

MAPA DE ENERGÍA SOLAR COLECTADA ANUALMENTE POR UN PLANO INCLINADO. UN ÁNGULO ÓPTIMO EN LA REPÚBLICA ARGENTINA

Raúl Righini¹, Hugo Grossi Gallegos¹

(1) GERSolar-INEDES; Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, Luján (6700), Bs. As., Argentina; gersolar@yahoo.com.ar.

RESUMEN

El aprovechamiento energético de la radiación solar está creciendo de forma sostenida en todo el mundo. Para dimensionar correctamente esos sistemas, evaluar sus costos y posibilidades de funcionamiento es necesario contar con información que muestre la distribución espacial y temporal del recurso solar. La elección de un ángulo de colección del plano inclinado juega un papel destacado en la captación de la energía solar disponible. Habitualmente se sugiere inclinar el plano respecto a la horizontal un ángulo igual a diez grados más que la latitud del sitio de instalación. No obstante, si se poseen datos de radiación solar con suficiente peso estadístico, puede seleccionarse el ángulo de inclinación del plano de colección que maximice la energía recibida anualmente. En el presente trabajo se calcularon, basándose en datos de la Red Solarimétrica, los ángulos óptimos de inclinación para distintos sitios del territorio nacional y, empleándolos, se calculó la energía anual colectada, mostrándose por primera vez, la carta anual de energía solar colectada por planos con inclinación óptima para la República Argentina. Esa carta permite evaluar de forma más realista la disponibilidad de la energía solar como recurso energético. Para minimizar los errores de representación espacial de la distribución de energía se emplearon métodos geoestadísticos en el trazado de las isolíneas de radiación solar global.

Palabras Claves: Energía Solar, ángulo óptimo, Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de métodos alternativos de generación eléctrica se ha constituido en una posibilidad cada vez más atractiva desde el punto de vista ambiental y económico. Por un lado, los precios crecientes de los combustibles fósiles se asocian, entre otras variables, con el agotamiento de las reservas [1]. Por otra parte el cambio climático, y su posible relación con la emisión de gases de efecto invernadero, ha motorizado esfuerzos tendientes a reducir las emisiones dichos gases en general, y del dióxido de carbono en particular. En ese contexto, el uso de la radiación solar como fuente de generación eléctrica, tanto fotovoltaica como térmica, adquiere un papel

destacado. También tiene importancia el empleo de la energía proveniente del sol para calentar agua, o para ser empleada en secado de productos agrícolas. En todos estos casos el correcto dimensionamiento de esos sistemas de aprovechamiento energético debe ser realizado con información representativa de los niveles de radiación solar disponibles del sitio en el que se desee instalarlos.

Una carta que muestre la distribución de la energía solar colectada anualmente por planos inclinados a nivel de superficie en la República Argentina constituye una herramienta importante de diseño y planificación. Dicha carta puede dar cuenta de la variabilidad espacial del recurso solar en la dilatada superficie del territorio

¹ INEDES, GERSolar, Universidad Nacional de Luján, rutas 5 y 7. Luján (6700) Bs. As. gersolar@yahoo.com.ar

nacional y, a través de los valores anuales, integrar la variabilidad temporal que presenta en ese período.

Debido a que la energía colectada en cualquier sitio depende del ángulo de inclinación del plano colector, resulta interesante trazar la carta de radiación anual colectada optimizándolo. De esa manera los valores mostrados representarán, en promedio, la máxima energía incidente que puede llegar al plano, manteniendo su ángulo de inclinación fijo un valor igual al óptimo anual.

El presente trabajo muestra el mapa de distribución de la radiación solar global colectada durante todo el año por un plano cuyo ángulo de inclinación se mantiene fijo en el valor óptimo anual.

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

Para una mayor claridad en el desarrollo del texto se aconseja dividirlo en las siguientes secciones:

La información usada para el trazado del mapa se basa en la brindada por la Red Solarimétrica, la que fue creada con el objetivo de conformar una red de medición para evaluar la energía solar con vistas a su aprovechamiento energético. La Red Solarimétrica llegó a tener equipos de medición instalados en 40 ubicaciones de todo el país, seleccionadas considerando criterios relacionados con la cobertura geográfica y demográfica y la representatividad fitogeográfica de la zona en cuestión, fijándose la precisión requerida en el orden del 8% [2]. El listado de las ubicaciones se muestra en la Tabla 1. Los datos brindados por la red, sumados a estimaciones basadas en datos históricos de heliofanía (horas de sol) provenientes la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, permitieron calcular los valores medios mensuales de radiación y trazar las cartas de distribución de la radiación solar de Argentina [3].

Dado que la irradiación solar está medida o estimada sobre una superficie horizontal, para evaluar el comportamiento de un sistema de aprovechamiento que colecte la energía sobre un plano inclinado un ángulo cualquiera respecto de la horizontal, puede usarse alguna de las fórmulas que se han elaborado para lograr su transformación. Esas fórmulas tienen diferente grado de complejidad de acuerdo a que

Estación	Altura s.n.m. (m)	Provincia
Abra Pampa	3484	Jujuy
Cerrillos	1250	Salta
San Carlos	1710	Salta
Rosario de la Frontera	780	Salta
El Colorado	78	Formosa
Pcia. Roque Sáenz Peña	90	Chaco
Famaillá	363	Tucumán
El Sombrerito	57	Corrientes
Cerro Azul	283	Misiones
Añatuya	108	Sgo del Estero
Catamarca	525	Catamarca
Reconquista	42	Santa Fe
Mercedes	95	Corrientes
Cerro de la Cruz	1680	La Rioja
Rafaela	100	Santa Fe
Manfredi	292	Córdoba
Pocitos	618	San Juan
Paraná	110	Entre Ríos
Concepción del Uruguay	25	Entre Ríos
Marcos Juárez	115	Córdoba
Zavalla	24	Santa Fe
Río Cuarto	421	Córdoba
Villa Mercedes	515	San Luis
La Consulta	940	Mendoza
San Pedro	280	Buenos Aires
Pergamino	65	Buenos Aires
Castelar	22	Buenos Aires
San Miguel	26	Buenos Aires
Rama Caída	692	Mendoza
Anguil	165	La Pampa
Colonia 25 de mayo	100	La Pampa
Balcarce	130	Buenos Aires
Hilario Ascasubi	22	Buenos Aires
Alto Valle	242	Río Negro
Bariloche	836	Río Negro
Trelew	10	Chubut
Comodoro Rivadavia	61	Chubut
Río Gallegos	17	Santa Cruz
Base Almirante Brown	700	Antártica
Base Gral. Belgrano II	530	Antártica

Tabla 1. Listado original de estaciones de la Red Solarimétrica.

consideren o no la anisotropía de la radiación difusa y la posibilidad de variar libremente la orientación azimutal [4].

Empleamos aquí la propuesta por Liu y Jordan [5], incluida en varios programas de simulación desarrollados en el país [6]- [7], y que responde a la siguiente expresión:

$$\frac{\overline{H}_\beta}{\overline{H}} = \left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right) \overline{R}_D + \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho \cdot (1 - \cos \beta)$$

\overline{H}_s , \overline{H}_d y \overline{H} son los valores medios de la irradiación estimada sobre un plano inclinado un ángulo β , la difusa y la global, respectivamente, \overline{R}_D es un factor geométrico promedio que da cuenta de la relación existente entre la radiación directa recibida en el plano inclinado con respecto al horizontal y que es función de los ángulos característicos del plano:

$$\overline{R}_D = \frac{\cos(\phi - s) \cos(\delta) \sin(\omega_\beta) + (\pi/180) \omega_s \sin(\phi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + (\pi/180) \omega_s \sin(\phi) \sin(\delta)}$$

ρ es el albedo propio de la superficie ubicada delante del plano, el que varía de acuerdo con el tipo de cobertura y con la época del año. Iqbal [8] presenta tablas con los posibles valores de albedo, los que son ampliamente variables, llegando a valores como 0,82 para la nieve recientemente caída. Habitualmente suele aproximárselo con un valor fijo cercano a 0,2 y si bien en general la incidencia de este término no es importante para ángulos pequeños de inclinación, su valor puede serlo cuando los ángulos son mayores.

El modelo de Liu Jordan presupone isotropía en la distribución de la radiación solar difusa. Existen otros modelos anisotrópicos, como HDKR (Hay and Davis-Klucher-Reindt), pero no se observan grandes diferencias entre ambos [9].

En la mayoría de las aplicaciones solares se trata de orientar el plano de colección (hacia el Norte en el hemisferio Sur) inclinándolo un ángulo fijo tal que optimice la radiación recibida a lo largo del año. Duffie and Beckman [4] recomiendan un ángulo igual a la latitud del lugar ó 10 grados más que ella. Pero como se ha señalado en anteriores trabajos [10]-[11], esta no puede ser una regla fija, ya que no tiene en cuenta la climatología de nubes propia de cada lugar.

Considerando este antecedente, se emplea la base de datos utilizada para la elaboración de las cartas de radiación solar de Argentina [12]-[13], en las que las variables climatológicas que

influyen en la radiación solar global se ven reflejadas en la medición directa. Para cada uno de los sitios se buscó el ángulo de inclinación del plano que maximiza la suma anual de los valores medios mensuales de la radiación solar recibida.

El método empleado para calcular el máximo de radiación recibida por el plano es el método de quasi-Newton [14], con una precisión de 10-6 y un límite de convergencia de 10-3, tomando como variable el ángulo de inclinación del plano inclinado y sumando la radiación mensual promedio recibida por el mismo en cada localidad para los períodos considerados en la optimización. El algoritmo de optimización empleado ha sido desarrollado por la Universidad Leon Lasdon de Austin y la Universidad Allan Waren. Para el cálculo realizado se tomó un albedo igual a 0,2 para todos los sitios y todos los períodos considerados. Luego, empleando los valores calculados para la radiación solar anual colectada por un plano inclinado el ángulo óptimo, se los interpoló para obtener una grilla de valores que represente la distribución espacial de la radiación, haciendo así factible mostrar mediante isolíneas la variabilidad espacial del recurso sobre el territorio argentino.

Para el trazado de las isolíneas se utilizó el método de kriging. El kriging es un método geoestadístico destinado a cartografiar la distribución espacial de variables que minimiza los errores de interpolación asociados con el trazado de isolíneas [15]. Esto hace posible estimar la distribución del recurso solar con un procedimiento que minimiza la arbitrariedad que otros mecanismos de trazado presuponen.

Esta metodología ya fue empleada para trazar mapas de irradiación y heliofanía en diversas zonas de Argentina, Paraguay y Brasil y en particular en la Pampa Húmeda Argentina [3], [16]- [21].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla N° 2 se muestran los ángulos óptimos de inclinación del plano para todo del año, y la energía colectada por él en las estaciones empleadas para el cálculo.

La figura N° 1 muestra las isolíneas de irradiación solar anual colectada por planos inclinados un ángulo fijo respecto a la horizontal con un valor óptimo anual que maximiza la energía colectada.

ESTACION	Longitud	Latitud	Energía anual (MWh/m ²)	ángulo óptimo anual (°)	ESTACION	Longitud	Latitud	Energía anual (MWh/m ²)	ángulo óptimo anual (°)
Abra Pampa	-65,85	-22,72	2,32	-23,14	Trelew	-65,27	-43,24	1,77	-35,06
Colonia S. Rosa	-58,12	-28,27	1,52	-23,81	Ushuaia	-68,32	-54,72	1,24	-42,14
Sombrerito	-59,47	-28,65	1,87	-24,53	Ceres	-61,95	-29,88	1,85	-24,79
Cerro Azul	-55,43	-27,62	1,66	-22,68	La Banda	-64,25	-27,70	1,62	-20,84
Cerrillos	-65,47	-24,91	1,72	-22,56	Reconquista	-59,70	-29,17	1,81	-24,17
San Carlos	-69,04	-25,88	1,97	-24,03	Villa Reynolds	-65,38	-33,77	1,87	-27,61
R. de la Frontera	-64,98	-25,75	1,50	-19,72	C.del Uruguay	-58,33	-32,43	1,82	-26,25
R. Sáenz Peña Peña	-60,40	-26,85	1,78	-21,21	Guaileguaychú	-58,62	-32,96	1,67	-25,30
Famailá	-65,41	-27,07	1,59	-21,38	Mazaruca	-59,40	-33,59	1,76	-25,86
El Colorado	-59,37	-26,32	1,56	-20,11	Salto Grande	-57,92	-31,22	1,81	-24,77
Mercedes	-58,02	-29,17	1,91	-24,24	M. Caseros	-57,65	-30,38	1,85	-24,19
La Rioja	-66,82	-29,42	1,67	-26,24	Formosa	-58,23	-26,25	1,79	-21,13
Rafaela	-61,55	-31,22	1,83	-25,36	Las Lomitas	-60,58	-24,70	1,81	-19,51
Córdoba	-64,22	-31,49	1,76	-26,67	Colonia Benítez	-58,93	-27,42	1,80	-21,32
San Juan	-68,42	-31,56	2,23	-26,86	Las Breñas	-61,12	-27,06	1,81	-20,79
Paraná	-60,48	-31,58	1,83	-26,64	Embalse Río III	-64,38	-32,21	1,74	-26,77
Marcos Juárez	-62,15	-32,65	1,75	-26,06	Pilar	-63,88	-31,68	1,88	-26,14
Oliveros	-60,85	-32,19	1,51	-24,56	Laboulaye	-63,37	-34,13	1,82	-28,02
Río IV	-64,23	-33,08	1,81	-27,65	Camaronés	-65,7	-44,79	1,59	-34,73
V. Mercedes	-65,48	-33,72	1,77	-27,55	Faro Blanco	-65,73	-47,20	1,68	-38,61
San Miguel	-58,73	-34,55	1,68	-26,98	Pto. Deseado	-65,92	-47,73	1,38	-38,04
Rama Caída	-68,38	-34,67	1,93	-28,97	P. de Indios	-68,88	-43,86	1,81	-35,24
Anguil	-64,00	-36,52	1,78	-28,81	C. Rivadavia	-67,50	-45,85	1,67	-37,33
Balcarce	-58,30	-37,75	1,69	-29,28	G. Gregores	-70,17	-48,71	1,57	-39,47
Alto Valle	-67,57	-39,02	1,81	-30,34	Río Gallegos	-69,28	-51,60	1,28	-42,53
Bariloche	-71,17	-41,20	1,88	-32,54	L.Argentino	-72,30	-50,33	1,63	-40,72

Tabla 2: Ángulos óptimos de inclinación del plano inclinado para todo del año, y la energía colectada por él en las estaciones empleadas para el cálculo.

Tabla 2: Continuación.

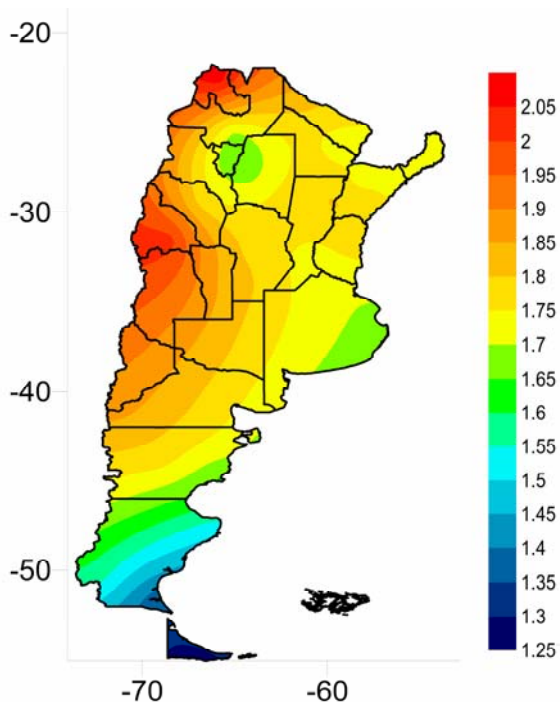


Figura 1: Carta de irradiación solar anual (MWh/m²) colectada por planos inclinados un ángulo óptimo.

En general puede apreciarse que la zona más favorable para el aprovechamiento energético de la radiación solar es la zona noroeste del país, hecho que coincide con las cartas presentadas por Grossi Gallegos [3]. En esa zona, que se extiende desde Mendoza hasta Jujuy, los valores de radiación son muy altos, comparables con los que existen en zonas favorables de España, por ejemplo. El resto del país tiene valores apreciables de irradiación anual en casi toda su extensión, salvo sitios puntuales como la provincia de Tucumán, parte de Buenos Aires, el sur de Santa Cruz y Tierra del Fuego.

Si bien la carta mostrada ha sido confeccionada valiéndose de datos históricos, modelos más recientes de estimación de la radiación solar, basados en el procesamiento de imágenes satelitales y de datos de medición en tierra, muestran una distribución espacial comparable a la encontrada (los datos pueden consultarse en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>). Se destaca también en ellos la zona Noroeste del país como particularmente apta para el aprovechamiento energético de la radiación solar.

4. CONCLUSIONES

La carta confeccionada en el presente trabajo es la primera de Argentina que integra los valores

anuales sobre todo el territorio nacional, dando cuenta de su variabilidad espacial mediante el empleo del kriging para el trazado de las isolíneas de radiación. La carta, que consideró ángulos óptimos de inclinación para los planos de colección, muestra al Noroeste del país como particularmente favorecido en lo que hace a los niveles de irradiación solar recibidos anualmente. Si bien fue confeccionada con datos históricos provenientes de la Red Solarimétrica, trabajos más recientes realizados en base a información satelital revelan acuerdo con ella. Esta confirmación sobre la actualidad de los datos presentados hacen de la carta de distribución anual de energía una valiosa herramienta de diseño y planificación para todo sistema de aprovechamiento que use la radiación solar como fuente de energía.

5. REFERENCIAS

- [1] Commoner, B., "L'energía alternativa", Editorial Riuniti, (1978), 168 pp.
- [2] Grossi Gallegos, H., "Evaluación a nivel de superficie de la radiación solar global en la República Argentina", Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Luján, 1997, 119 pp.
- [3] Grossi Gallegos, H. y Righini, R., "Atlas de Energía Solar de la República Argentina." Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 2007, 74 pp.
- [4] Duffie, J. A. y Beckman, W. A., "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [5] Liu, B.Y.H. y Jordan, R.C., "Daily insolation on surfaces tilted toward the equator", ASHRAE J. 3 (10), 1961, pp 53-59.
- [6] Casermeiro, M. y Saravia, L., "Cálculo térmico horario de edificios solares pasivos", Actas de la 9na. Reunión de Trabajo de la ASADES, San Juan, Argentina, 1984, pp. 41-47.
- [7] Esteves, A., "Simulación Térmica de Edificios. Aplicación de los modelos QUICK y SIMEDIF", Actas de la 7ma. Reunión de Trabajo de la ASADES, Rosario, Argentina, Tomo II, 1994, pp. 543-550.
- [8] Iqbal M., "An Introduction to Solar Radiation", Academic Press, Inc, 1983.
- [9] 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), 1997, pp 221-224.
- [10] 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*, Vol. 3 (2), 1999, pp. 11.33-11.37.
- [11] 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 (3), 2001, pp 177-180.
- [12] Grossi Gallegos, H., “Distribución de la radiación solar global en Argentina. I. Análisis de la Información”, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4, 1998, pp. 119 – 123.
- [13] Grossi Gallegos, H., “Distribución de la radiación solar global en Argentina. II. Cartas de Radiación”, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 5, 1998, pp. 33 – 42.
- [14] Bakhbvalov, N., “Méthodes Numériques”, 1a edición. Éditions Mir, Moscú, 1976.
- [15] Aguiar, R. “Cartografía de la Radiación Solar por Métodos Geoestadísticos. II Curso Regional de Solarimetría”, Red Temática IV, CYTED. Tarapacá, Chile, 2000.
- [16] Righini, R. y Grossi Gallegos, H., “Trazado de las cartas solarimétricas de la Pampa Húmeda empleando métodos geoestadísticos”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4 (2), 2000, pp. 11.25 -11.29.
- [17] Righini, R. y Grossi Gallegos, H., “Evaluación de la distribución de la irradiación solar global en la República del Paraguay en base a datos satelitales”, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol 8, 2000, pp 9-12.
- [18] Righini, R. y Grossi Gallegos, H., “Utilización preliminar de información GOES y métodos geoestadísticos para la evaluación del recurso solar en Brasil”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 5 (2), 2001, pp. 11.19-11.24.
- [19] Grossi Gallegos, H. y Righini, R., “Alternativa para una evaluación preliminar del recurso solar en zonas aisladas de Latinoamérica”, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol 10, 2002, pp. 9-14.
- [20] Righini, R. y Grossi Gallegos, H., “Aproximación a un trazado de nuevas cartas de irradiación solar para Argentina”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 7 (2), 2003, pp. 11.07-11.11.
- [21] Righini, R., Grossi Gallegos, H. y Raichijk, C., “Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina”, *Renewable Energy*, Vol. 30 (8), 2005, pp. 1143-1308.