universidad Nacional de Luján. (Righini y Aristegui, 2015).

El análisis estadístico de los datos se realizó con la herramienta Enterprise Guide de SAS (Statistical Analysis System).

En el presente trabajo se calcula el albedo como el cociente de la irradiancia “down”, proveniente del sensor piranométrico que apunta hacia la Tierra y la irradiancia “up”, proveniente del sensor piranométrico que apunta hacia el cielo (es decir que se trabaja en el denominado rango de onda corta).

$$Albedo = \frac{I_{down}}{I_{up}}$$

Se buscan patrones de correlación del albedo con la caracterización del tipo de día en función de su cobertura nubosa y la estación del año. Se calculan promedios diarios, mensuales y anuales.

La estación de medición se halla en la localidad de Luján, provincia de Buenos Aires. Pertenece a la región denominada Pampa Húmeda, una región que abarca una fracción de la superficie total de Argentina de alrededor de unos 600000 km². Los paisajes pampeanos se caracterizan por la presencia de extensas llanuras originalmente cubiertas por pastizales, (figura 1), poca cobertura arbórea y una gran homogeneidad. Estos suelos se denominan Molisoles y tienen la característica de drenar bien, ser muy beneficiosos para la agricultura, poseer un color oscuro y de considerable espesor. Típicamente se hallan bajo una cobertura de pastura, es decir, en los ecosistemas de pastizales, por lo que tienen en superficie un color verdoso amarillento. (Imbellone et al., 2010).

Preprocesamiento de datos: Se procesaron todos los datos minutales durante el período analizado. Los valores negativos de radiación, debidos al offset del equipo se asignan como nulos.

En la estación Luján se realizan mediciones de radiación global, directa y difusa cada segundo, almacenándose las integrales cada minuto. Como control de las mediciones realizadas, se comparan diariamente los valores de irradiación global obtenidos por los radiómetros piranométricos con la irradiación calculada en función de la irradiancia directa proyectada en el plano horizontal y la irradiancia difusa medida con un piranómetro B&W. Dos equipos de referencia, un CMP11 y un CMP21, además, funcionan como referencias independientes de medición de la radiación solar global.

Asimismo, se realizó un filtro por Kt y se descartaron los datos minutales cuyo Kt fuese mayor que 0.9. Con el objetivo de mostrar el correcto funcionamiento del radiómetro CNR4, se correlacionaron los valores de irradiancia global medidos en la parte superior de dicho equipo -Irradiancia Up- con los arrojados por el radiómetro CMP11, empleado como referencia en la estación Luján. Los resultados de

la correlación se muestran en la figura 2. Se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de 0.97 sin sacar datos nocturnos y 0.98 omitiendo los mismos.

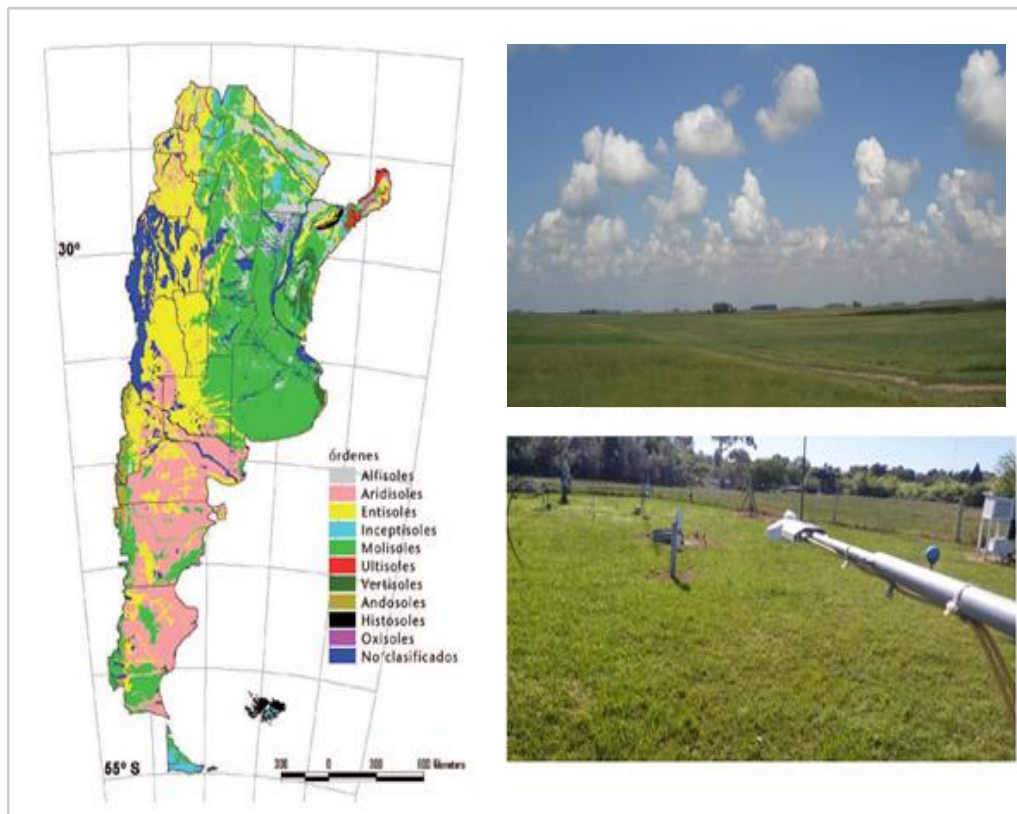


Figura 1: A la izquierda se muestra un mapa de los órdenes de los suelos dominantes en las distintas regiones del país. La llanura pampeana cubierta de color verde, que representa molisoles. Fuente: INTA. A la derecha en la parte superior se muestra una imagen de un típico paisaje pampeano y en la parte inferior el lugar donde se tomaron los datos.

La pendiente de la correlación es muy cercana a 1 lo cual, además de la linealidad, demuestra que las mediciones del CNR4 son consistentes con las de irradiación global. Para realizar los promedios se utilizó la herramienta que comercializa la empresa SAS (Statistical Analysis System) Enterprise Guide que trabaja con grandes volúmenes de datos. Se utilizó en esta herramienta el lenguaje de programación propio de SAS para desarrollar las tareas pertinentes.

Cálculo de errores: Al error estadístico de los valores medios debe agregársele el propio error instrumental. Dado que cada sensor de los que participan en la evaluación de la radiación neta de onda corta presenta una incerteza del 2,6%, la incerteza total instrumental debe ser evaluada en un 5,2%, el error total en el albedo se considera:

$$error\% = \sqrt{\varepsilon_{estadístico}^2 + \varepsilon_{instrumental}^2}$$

Los errores estadísticos son mucho menores que el error instrumental; esto se debe a que los datos considerados para los promedios son en base minutal (n=240 para promedios diarios, n=7200 para promedios mensuales y n= 87600 para promedios anuales). Por lo que puede considerarse que el error relativo porcentual total es prácticamente el error instrumental. El albedo analizado es constante a lo largo del año, tomándose como valor representativo el valor medio anual de 0.19.

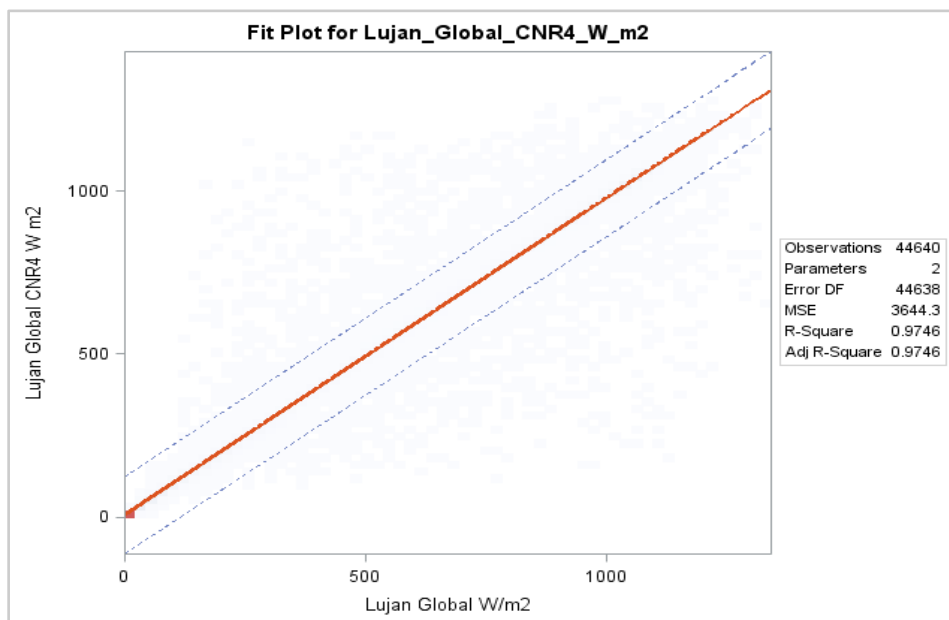


Figura 2: Correlación entre las mediciones realizadas por el CNR4 y el CMP11.

RESULTADOS

Las componentes de irradiancia up y down y su correspondiente albedo para un día típico despejado se muestran en la figura 3, mientras que en la figura 4 se grafican ambas variables en una escala temporal más acotada, que abarca desde las 11 hs hasta las 15 hs. Ambas figuras son similares pero corresponden a diferentes rangos horarios.

De su análisis, puede verificarse que cerca de la salida y la puesta del Sol el albedo presenta variaciones relativamente grandes en poco tiempo. Este comportamiento se ilustra en la figura 5, que muestra el albedo en función de la altura solar para un día de verano y para un día de invierno.

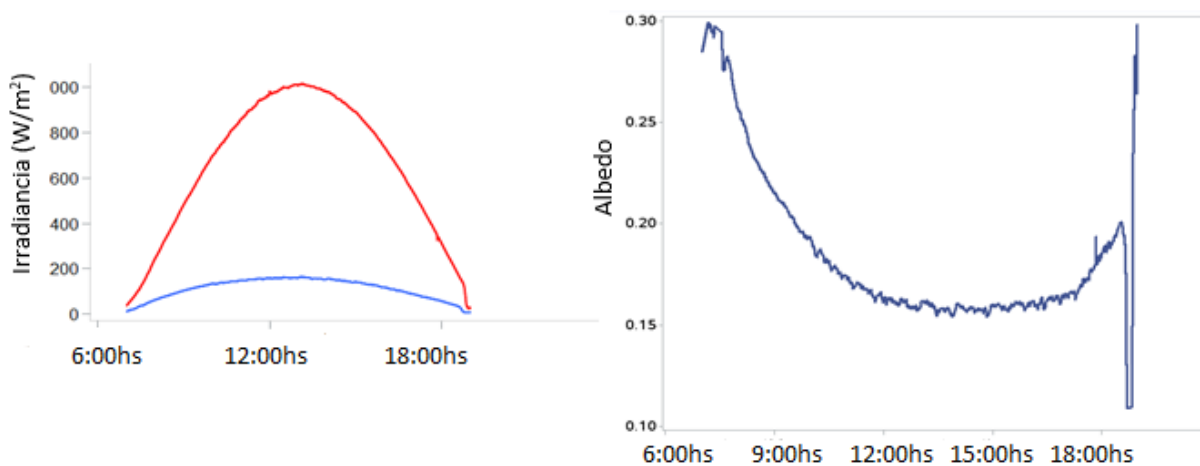


Figura 3: (Izquierda) irradiancia global y reflejada; (derecha) albedo. (Ambas figuras corresponden a horarios entre 7 hs y 19 hs. del 26 de febrero 2019).

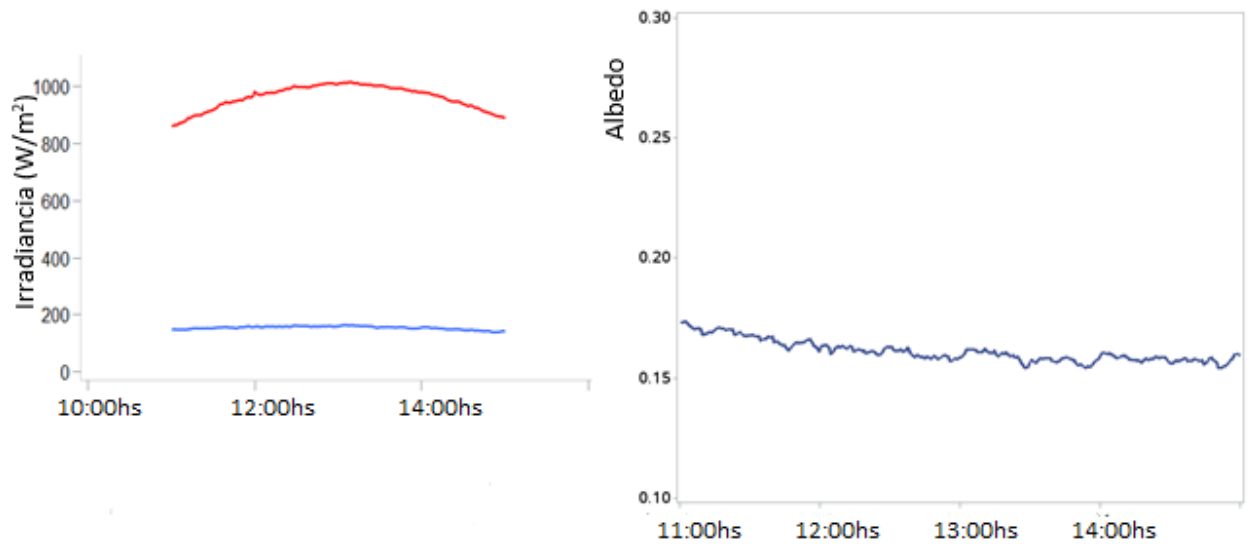


Figura 4: (Izquierda) irradiancia global y reflejada; (derecha) albedo. (Ambas figuras corresponden a horarios entre 11 hs y 15 hs. del 26 de febrero 2019).

Nótese que a horas tempranas -cuando el Sol aún no alcanza los 10 grados de altura en el mes de julio- el albedo arrojado por las mediciones alcanza valores de 0.7.(Figura 5).

Se observa que los valores de albedo son distintos por la tarde que por la mañana, para una misma altura solar.

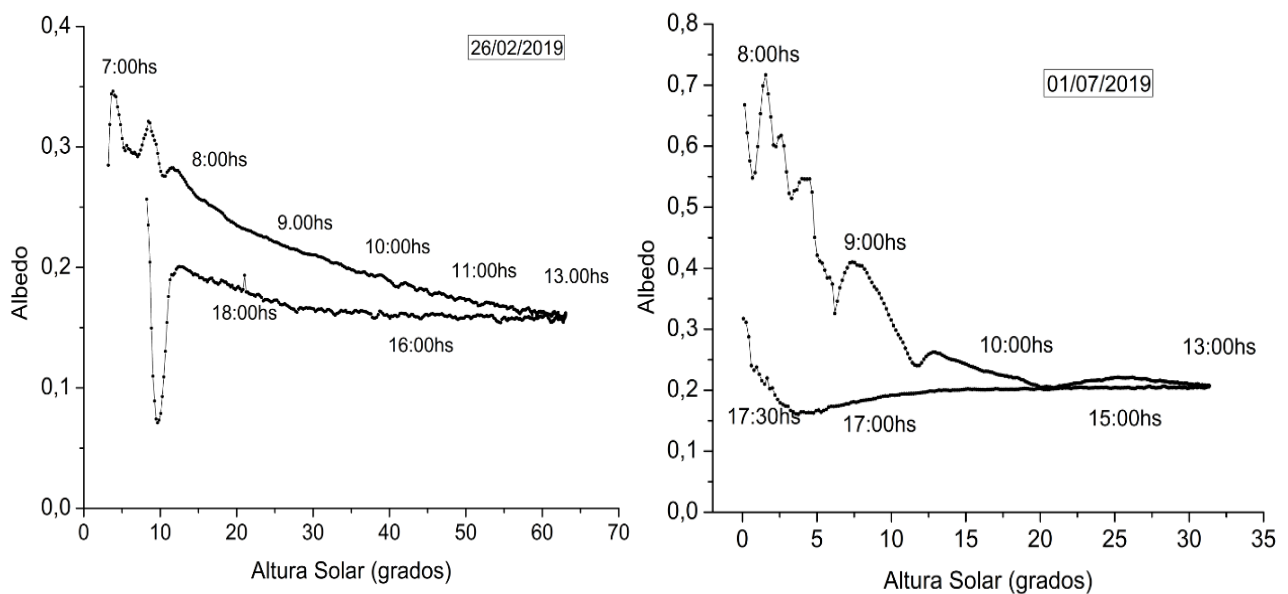


Figura 5: Albedo en función de la altura solar, desde la salida y la puesta de Sol, un día de febrero (izquierda); y de julio (derecha) de 2019.

Los errores de determinación del albedo son altos en los momentos en los que la radiación solar es más baja. En esos momentos la incidencia casi paralela a la superficie y la rápida variación de los niveles de radiación solar determinan una incerteza mucho mayor que para el resto del día.

También debe considerarse que el albedo puede ser distinto para diferentes alturas solares debido, en parte, a condiciones anisotrópicas relacionadas con la reflexión de la radiación solar en el suelo. Otras peculiaridades propias del suelo, su estructura y comportamiento físico con la variación de temperatura no pueden ser descartadas para explicar esa dependencia con la hora del día.

El trabajo realizado hasta el momento no puede dar una respuesta ni una justificación fundada a ese comportamiento. Por otra parte, los horizontes pampeanos son, en general, horizontes despejados, particularmente isotrópicos. Dado que el objetivo del trabajo es, a través de la medición del albedo de Luján, caracterizar suelos representativos de la zona pampeana, tanto en su composición como en sus condiciones de cobertura vegetal y homogeneidad del paisaje, se consideró pertinente descartar los datos de albedo para alturas solares bajas (menores a 25 grados, aproximadamente) y considerar, por lo tanto, datos entre las 11 y las 15 horas, cumple con los requisitos que nos garantizan representatividad del albedo calculado durante todo el año.

Albedo medio anual: De aquí en adelante llamaremos *albedo diario* al valor medio de los albedos minutales del día.

El período considerado comprende dos años: el año 2017 completo, al que llamaremos *año 1*, y los meses comprendidos entre septiembre 2018 y agosto 2019, los que denominaremos *año 2*.

En la figura 6 se muestra el comportamiento anual del albedo diario. Se calculó el albedo promedio anual como el promedio de todos los albedos diarios. Se repitió el procedimiento para ambos años; en la tabla 1 se informan los resultados: en ambos casos se obtuvo un valor de 0.19, habiéndose relevado un valor mínimo de albedo diario de aproximadamente 0.13 y máximo de 0.22. Obsérvese que el error estadístico es pequeño ya que la cantidad de muestras es grande. Más adelante se compara este error con el del instrumento.

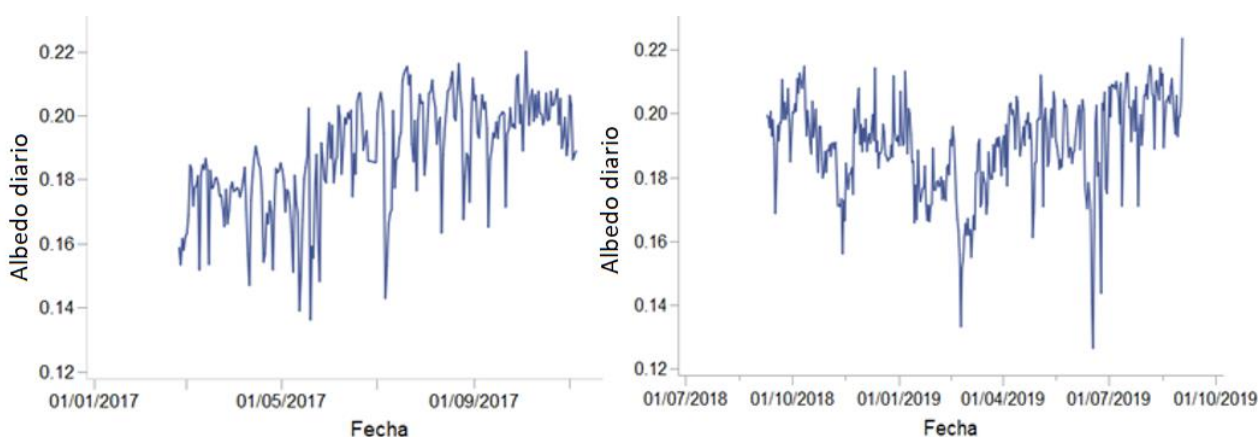
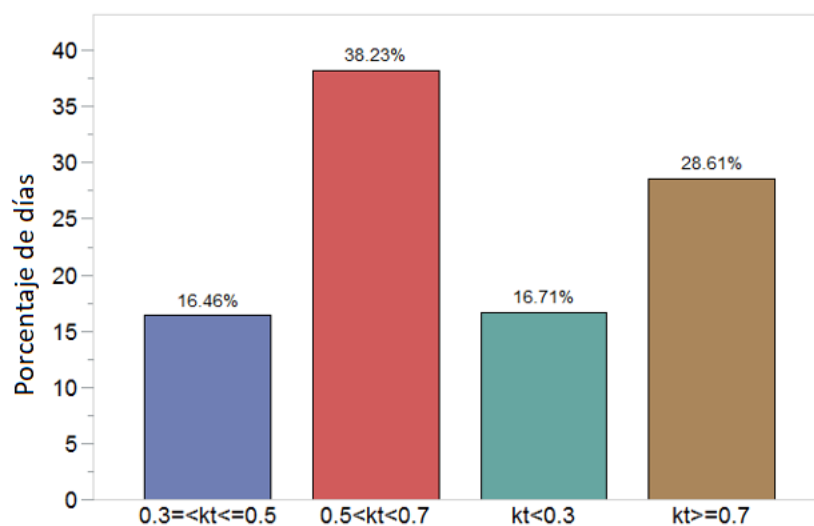


Figura 6: Albedo diario -promedio de los albedos minutales- del año 1 (izquierda) y del año 2 (derecha).

Albedo promedio anual			
Período	Promedio anual	Desvío estandar	Error estandar
2017	0.1877	0.0207	0.0001
2018-2019	0.1900	0.0189	0.0001

Tabla 1: Albedo promedio anual con su correspondiente desvío estándar y error estadístico.

Dependencia del albedo con el Kt y la estación del año: Dado que la cobertura de cielo puede caracterizarse por medio del índice de claridad, Kt, se exploró la dependencia del albedo en función de dicha cobertura. El Kt diario se define como el cociente entre la irradiación diaria en plano horizontal y la correspondiente irradiación extraterrestre. Aproximadamente el 55% de los días considerados tienen un Kt cuyo valor pertenece al rango que va desde 0.3 hasta 0.7, rango que corresponde a días parcialmente cubiertos, mientras que un 29% de los días caen en el rango de días despejados. (Ver figura 7).



Rangos de kt	Tipo de día
0.3<kt	Nublado
0.3<=kt<=0.5	Parcialmente cubierto con predominancia de radiación difusa
0.5<kt<0.7	Parcialmente cubierto con predominancia de radiación directa
0.7<=kt	Despejado

Figura 7: Distribución de días en el período estudiado y caracterización del Kt.

Los intervalos de Kt considerados para definir la cobertura de cielo se muestran en la figura 7 y en la tabla 2 el albedo promedio para cada tipo de día. El análisis de los datos reveló que no hay una dependencia apreciable entre el albedo del suelo y el Kt diario.

Tipo de día (en función de Kt)	Albedo promedio	Desvío estandar	Error estandar
Despejado	0.1939	0.0132	0.0013
Nublado	0.1835	0.0191	0.0024
Parcialmente cubierto con dominancia de radiación difusa	0.1909	0.0130	0.0017
Parcialmente cubierto con dominancia de radiación directa	0.1903	0.0132	0.0011

Tabla 2: Caracterización del albedo respecto al tipo de día

También se analizó la dependencia estacional del albedo. Los resultados mostrados en la tabla 3 demuestran que, dentro de la incerteza asumida para el presente trabajo, el albedo no muestra una dependencia estacional.

Estación	Albedo promedio	Desvío estandar	Error estandar
Invierno	0.1969	0.0165	0.0017
Otoño	0.1878	0.0125	0.0013
Primavera	0.1926	0.0123	0.0013
Verano	0.1833	0.0137	0.0014

Tabla 3: Caracterización del albedo respecto a la estación del año

DISCUSIÓN

Tal como se expresó anteriormente, el albedo juega un papel importante en la evaluación del recurso solar disponible en un plano inclinado. Inclinar los planos de colección en sistemas de aprovechamiento energético constituye una estrategia básica para optimizar la energía disponible por parte de las tecnologías de aprovechamiento de la radiación solar como fuente primaria.

A título de ejemplo podemos ilustrar el caso de la estación Luján, donde fue evaluada la influencia del albedo. Empleando el método de Liu-Jordan (Liu y Jordan, 1961) se evaluó la radiación solar media diaria mensual incidente en un plano inclinado respecto a la horizontal, apuntando al norte.

El modelo ha sido usado previamente para determinar los ángulos óptimos de colección de energía en el plano inclinado (Righini y Grossi, 2001) y, para Luján, posibilitando establecer la dependencia de los mismos en función del albedo.

La tabla (tabla 4) siguiente resume esa dependencia: se presentan en ella los ángulos de inclinación del plano que optimizan la energía colectada durante todo el año y durante el período invernal (considerándolo conformado por los meses de mayo, junio y julio que son los de menor radiación en la zona) y las energías estimadas de colección con esos ángulos y esos albedos.

Albedo	Óptimo anual	Óptimo invernal	Energía anual	Energía invernal
0.1	26	57	6622.2	1296.2
0.2	28	58	6655.2	1314.7
0.3	30	60	6692.5	1334.3
0.4	32	62	6735.1	1355.0
0.5	34	64	6784.0	1376.9

Tabla 4: Ángulos óptimos anuales e invernales y las energías colectadas para diferentes albedos en la estación Luján. Las energías están en MJ/m².

Los albedos aquí presentados varían entre 0,1 y 0,5 (albedos mayores presupondrían una cobertura de suelo que no es habitual en la zona rural de Luján ni en la Pampa Húmeda). Es notable cómo, a medida que el albedo crece, la inclinación del ángulo óptimo también lo hace. Esto se debe a que la mayor reflectividad del suelo que supone un albedo más alto favorece inclinar los planos para recibir una energía reflejada mayor. Las diferencias son mayores durante el período invernal, período en el cual resulta más crítico la determinación del ángulo óptimo. Para el invierno, las diferencias de energía entre los valores extremos de albedo presentados llegan a un 6,2%, lo que no resulta desdeñable en ningún proceso de aprovechamiento energético o generación fotovoltaica, evidenciando la importancia en la correcta determinación del albedo superficial.

Por otra parte, las estimaciones de la radiación solar basadas en imágenes satelitales requieren del conocimiento preciso del albedo de superficie para evaluar la cobertura nubosa del área analizada. Una determinación equivocada de ese parámetro puede aparejar errores importantes en las estimaciones, tanto en base horaria como en base diaria. La correcta medición del albedo, su variabilidad horaria y mensual, resulta una herramienta que puede ser importante en este tipo de aplicaciones. Usar como referencia superficies tan importantes como las que conforman la pampa húmeda argentina, con una extensión de alrededor de 600.000 km², puede ayudar a determinar los albedos en otras zonas, mejorando las estimaciones basadas en los métodos descriptos.

Los valores encontrados para el albedo de este tipo de suelo se encuentran acordes a los considerados hasta ahora como referencia. Habitualmente, los suelos húmedos o con cierto nivel de cobertura vegetal presentan albedos que varían entre 0,1 y 0,3, dependiendo de la longitud de onda de la radiación incidente (Vignola et al, 2012). Los datos son también consistentes con los presentados por NASA, en su sitio <https://visibleearth.nasa.gov/images/60636/global-albedo>

CONCLUSIONES

La correcta medición del albedo de superficie resulta crucial en la determinación de la radiación solar neta. De su valor depende, también, la elección del ángulo óptimo de inclinación de los planos de colección de la radiación solar en los cuales se sitúan los sistemas de aprovechamiento energético o generación fotovoltaica. Una evaluación equivocada del albedo puede aparejar una mala elección del

ángulo óptimo de inclinación y, de esta forma, determinar menores cantidades de energía disponible para esos sistemas, las que pueden ser un 6% inferiores en una zona con la característica de la reflectividad de los suelos analizados. Los resultados brindados por algoritmos de estimaciones de la radiación solar basados en imágenes satelitales también resultan fuertemente dependientes del valor del albedo de superficie, el cual permite evaluar la cobertura nubosa del área analizada y, como consecuencia, la energía incidente a nivel de la superficie terrestre.

Los valores medidos muestran, por un lado, un valor constante a lo largo del año, independiente de las condiciones de cobertura de cielo.

La determinación del albedo en un suelo como el de la estación Luján, que resulta representativo de vastas zonas de la Pampa Húmeda argentina, posibilita mejorar las prestaciones energéticas de los sistemas de aprovechamiento de la energía solar y, paralelamente, sirve como albedo de referencia en modelos satelitales de evaluación de la energía solar, aportando mediciones concretas en lugar de estimaciones basadas en imágenes.

REFERENCIAS

- Artero, R., Caram, M., Rauek, C., Steszak, G. y Esteves, A., Radiación solar sobre planos inclinados. Evaluación de dos métodos de cálculo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 1 (1), 221-224, (1997).
- Carter and Patel, A. M., Evaluation of methods of calculating solar radiation on inclined surfaces. Final Report COO/4494-1, DOE, (1978).
- Denegri, M., Medición de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) en planos con diferentes orientaciones, mediante el desarrollo y ensayo de un dispositivo ad-hoc, y verificación de modelos (tesis de doctorado, 2014).
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York, (1991).
- Dieudonné, G., Deschamps, P. Y. y Kerr, H. (1987). Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the Earth and of surface albedo using a physical model applied to meteosat data. *J. Clim. Appl. Meteorol.* Vol 26.
- Diabaté, L., Demarcq, H., Michaud-Regas, N. y Wald, L. (1988). Estimating incident solar radiation at the surface from images of the Earth transmitted by geostationary satellites: The Heliosat project. *Int. J. Solar Energy*. Vol 5. pp 261 – 278.
- Diabaté, L., Moussu, G. y Wald, L. (1989) Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images. *Solar Energy*. Vol 42. pp 201-207.
- Imbellone Perla A., Gimenez Jorge E., Panigatti José L. "Suelos de la Región Pampeana", Buenos Aires, Ediciones INTA, (2010).
- Iqbal, M., *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Inc, (1983).
- Liu, B.Y.H. y Jordan, R.C., Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASHRAE J.* 3 (10), 53-59, (1961)
- Noia, M., Ratto, C. F. y Festa, R. (1993) a. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Statistical Models. *Solar Energy*. Vol 51. 6. pp 449 – 456.
- Noia, M., Ratto, C. F. y Festa R. (1993) b. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical Models. *Solar Energy*. Vol 51. 6. pp 457 – 465.
- Grossi Gallegos, H. y Raichijk, C., Radiación Solar. Medición y Modelado (294 páginas), publicado por edUTecNe - Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional y ASADES - Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, Buenos Aires, (2018)
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H., Ángulos sugeridos para optimizar la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos orientados al norte. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, N°2, Vol 3, pp. 11.33-11.36, (1999).

- Righini, R. y Grossi Gallegos, H., Optimización de la colección anual de irradiación solar diaria en Argentina sobre planos inclinados en función del ángulo y del albedo de superficie. Información Tecnológica, Vol 12, N°3, pp 177-180, 2001. ISSN 0716-8756.
- Righini, R. y Aristegui, R., Caracterización del nuevo laboratorio de medición del GERSolar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) Vol. 3, pp. 11.01-11.09, 2015.
- Vignola, F., Michalsky, J. y Stoffel, T., Solar and infrared radiation measurements. Crc Oressm, 194 pp. (2012).

ALBEDO EVALUATION IN THE SOLARIMETRIC STATION OF LUJÁN, CHARACTERISTIC SOIL OF THE PAMPA HÚMEDA

ABSTRACT: Many models used to determine sun radiation require knowledge of surface albedo. Examples of such models are the determination of the radiation on the tilted surface from data on the horizontal plane and the determination of the radiation on the earth surface from satellite images. Whether estimated or measured, assessing surface cloud cover requires the essential knowledge of how much of the solar radiation is reflected by the ground.

The surface albedo of the station that GERSolar operates at the University of Luján, Luján, province of Buenos Aires, has been characterized, using a minute database that covers the period 2017 -2019. Analyzes were carried out on a minute, hourly, daily and monthly average basis, managing to characterize a representative area of the Province of Buenos Aires.

Keywords: albedo, horizontal plane, Pampa Húmeda characteristic surface.