

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO PARA ENERGÍA SOLAR: REGIÓN SUDOESTE

Rodrigo Alonso Suárez – rodrigoa@fing.edu.uy

Mauro D'Angelo – mdan@fing.edu.uy

Gonzalo Abal – abal@fing.edu.uy

Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
Herrera y Reissig 565, CC 30, CP 11.300, Montevideo, Uruguay

Resumen. *Un año meteorológico típico se construye seleccionando los meses más típicos de un determinado conjunto de datos de largo plazo. En este trabajo utilizamos datos meteorológicos y medidas de irradiación solar global diaria correspondientes a la estación agroexperimental del INIA en La Estanzuela, Colonia, para determinar un año meteorológico típico válido para la región sudoeste del Uruguay. Para cada variable considerada, se selecciona la instancia típica de cada mes minimizando la distancia entre la distribución acumulada del mes candidato con respecto a la correspondiente distribución de largo plazo para ese mes. Las diferentes variables se ponderan en función de su relevancia para aplicaciones vinculadas a la conversión de energía solar en energía térmica o eléctrica. El año típico resultante no es aplicable en otros contextos.*

Palabras clave: *energía solar, año típico, irradiación global*

1. INTRODUCCIÓN

Un año meteorológico típico (AMT) se realiza concatenando datos de 12 meses seleccionados como los más “típicos” a partir del análisis estadístico de un conjunto de variables meteorológicas de largo plazo. El AMT está compuesto, por tanto, por medidas reales y refleja la variabilidad climática real sin dejar de representar la situación meteorológica más típica de cada mes. Por ello, el AMT es de utilidad, por ejemplo, para la simulación y el análisis de sistemas de conversión de energía solar en energía térmica o eléctrica. En este primer trabajo sobre el tema, describimos la elaboración de un AMT válido para el Sudoeste del Uruguay, específicamente generado para ser usado con fines de diseño y modelado de dispositivos de conversión de energía solar en energía útil. Su ámbito de aplicación es algo mayor, pudiendo ser utilizado para actividades agro-meteorológicas con fuerte vínculo con la radiación solar, por ejemplo, como insumo para el cálculo de un índice típico de evapotranspiración de vegetación y suelos. Sin embargo, no debe utilizarse en ámbitos no vinculados con la conversión de energía solar en energía útil. Por ejemplo, los datos de velocidad de viento no son representativos para ser usados para aplicaciones vinculadas a la energía eólica. Tampoco debe usarse el AMT para evaluar el impacto de eventos extremos (períodos de sequía, vientos intensos, ciclos prolongados de lluvia).

Idealmente, un AMT debe estar basado en medidas de irradiación solar de buena calidad y extensión temporal adecuada (una década o más de registros horarios). Estos datos deben estar complementados con medidas de variables meteorológicas relevantes, de extensión y calidad similar. Actualmente, se mide en forma continua desde 2010 la irradiancia solar global sobre plano horizontal en varios puntos del territorio. Esta magnitud no se ha incluido históricamente en las mediciones meteorológicas de rutina y, en consecuencia, en Uruguay existen relativamente pocos datos confiables de irradiación solar con larga estadística. Debido a su utilidad como herramienta de diseño para instalaciones de aprovechamiento de la energía solar, en varios países se han destinado esfuerzos para elaborar AMTs para diversos puntos de su territorio (Skeiker and Ghani, 2009; Anderson et al., 2007; Apple et al., 2006; Bulut, 2004; Wilcox and Marion, 2008; Marion and Urban, 1995). Todos estos trabajos utilizan varaciones de la metodología estadística desarrollada en el Laboratorio SANDIA y luego perfeccionada por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) Wilcox and Marion (2008). Usando esta metodología se generaron hasta el momento tres AMT en EEUU (conocidos como TMY, TMY2 y TMY3). Estas versiones de AMTs se han ido confeccionando al mismo tiempo que fue aumentando progresivamente la extensión geográfica y la calidad de la base de datos de radiación solar.

En Uruguay, existen antecedentes de trabajos que buscan caracterizar el recurso solar de diferentes formas. Se han realizado estudios sobre aspectos particulares del recurso solar, como la distribución espacial (Grossi Gallegos et al., 1989), la componente de radiación difusa (Abal et al., 1986) y la autocorrelación de las series de tiempo de radiación solar (Duomarco et al., 1989), entre otros aspectos. En lo referente a la selección de un conjunto de datos típicos de radiación y meteorológicos para uso en aplicaciones de energía solar, en el trabajo de Duomarco and Luongo (1979) se utilizaron datos de radiación global sobre plano horizontal de dos años (1977-1978) obtenidos en la Facultad de Arquitectura, UdelaR, en Montevideo, en conjunto con medias mensuales de datos de radiación global obtenidos en La Estanzuela, Estación Experimental del INIA en Colonia (1969-1977). En el mencionado trabajo se utilizó el criterio de seleccionar un día típico de la serie de Montevideo para cada mes del año, comparando la irradiancia diaria con la correspondiente media mensual de los datos de Colonia. La hipótesis de trabajo era que los promedios mensuales de irradiación diaria de siete

años de la serie de Colonia, son válidos para Montevideo. Los datos de radiación solar se complementaron con datos de otras variables meteorológicas de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM). Posteriormente, a través de un proyecto de investigación desarrollado en la Facultad de Arquitectura (Piccion and Milicua, 2005), se realizó un análisis de cinco variables meteorológicas diarias correspondientes a seis localidades del Uruguay por un período de doce años (1982-1994) para seleccionar un conjunto típico de utilidad para la evaluación del desempeño térmico de viviendas y otras edificaciones. En este análisis no se contó con datos de radiación solar global, por lo que se utilizó la heliofanía (horas de sol) relevada por DNM como medida indirecta de la irradiación solar. Finalmente, la serie de La Estanzuela, compuesta por 8 años de irradiación solar global sobre plano horizontal, es una serie de buena calidad y fue usada como base en el Mapa Solar del Uruguay (Abal et al., 2010). Dicho trabajo releva la distribución espacial y variación estacional de la radiación solar en todo el Uruguay tomando como base tres series de radiación solar de largo plazo (Colonia, Rivera-Livramento y Melilla) y datos de Heliofanía (DNM) para doce localidades del Uruguay. Ninguno de los trabajos realizados en Uruguay ha usado hasta ahora la metodología SANDIA para obtener un AMT útil para aplicación en simulación y diseño de dispositivos de conversión de energía solar en energía útil. Este trabajo, basado en la serie de datos de radiación de La Estanzuela, es un primer paso en esta dirección.

2. DATOS UTILIZADOS

Todos los datos usados en este trabajo¹ han sido registrados en la Estación Experimental INIA-La Estanzuela “Dr. Alberto Börger” entre 1966 y 2011. Esta estación está ubicada en Latitud $34^{\circ} 20'$ S, Longitud $57^{\circ} 41'$ W y Altura (s.n.m) 81 m. Además de la irradiación solar global diaria sobre plano horizontal (H), se consideran siete variables meteorológicas. La Heliofanía S (el tiempo en horas decimales, durante el cual la radiación solar es superior al umbral de 120 W/m^2), los mm de agua evaporados en 24 horas (E_A o Tanque A) y la humedad relativa promedio (h_r) son variables altamente correlacionadas con H . La temperatura del aire promedio, máxima y mínima diarias (T_a , T_{max} , T_{min} respectivamente) están correlacionadas más débilmente con H . La velocidad media del viento (V_2) en m/s, prácticamente no tiene correlación con H , pero es importante en el cálculo de las pérdidas convectivas en sistemas de captación de energía solar. La Tabla 1 resume las variables y la nomenclatura utilizada, agrupadas por grado de correlación con la radiación solar, H .

variable	símbolo	unidades	C_{XH}
Irradiación global diaria (plano horizontal)	H	MJ/m^2	1,00
Heliofanía	S	horas	0,84
Evaporación diaria (Tanque A)	E_A	mm	0,83
Humedad relativa media	h_r	%	-0,69
Temperatura media del aire	T_a	$^{\circ}\text{C}$	0,51
Temperatura máxima del aire	T_{max}	$^{\circ}\text{C}$	0,60
Temperatura mínima del aire	T_{min}	$^{\circ}\text{C}$	0,29
Amplitud térmica diaria ($T_{max} - T_{min}$)	ΔT	$^{\circ}\text{C}$	0,63
Velocidad media del viento (2m)	V_2	m/s	-0,02

Tabla 1: Variables meteorológicas usadas en este trabajo con su nomenclatura y unidades. Los valores medios son sobre un período de 24 horas. La velocidad de viento (V_2) es a 2 m del suelo. La irradiación solar (H) se midió entre el 01/10/1969 y el 30/09/1977 (8 años). Los registros de las restantes variables corresponden al período del 01/01/1966 a 31/12/2011 (46 años). C_{XH} es el coeficiente de correlación de Pearson de cada variable con la variable H , Ec. (1).

La correlación entre dos variables x e y se caracteriza en este trabajo usando el coeficiente de correlación de Pearson,

$$C_{xy} = \frac{\langle (x - \langle x \rangle)(y - \langle y \rangle) \rangle}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

donde el símbolo $\langle \cdot \rangle$ indica valor medio y $\sigma_{x,y}$ las desviaciones estándar de las variables x, y respectivamente. Este coeficiente, referido a la variable H , se muestra en la Tabla 1 para las variables usadas en este trabajo. La Fig. 1 muestra gráficamente la correlación entre las variables h_r , S , T_a y ΔT con la irradiancia solar global diaria H .

Se cuenta con un registro de 46 años de datos diarios (1969-1977) para todas las variables meteorológicas, salvo la radiación solar H que fue medida entre el 01/10/1969 y el 30/09/1977 (8 años) utilizando un piranómetro Eppley². La calidad de esta serie de radiación es muy buena, siendo una de las bases del Mapa

¹Los datos meteorológicos están disponibles en el sitio del Grupo de Agroclima y Sistemas de información (GRAS) en <http://www.inia.org.uy/online/site/9514I1.php>. Los datos diarios de radiación solar (serie Zuela) se encuentran en <http://www.mesasolar.org.uy>.

²La serie se registró en papel por el Dr. Walter Corsi, luego se planimetró y digitalizó para obtener los totales diarios usados en este trabajo.

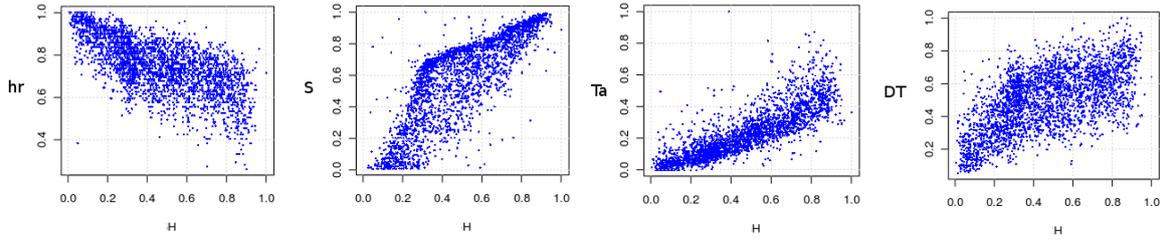


Figura 1: Se muestra gráficamente la correlación entre las variables h_r , S , T_a y ΔT (en las ordenadas) y la radiación solar H (en la abscisa). Todas las variables se expresan en forma adimensionalizada normalizadas a un rango $[0,1]$ para ayudar la visualización.

Solar del Uruguay (Abal et al., 2010). Por razones prácticas, en lugar de utilizar las temperaturas extremas en la selección de los meses típicos se utilizó su diferencia, la amplitud térmica diaria, $\Delta T = T_{max} - T_{min}$. Una vez seleccionados los doce meses que componen el año típico, en formato de planilla incluimos los registros típicos para las seis variables más útiles para el modelado de sistemas de captación y conversión de la energía solar: H , T_a , T_{max} , T_{min} , h_r , V_2 . También se incluyen variables derivadas de éstas que son de relevancia como, por ejemplo, la irradiación difusa, la irradiación directa en plano horizontal y en incidencia normal, la irradiación global en plano inclinado y la amplitud térmica.

3. METODOLOGÍA

En este trabajo seguimos una metodología similar a la utilizada para los años meteorológicos típicos TMY2 y TMY3 (Marion and Urban, 1995; Wilcox and Marion, 2008) elaborados por el NREL (National Renewable Energy Laboratory) para diversas localidades de EEUU.

Cada mes del año aparece representado por varias *instancias* de mes. Cada instancia se corresponde con un año distinto en la base de datos. El siguiente esquema resume las etapas seguidas:

1. Para cada variable, se determina la función de distribución acumulada (CDF) de largo plazo de cada mes, teniendo en cuenta todos los datos de todas las instancias del mes.
2. Para cada variable y cada instancia, se evalúa la distancia entre la CDF de dicha instancia con la correspondiente CDF de largo plazo. Para cuantificar la distancia entre ambas CDFs se utiliza el índice de Filkenstein-Schaffer (FS), que se define más adelante.
3. Para cada instancia se obtiene un único índice FS, ponderando los índices de las diferentes variables con factores adecuados. Se ordenan las instancias de menor a mayor índice FS y se preservan las tres instancias más típicas (con menor FS) de cada mes como candidatas a conformar el AMT.
4. Se aplica un filtro de persistencia, detallado más adelante, que elimina instancias atípicas en términos de la autocorrelación de las variables de irradiancia global y de temperatura.
5. Para cada mes, la instancia de cada mes del conjunto de candidatas que no haya sido descartada por el filtro de persistencia y presente menor índice FS es seleccionada como el mes típico.

Como resultado de este proceso se obtiene el conjunto de los doce meses más representativos de la base de datos, en términos estadísticos.

3.1 DISTANCIA ENTRE DISTRIBUCIONES

Los datos usados en este trabajo están compuestos por registros diarios de siete variables X, Y, Z, \dots . Llamamos N_X al número de datos diarios válidos para la variable X . Estos registros pertenecen a meses diferentes, que indicamos como $m = 1, 2, \dots, 12$. El subconjunto de valores diarios válidos de la variable X correspondientes al mes m tiene N_X^m registros, y por lo tanto se cumple que $\sum_{m=1}^{12} N_X^m = N_X$.

El estimador, $\hat{F}_X^m(x)$, de la función de distribución acumulada (CDF) de la variable X para el mes m , es

$$\hat{F}_X^m(x) = \frac{1}{N_X^m} \sum_{i=1}^{N_X^m} \Theta(x - X_i) \quad (2)$$

donde $\Theta(u)$ es la función de Heavyside (continua por la derecha), definida por

$$\begin{aligned} \Theta(u) &= 1 && \text{if } u \geq 0, \\ \Theta(u) &= 0 && \text{otherwise.} \end{aligned}$$

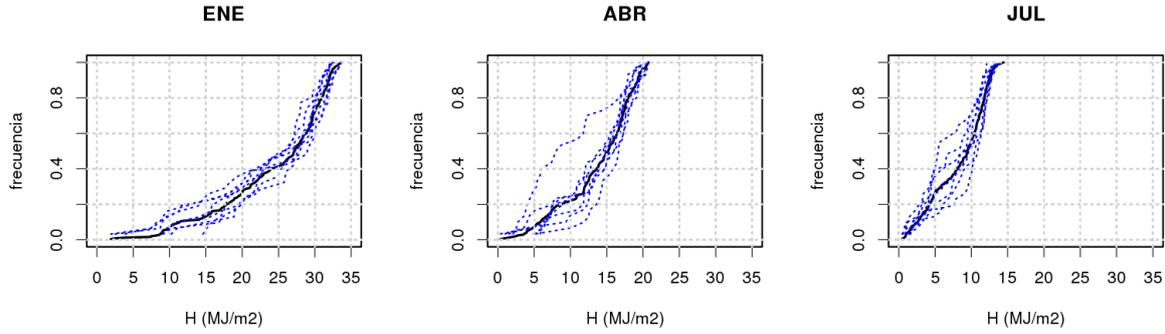


Figura 2: Estimadores de las funciones de distribución acumulada para los meses de Enero, Abril y Julio para la variable H (radiación solar global diaria sobre plano horizontal). En negro (línea gruesa) se indica la función \hat{F}_H^m , Ec. (2), para el mes correspondiente. En azul se indican las funciones $\hat{F}_H^{m,n}$, Ec. (3), correspondientes a las diferentes instancias de cada mes.

La CDF es una función acotada entre 0 y 1. Para muestras grandes, $\hat{F}_X^m(x)$ tiende a la probabilidad de que la variable X para el mes m verifique $X \leq x$. La CDF de la Ec. (2) contiene toda la información de la largo plazo disponible para la variable X para el mes m .

Los datos para el mes m incluyen instancias pertenecientes a diferentes años. Indicamos estas instancias usando un índice $n = 1, 2, \dots, N_y^m$, donde N_y^m es el número de instancias del mes m . El estimador de la CDF para la instancia n del mes m es

$$\hat{F}_X^{m,n}(x) = \frac{1}{N_X^{m,n}} \sum_{i=1}^{N_X^{m,n}} \Theta(x - X_i) \quad (3)$$

donde se consideran solo valores X_i correspondientes a la instancia n del mes m . La Fig. 2 muestra algunas distribuciones acumuladas para la variable H (irradiación solar global diaria) para los meses de Enero, Abril y Julio.

La instancia n^* para la cual la CDF $F_X^{m,n}$ es más cercana a la CDF F_X^m de largo plazo es considerada como el mejor candidato a ser el mes típico con respecto a la variable X . Para evaluar la distancia, utilizamos la estadística de Finkelstein and Schafer (1971) definida por,

$$FS_X^{m,n} \equiv \frac{1}{N_X^{m,n}} \sum_{i=1}^{N_X^{m,n}} \left| \hat{F}_X^m(X_i) - \hat{F}_X^{m,n}(X_i) \right|. \quad (4)$$

donde el índice i recorre los valores de la instancia n . Esta cantidad es el valor medio de la diferencia absoluta entre ambas CDF para la variable X y el mes m . El índice FS se utiliza para elaborar una lista de instancias, ordenadas de menor FS (más típico) a mayor FS (menos típico).

3.2 PONDERACIÓN DE LAS VARIABLES

Siguiendo el procedimiento indicado para cada una de las variables de interés, se obtiene un conjunto de indicadores FS que ordena las instancias de cada mes. Este “ranking” para una variable X no coincide en general con el ranking de acuerdo a otra variable Y . Por ejemplo, una instancia n puede ser típica en términos de temperatura media, pero no en términos de velocidad media del viento.

La forma usualmente usada en la literatura de obtener un único indicador para cada instancia es realizar un promedio ponderado de los indicadores de cada una de las variables,

$$FS^{m,n} = \sum_X w_X FS_X^{m,n} \quad (5)$$

donde la suma es sobre las variables de interés y $\sum_X w_X = 1$. La elección de los pesos w_X de cada variable se realiza en función de la aplicación del AMT. Para aplicaciones de energía solar térmica, es usual (Marion and Urban, 1995; Wilcox and Marion, 2008) ponderar la radiación solar y variables altamente correlacionadas con esta, con un factor cercano a 50 %.

En este trabajo dividimos las variables de interés en tres grupos de acuerdo a su correlación (alta, media o baja) con la irradiación solar global diaria, H . Como se indica en la Tabla 1, el primer grupo incluye a la heliofanía, la evaporación diaria y la humedad relativa media, además de la irradiancia solar y se pondera con un factor $7/12 \approx 0,583$. El segundo grupo incluye las temperaturas extremas y media del aire y la amplitud térmica y se pondera en conjunto con un factor $1/4 \approx 0,250$. El último grupo incluye solo a la velocidad

variable	símbolo	w_X	w_X (%)
Irradiación global diaria (plano horizontal)	H	4/12	33.3
Heliofanía	S	1/12	8.3
Evaporación diaria (Tanque A)	E_A	1/12	8.3
Humedad relativa media	h_r	1/12	8.3
Temperatura media del aire	T_a	2/12	16.7
Amplitud térmica diaria ($T_{max} - T_{min}$)	ΔT	1/12	8.3
Velocidad media del viento (2m)	V_2	2/12	16.7

Tabla 2: Variables usadas para determinar las instancias candidatas a ser típicas para cada mes. Los pesos indicados son los usados en la Ec. (5) para obtener el indicador FS para cada instancia. Las variables T_{max} y T_{min} se utilizan combinadas como amplitud térmica, ya que esta magnitud presenta una mayor correlación con H . La última columna de la derecha indica el valor porcentual (aproximado) de los pesos de cada variable.

media del viento que se pondera con un factor $1/6 \approx 0,167$. La Tabla 2 muestra las siete variables usadas para determinar el indicador FS a partir de la Ec. (5) y los pesos relativos respectivos.

En este punto el indicador global $FS^{m,n}$, dado por la Ec. (5), ordena cada instancia n de cada mes m de menor FS a mayor FS. Las tres instancias con menores indicadores FS son consideradas “candidatas” a integrar el AMT.

3.3 FILTROS DE PERSISTENCIA

Una serie temporal de registros diarios meteorológicos muestra cierto grado característico de autocorrelación. Idealmente, la instancia elegida como típica debe presentar una autocorrelación característica en todas sus variables. Esto no está necesariamente asegurado por el procedimiento anteriormente descrito, basado en la cercanía entre las CDF de corto y largo plazo.

Trabajando sobre las tres instancias con menor FS (candidatos) y siguiendo el procedimiento implementado en (Wilcox and Marion, 2008), centramos la atención en dos variables representativas de los primeros dos grupos: T_a y H . Las CDF de largo plazo de estas variables para cada mes, permiten definir los valores $T_{1/3}^m, T_{2/3}^m$ y $H_{1/3}^m$ para cada mes. Estos valores se definen tales que las respectivas CDF evaluadas en estos puntos resultan en $1/3$ y $2/3$ respectivamente

$$F_{T_a}^m(T_a = T_{1/3}^m) = 1/3, \quad F_{T_a}^m(T_a = T_{2/3}^m) = 2/3, \quad F_H^m(H = H_{1/3}^m) = 1/3.$$

es decir que, por ejemplo, aproximadamente $1/3$ de los valores de T_a de un mes dado serán menores a $T_{1/3}^m$. Para cada mes, definimos los términos “día frío” si se cumple $T_a \leq T_{1/3}^m$, “día cálido” si $T_a \geq T_{2/3}^m$ y “día nublado” si $H \leq H_{1/3}^m$. Se configura una serie si hay *al menos* dos días fríos (o cálidos, o nublados) *consecutivos*. Para asegurar que la autocorrelación no es muy alta o muy baja, consideramos el número de series $NR^{m,n}$ para cada instancia n del mes m , con

- i) días fríos ($T_a \leq T_{1/3}^m$) consecutivos, $NR_1^{m,n}$,
- ii) días cálidos ($T_a \geq T_{2/3}^m$) consecutivos, $NR_2^{m,n}$,
- iii) días nublados ($H \leq H_{1/3}^m$) consecutivos, $NR_3^{m,n}$.

y determinamos el número total de series para la instancia n del mes m como

$$NR^{m,n} = NR_1^{m,n} + NR_2^{m,n} + NR_3^{m,n}. \quad (6)$$

Para cada mes m , de las tres instancias pre-seccionadas, la instancia con mayor $NR^{m,n}$ es considerada atípica en términos de autocorrelación y se descarta como candidata. Si una instancia tiene $NR^{m,n} = 0$, también es considerada atípica y descartada como candidata. Los filtros de persistencia pueden ser más refinados, en la medida en que se cuente con suficiente cantidad de instancias en la base de datos.

De este modo, se llega a una instancia considerada la más típica para cada mes del año. Los doce meses típicos se concatenan para formar el AMT. Es evidente, por la forma en que es construido, que el AMT no representa eventos extremos y no es útil para un análisis de peor caso. En cambio, es un conjunto de 365 días que pueden ser considerados típicos para la localidad considerada. Como esta compuesto de meses reales, refleja la variabilidad y las correlaciones reales entre las variables que lo componen, salvo en los días en que tiene lugar la transición entre un mes y el siguiente.

4. RESULTADOS

Como conjunto de posibles meses candidatos a conformar el AMT se trabajó con el conjunto de datos simultáneo con los datos de radiación solar disponibles (octubre 1969 a setiembre 1977). Esto nos permite

trabajar con siete instancias para cada mes del año³. No obstante, a efectos de la estimación de las CDFs de largo plazo para las variables S , E_A , h_r , T_a , ΔT y V_2 se utilizó toda la estadística disponible, a saber, el período 1966-2011. Aplicando el procedimiento descrito en la Sección anterior a las siete variables indicadas en la Tabla 2, se obtienen índices FS para cada instancia de cada mes del año que se muestran en la Tabla 3.

instancia	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1969	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.088	0.080
1970	0.055	0.122	0.097	0.069	0.056	0.056	0.062	0.056	0.062	0.056	0.075	0.071
1971	0.075	0.092	0.057	0.071	0.082	0.090	0.062	0.090	0.095	0.048	0.135	0.149
1972	0.055	0.093	0.083	0.071	0.093	0.149	0.068	0.154	0.057	0.078	0.064	0.101
1973	0.106	0.078	0.097	0.148	0.046	0.098	0.118	0.118	0.098	0.063	0.095	0.086
1974	0.071	0.119	0.056	0.123	0.118	0.117	0.083	0.058	0.080	0.071	0.082	0.070
1975	0.092	0.094	0.057	0.064	0.053	0.103	0.061	0.076	0.044	0.120	0.081	0.208
1976	0.065	0.050	0.080	0.059	0.057	0.077	0.091	0.102	0.063	0.064	0.061	0.069
1977	0.078	0.118	0.064	0.076	0.065	0.065	0.083	0.068	0.077	0.081	–	–

Tabla 3: Valor del índice FS, Ec. (5), para cada instancia de cada mes. Los pesos utilizados para cada variable se indican en la Tabla 2.

ENE	instancia	FS	NR	status	JUL	instancia	FS	NR	status
1	1970	0.0546	7	AMT	1	1975	0.0609	5	AMT
2	1972	0.0552	9	DES	2	1970	0.0617	6	DES
3	1976	0.0651	8	–	3	1971	0.0621	4	–
FEB					AGO				
1	1976	0.0502	5	AMT	1	1970	0.0555	7	AMT
2	1973	0.0778	6	DES	2	1974	0.0583	5	–
3	1971	0.0920	4	–	3	1977	0.0683	8	DES
MAR					SET				
1	1974	0.0559	6	AMT	1	1975	0.0443	11	DES
2	1971	0.0572	8	DES	2	1972	0.0572	7	AMT
3	1975	0.0574	5	–	3	1970	0.0619	9	–
ABR					OCT				
1	1976	0.0593	9	DES	1	1971	0.0480	13	AMT
2	1975	0.0643	8	AMT	2	1970	0.0557	12	–
3	1970	0.0687	6	–	3	1973	0.0634	15	DES
MAY					NOV				
1	1973	0.0464	9	DES	1	1976	0.0608	7	AMT
2	1975	0.0528	5	AMT	2	1972	0.0644	11	DES
3	1976	0.0566	9	DES	3	1970	0.0749	10	–
JUN					DIC				
1	1970	0.0558	8	DES	1	1976	0.0686	12	DES
2	1977	0.0647	8	DES	2	1974	0.0705	9	AMT
3	1976	0.0777	5	AMT	3	1970	0.0714	7	–

Tabla 4: Candidatos seleccionados para cada mes en base a menor valor del índice FS. En la cuarta columna se indica el número total de series de cada candidato, NR, obtenido a partir de la Ec. (6). En la última columna se indica como “AMT” a las instancias seleccionadas y como “DES” a las descartadas por el filtro de persistencia.

Utilizando los índices FS indicados en la Tabla 3 se determinan tres instancias candidatas (con menores FS) para cada mes del año. Para estas instancias, se realiza el análisis de persistencia y se determina el número de total de series, NR. Los resultados se indican en la Tabla 4 para cada mes del año. El filtro de persistencia descarta la instancia de cada mes con mayor número de series. En cinco casos, esto descartó el candidato con menor índice FS y la siguiente instancia con menor FS es elegida para el AMT. Como resultado de este procedimiento se obtienen las doce instancias típicas que conforman el AMT. Estas instancias, junto a sus índices FS y a su número de series se indican en la Tabla 5.

El resultado final es un conjunto de 365 días con datos diarios típicos de siete variables de interés para la simulación, dimensionado y análisis de sistemas de conversión de energía solar en energía térmica o eléctrica.

³Lo ideal sería contar con varias décadas de datos de radiación solar y poder contar con más instancias. El TMY2 del NREL se basó en datos de la Baseline Solar Radiation Network (BSRN) para el período 1961-1990 (30 años de datos).

mes	instancia	FS	NR
ENE	1970	0.0546	7
FEB	1976	0.0493	5
MAR	1974	0.0559	6
ABR	1975	0.0643	8
MAY	1975	0.0528	5
JUN	1976	0.0787	5
JUL	1975	0.0609	5
AGO	1970	0.0555	7
SET	1972	0.0572	7
OCT	1971	0.0480	13
NOV	1976	0.0608	7
DIC	1974	0.0705	9

Tabla 5: Instancias seleccionadas para el AMT para cada mes del año. Se indican además el índice FS el número de series NR para las instancias seleccionadas. Estas instancias son las indicadas en **negrita** en la Tabla 4.

En la tabla siguiente se muestra, a modo de ejemplo, los valores de irradiación global diaria sobre plano horizontal considerados típicos para Colonia.

día	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	18.9	29.2	23.3	12.3	5.6	8.9	1.6	8.3	17.0	12.3	28.7	20.6
2	22.3	25.9	9.4	19.6	14.4	9.3	2.7	8.2	19.3	21.0	27.6	33.4
3	17.0	30.0	26.2	19.5	10.3	11.4	8.4	2.1	18.3	2.5	15.3	33.6
4	17.7	23.4	26.6	20.6	15.2	2.6	1.6	6.9	17.6	21.1	28.5	32.9
5	15.8	26.3	21.8	18.5	13.8	2.0	12.0	9.0	12.7	22.0	19.0	33.1
6	28.4	30.4	20.9	17.4	13.8	4.0	12.3	2.9	16.1	14.5	28.0	32.0
7	30.7	27.3	21.6	16.5	14.8	7.4	11.8	10.1	3.9	12.0	30.5	31.8
8	20.1	29.1	6.7	19.9	11.5	7.9	13.0	15.4	7.1	19.9	31.1	18.1
9	31.2	30.3	15.4	19.4	6.1	8.9	10.7	15.3	6.7	20.2	29.7	4.6
10	32.7	28.2	23.4	12.1	0.5	10.6	4.4	14.1	19.5	20.9	24.5	28.7
11	31.7	26.3	19.9	14.9	6.6	10.8	2.6	15.3	16.2	23.1	8.4	4.3
12	31.1	19.9	23.1	18.6	3.8	11.8	12.8	11.3	18.1	15.9	25.7	16.0
13	18.2	21.3	17.8	17.1	2.4	7.1	4.2	3.4	17.7	26.9	24.4	32.0
14	29.6	24.9	23.0	17.3	8.9	8.9	3.9	15.4	15.0	27.1	27.2	30.6
15	31.0	22.6	13.8	18.9	11.7	10.3	8.0	15.6	2.3	27.2	27.5	26.2
16	29.8	18.2	24.6	18.1	6.3	4.9	5.7	15.3	2.8	26.0	20.0	26.0
17	30.2	23.4	24.0	17.5	11.9	10.3	12.6	12.2	17.7	25.6	4.0	33.6
18	22.7	20.2	23.4	17.6	12.0	11.2	11.4	9.8	13.3	23.3	29.2	34.4
19	27.5	14.1	23.6	16.0	9.8	11.4	11.6	11.3	18.4	9.4	32.7	28.9
20	27.7	15.3	20.0	11.9	9.5	8.2	11.8	13.8	22.1	20.4	24.6	24.1
21	18.0	12.5	17.8	14.8	11.7	7.0	11.9	16.8	23.1	19.2	31.8	22.2
22	29.6	27.4	13.8	10.8	12.9	8.9	6.7	16.7	23.9	6.7	33.2	30.7
23	24.1	26.9	15.2	15.4	13.5	6.2	3.5	17.8	23.0	14.0	16.1	31.3
24	14.6	25.8	10.0	11.9	12.0	2.4	4.5	16.6	21.5	19.0	12.9	26.5
25	28.2	17.7	6.4	11.8	11.4	8.2	4.9	17.7	8.9	28.3	32.2	21.3
26	17.5	21.7	16.9	0.4	7.9	11.6	14.1	12.8	11.2	26.1	30.0	27.6
27	29.9	23.2	17.6	4.7	11.7	11.6	4.4	15.5	23.5	27.9	28.1	14.8
28	15.1	15.8	17.3	6.5	10.6	11.6	12.6	9.6	22.6	28.1	18.5	33.4
29	26.9		20.4	7.4	9.4	10.3	9.8	15.2	21.2	26.7	30.2	33.5
30	29.5		12.1	11.8	2.0	4.6	12.7	17.5	20.6	22.8	26.6	28.8
31	28.3		19.1		5.2		10.4	18.2		26.3		27.6
promedio	25.0	22.8	18.6	14.6	9.6	8.3	8.3	12.6	16.0	20.5	24.9	26.5

Tabla 6: Valores de irradiación global diaria sobre plano horizontal, H , considerados típicos para Colonia, expresados en MJ/m^2 . La última fila se indica el promedio mensual.

En este año meteorológico típico (AMT) incluimos las siguientes seis variables primarias:

- irradiación diaria global sobre plano horizontal, H , en MJ/m^2 ;
- temperaturas media, máxima y mínima del aire (bulbo seco), T_a, T_{max}, T_{min} , en $^{\circ}\text{C}$;
- humedad relativa media, h_r , en %;
- velocidad media del viento (2m), V_2 , en m/s.

Además, por su utilidad para cálculos térmicos en sistemas solares, se incluyen cinco variables derivadas que se listan a continuación:

- amplitud térmica, $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, en $^{\circ}\text{C}$;

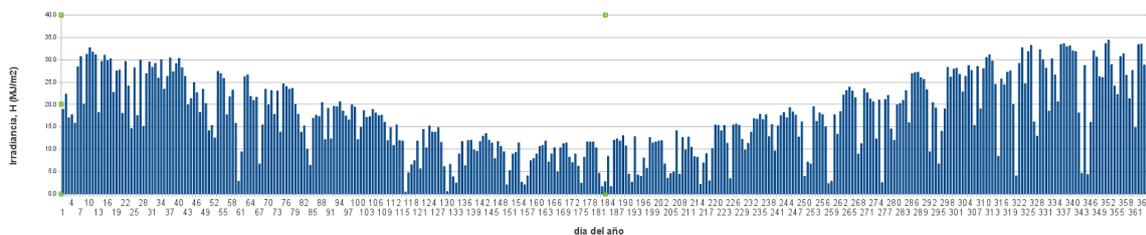


Figura 3: Valores típicos de la irradiación solar global sobre plano horizontal para cada día del año. Los valores indicados son los mostrados en la Tabla 6.

- irradiación difusa diaria sobre plano horizontal, H_{dh} en MJ/m^2 ;
- irradiación directa diaria sobre plano horizontal, H_{bh} en MJ/m^2 ;
- irradiación global diaria sobre plano inclinado (a 35°), H_t en MJ/m^2 ;
- irradiación directa diaria en incidencia normal, H_b en MJ/m^2 ;

Estos registros se encuentran disponibles públicamente en la forma de una planilla electrónica en el sitio <http://www.fing.edu.uy/if/solar/amt>. Este es un trabajo en curso, con cobertura geográfica limitada. En una próxima etapa se realizarán trabajos similares en otros lugares donde se cuenta con datos de irradiancia solar global sobre plano horizontal de calidad comprobada y extensión suficiente. Estos lugares incluyen a Rivera, Salto y Montevideo, con lo cual se espera alcanzar una cobertura geográfica de la mayor parte del territorio nacional.

5. COMENTARIOS FINALES

Siguiendo una metodología bien establecida en la literatura, hemos determinado el año meteorológico típico (AMT) para aplicaciones vinculadas al aprovechamiento de la energía solar con fines energéticos. Se ha trabajado sobre la serie de datos diarios de radiación global sobre plano horizontal adquirida entre 1969 y 1977 en la estación experimental del INIA La Estanzuela, en Colonia. Se han usado además los datos de varias variables meteorológicas adquiridos en la misma estación entre 1966 y 2011 (46 años) a los efectos de determinar las funciones de distribución acumulada (CDF) de largo plazo de estas variables. El trabajo tiene validez local para la región de Colonia y regiones afines desde el punto de vista climático (la región sudoeste del Uruguay y parte de la Provincia de Buenos Aires).

El resultado de este trabajo se presenta en forma de una planilla diaria que incluye los registros típicos de seis variables medidas y cuatro variables derivadas de interés para la simulación de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos. Esta planilla estará disponible en el sitio <http://www.fing.edu.uy/if/solar>. Los valores típicos de irradiación solar global sobre plano horizontal se indican en la Tabla 6 a modo de ejemplo.

Este trabajo es una primer etapa en un plan de dos fases: (i) El desarrollo de AMTs con datos diarios válidos para las regiones Suroeste, Sudeste y Norte del Uruguay. (ii) El desarrollo de AMTs basados en datos horarios. Para la segunda fase, se debe esperar a contar a que las actuales medidas continuas de irradiancia solar alcancen una extensión adecuada.

Agradecimientos. Agradecemos al GRAS del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) por los datos meteorológicos. Este trabajo contó con apoyo financiero de CSIC-UdelaR y del Fondo Sectorial de Energía (FSE-ANII), Proy. 2009-10-1.

REFERENCIAS

- Abal, G., D'Angelo, M., Cataldo, J., and Gutierrez, A. (2010). Mapa Solar del Uruguay. In *Analys of the IVth Latin-American Conference on Solar Energy (IV ISES-CLA)*, Cusco, Perú.
- Abal, G., Tierno, J. E., and Duomarco, J. L. (1986). Estimación y comparación estadística de la fracción difusa de radiación global para montevideo. In *Memoria Técnica del V Congreso Latinoamericano de Energía Solar*, page A12, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Anderson, T., Duke, M., and Carson, J. (2007). A typical meteorological year for energy simulations in Hamilton, New Zeland. *IPENZ Engineering treNZ*, 3.
- Apple, L., Chow, T., Fong, S., and Lin, J. (2006). Generation of a typical meteorological year for Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 47:87–96.
- Bulut, H. (2004). Typical solar radiation year for southeastern Anatolia. *Renewable Energy*, 29:1477–1488.
- Duomarco, J. and Luongo, C. (1979). Año meteorológico típico para el Uruguay. Technical report, División Publicaciones y Ediciones, Universidad de la República, Uruguay.

- Duomarco, J., Tierno, J. E., and Abal, G. (1989). A seasonal auto-regressive model for the clearness index. In *Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Energía Solar (ALES6) y III Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, pages A1 – A16, Cartagena, Colombia.
- Finkelstein, J. and Schafer, R. E. (1971). Improved goodness-of-fit tests. *Biometrika*, 58(3):641.
- Grossi Gallegos, H., Atienza, G., García, M., Saravia, I., Arteaga, A., de Castell M.E.G., Duomarco, J., and Corsi, W. (1989). Evaluación de la distribución del recurso energético solar en la región de la cuenca del río de la plata. In *Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Energía Solar (ALES4) y III Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, pages A49 – A54, Cartagena, Colombia.
- Marion, W. and Urban, K. (1995). User's manual for TMY2 data sets. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Piccioni, A. and Milicua, S. (2005). Tratamiento de datos climáticos de localidades de Uruguay para evaluación térmica y energética de proyectos y edificios. Technical report, Facultad de Arquitectura, Universidad de la República, Uruguay.
- Skeiker, K. and Ghani, B. (2009). A software tool for the creation of a typical meteorological year. *Renewable Energy*, 34:544–554.
- Wilcox, S. and Marion, W. (2008). User's manual for TMY3 data sets. Technical Report NREL/TP-581-43156, National Renewable Energy Laboratory (NREL).