

TABLAS DE SOMBRAS ASOCIADAS A ÁBACOS DE ASOLAMIENTO GENERADAS A PARTIR DE PROMEDIOS MENSUALES DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL

Jean-Claude Pulfer

Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería
Univ. Nacional de Asunción. Campus de la UNA, San Lorenzo, Paraguay.
www.ing.una.py (595 21) 7290010, interno 1100. E mail: jcpulfer@ing.una.py

RESUMEN: En el presente trabajo se desarrolló una metodología de cálculo para la generación de tablas de sombras basadas en ábacos de asolamiento a partir de valores promedios de la radiación solar global mensual horizontal que están fácilmente disponibles para cualquier sitio. Ambos instrumentos juntos sirven para determinar de forma gráfica el impacto de sombras provenientes de obstáculos cercanos que reciben captadores de energía solar, tanto fotovoltaicos, como térmicos, sobre el rendimiento energético de los sistemas de captación durante un año, dividiendo el área del cielo barrida por el sol durante el año en más de 50 porciones y determinando para cada una de ellas el porcentaje de la radiación solar que recibe en promedio sin considerar sombras. Dichos valores que dependen de la latitud, del ángulo de inclinación de la superficie de captación y de su azimut se calcularon con enfoque en Paraguay sobre la base de valores horarios de la radiación solar global horizontal, utilizando un modelo de transformación a partir de los valores de promedios mensuales y transponiéndolos luego a un plano inclinado mediante otro modelo basado en el cálculo de la fracción difusa.

Palabras clave: tablas de sombras, ábacos de asolamiento, fracción difusa, índice de claridad.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el aprovechamiento de la energía solar ha vivido un verdadero boom en muchos países del mundo, sobre todo en el ámbito de la energía fotovoltaica. Este crecimiento es motivado en gran medida por las políticas públicas de los países firmantes del Acuerdo de París que buscan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para evaluar el rendimiento energético de cualquier tipo de sistema solar fotovoltaico o térmico en un determinado sitio se requiere de datos sobre la oferta de la radiación solar global sobre el plano de captación en el transcurso del año. Para eso se recurre generalmente a promedios mensuales de dicho parámetro medidos en un plano horizontal y luego se convierten esos datos al plano inclinado utilizando tablas de transposición o aplicando un software, como por ejemplo “PVWatts” del NREL (<https://pvwatts.nrel.gov/>), ya que el cálculo analítico para lograrlo es muy largo y complejo.

Para Paraguay se cuenta con muy pocos datos históricos de series suficientemente largas de radiación solar global provenientes de estaciones de medición terrestres para poder determinar los valores mensuales medios correspondientes. Como alternativa se puede recurrir a una fuente de datos de cobertura global, que es el “Power Data Access Viewer” de la NASA (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), que también es utilizado por el ya mencionado software “PVWatts”. Los datos primarios de radiación solar que ofrece dicha plataforma son basados mayormente en mediciones satelitales con una resolución de 1° de longitud por 1° de latitud, recopilados durante un periodo de más de 20 años. Cabe mencionar que debido al método remoto de medición que apliquen los satélites la precisión de los valores obtenidos no puede ser tan elevada en comparación con la obtenida por mediciones terrestres, pero de acuerdo a lo mencionado por la NASA en la descripción de la metodología detrás de su banco de datos dice que *“los productos basados en satélites y modelos han mostrado ser lo suficientemente precisos para proveer datos confiables de recursos solares y*

meteorológicos sobre regiones en las cuales datos terrestres son raros o inexistentes” (traducido del inglés por el autor).

Para superficies de captación de energía solar que cuentan en su cercanía con obstáculos, como chimeneas, edificaciones vecinas, árboles, etc., es necesario evaluar la incidencia de las sombras de dichos objetos sobre la cantidad de radiación solar que recibe el plano de captación en el año. Para el efecto se utiliza frecuentemente una metodología gráfica que se basa en ábacos de asolamiento y tablas de sombras asociadas a los mismos. Para ambos se muestra un ejemplo para la ciudad de Formosa, Argentina en la Figura 1 y la Tabla 1 respectivamente. Se encuentran en Secretaría de Gobierno de Energía (2019), en donde se publicaron entre otros dichos instrumentos para las capitales de todas las provincias de Argentina y la capital federal. Para un mismo sitio las tablas son representadas para diferentes ángulos de inclinación (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) y orientaciones del plano captador (-60°, -30°, 0°, 30°, 60°), siendo 0° el norte.

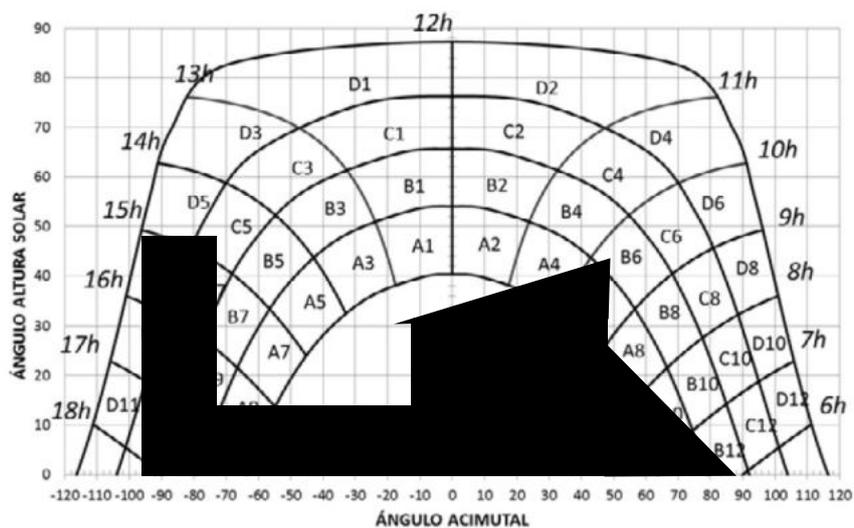


Figura 1: Ejemplo de ábaco de asolamiento con obstáculos para la ciudad de Formosa, Argentina, Fuente: Abaco de Secretaría de Gobierno de Energía (2019) y siluetas de obstáculos de elaboración propia

Tabla 1: Extracto de las tablas de sombras asociadas al ábaco de asolamiento para la ciudad de Formosa, Argentina para ángulo de inclinación $\beta=15^\circ$ y azimut $\gamma=-60^\circ$. Fuente: Secretaría de Gobierno de Energía (2019) reescrito a partir de original

$\beta=15^\circ$ $\gamma=-60^\circ$	A	B	C	D
13	0,00%	0,00%	0,05%	0,42%
11	0,04%	0,27%	0,52%	1,47%
9	1,20%	0,82%	1,08%	2,86%
7	2,17%	1,36%	1,66%	3,81%
5	3,03%	1,82%	2,15%	4,78%
3	3,63%	2,14%	2,47%	5,41%
1	3,84%	2,25%	2,58%	5,80%
2	3,63%	2,13%	2,45%	5,32%
4	3,00%	1,01%	2,10%	4,62%
6	2,17%	1,36%	1,61%	3,63%
8	1,22%	0,84%	1,05%	2,49%
10	0,34%	0,35%	0,52%	1,38%
12	0,01%	0,05%	0,13%	0,44%
14	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%

Para el territorio del Paraguay no se han encontrado tales tablas en la literatura. Por este motivo nos propusimos como principal objetivo de este trabajo de investigación desarrollar una metodología de fácil aplicación para generar las tablas de sombras asociadas a ábacos de asolamiento y los mismos ábacos para cualquier sitio del país y fuera del mismo para cualquier ángulo de inclinación y de azimut de la superficie de captación utilizando como datos de partida solamente los 12 valores de la radiación global mensual horizontal del lugar extraídos de la plataforma “Power Data Access Viewer” de la NASA (o de otra fuente de datos de radiación disponible) y su latitud geográfica, así como la orientación y la inclinación del plano de captación.

METODOLOGÍA

Método gráfico de evaluación del impacto de las sombras

Como se puede apreciar en la Figura 1 el ábaco de asolamiento está compuesto por un lado por 5 líneas longitudinales de forma de campana equidistantes entre sí, que representan la trayectoria del sol por 5 fechas características del año teniendo en su eje horizontal el azimut del sol y en su eje vertical el ángulo de altura solar. Los extremos superior e inferior de las 5 curvas constituyen los solsticios de verano (21 de diciembre) e invierno (21 de junio) respectivamente y la línea central está definida por los equinoccios (21 de marzo y septiembre). Para las 2 líneas intermedias se determinaron las fechas de tal modo a que las curvas correspondientes del ábaco queden visualmente en el medio entre las mencionadas anteriormente (21 de febrero y octubre, 21 de abril y agosto respectivamente). Por otro lado, el ábaco contiene 13 líneas transversales que representan las horas solares (de 6 a 18 h). Para sitios más alejados del ecuador se requiere de mayor cantidad de líneas transversales para tomar en cuenta los horarios correspondientes de salida y entrada del sol en verano. Todas esas líneas del ábaco forman un conjunto de cuadriláteros que son rotulados cada uno con una letra de A a D en combinación con un número de 1 a 14. Para realizar el análisis de las sombras hay que elegir entonces el ábaco que corresponde a la latitud del sitio que se está evaluando. Luego se dibujan en el mismo los contornos de los obstáculos midiendo para cada uno de sus puntos característicos el ángulo de altura y el azimut vistos desde el centro del plano de captación (ver Figura 1).

Para facilitar la reproducción de los contornos de los obstáculos en el ábaco se pueden utilizar por ejemplo el instrumento de medición denominado “Solar Pathfinder”. Es un equipo de forma hemisférica que se coloca en posición horizontal sobre un trípode en el lugar donde se quieren evaluar las sombras provenientes de obstáculos en los alrededores. En la base del equipo se coloca un papel negro que contiene el ábaco de asolamiento en formato polar correspondiente a la latitud del sitio, orientándolo correctamente en relación al norte. En la superficie del domo de plástico transparente que cubre el equipo se puede apreciar una imagen panorámica del entorno del sitio. Mediante un lápiz blanco se dibujan luego sobre el papel negro los contornos de los obstáculos a través del espacio que existe entre la base y el domo. Posteriormente, esos contornos se pueden trasladar fácilmente al ábaco de asolamiento en formato cartesiano. Otra posibilidad para el mismo efecto es la aplicación para teléfonos celulares inteligentes denominada “Sun Surveyor”, que dispone en su versión profesional de una herramienta de realidad aumentada. Dentro de la imagen reproducida en la pantalla del celular proveniente de la cámara están dibujadas entre otros la línea del horizonte, la posición del sol y la trayectoria del sol del día actual o de cualquier otra fecha, así como las trayectorias del sol de los días de solsticio y de equinoccio. Además, están dibujadas las líneas de azimut y de altura para cada 15°, lo que permite determinar con bastante facilidad las coordenadas de los obstáculos que se encuentran en la imagen haciendo capturas de pantalla. Una vez dibujados todos los contornos de los obstáculos en el ábaco de asolamiento, se evalúa de manera visual el porcentaje que los obstáculos ocupan de cada cuadrilátero afectado, compilando para cada uno de ellos el porcentaje que cubre, es decir el 25, el 50, el 75 o el 100% del área correspondiente.

Como siguiente paso, en la tabla asociada al ábaco que corresponde al sitio evaluado, acorde al modelo de la Tabla 1, con el ángulo de inclinación y el azimut del plano de captación correspondiente se multiplica para cada cuadrilátero afectado por sombra el valor porcentual que indica la tabla con el porcentaje del área del cuadrilátero cubierto por la sombra. Si por ejemplo un cuadrilátero está cubierto por 75% de su superficie por sombra y el valor correspondiente en la tabla es de 2,17%, se

reduce a 0,54%. El porcentaje total de pérdidas anuales por las sombras se obtiene entonces al restar de 100% la suma de los valores porcentuales de la totalidad de los cuadriláteros del ábaco de asolamiento.

Método de dibujo de los ábacos de asolamiento

Para poder dibujar el ábaco de asolamiento para una determinada latitud se necesita computar para cada una de las 5 fechas características del año mencionadas anteriormente el ángulo de altura (α_s) y el azimut del sol (γ_s) para cada hora solar entre las 5:00 h y las 19:00 h considerando la latitud del sitio a ser evaluado. Para latitudes mayores a unos 35° sur el rango horario tiene que ser ampliado para tomar en cuenta los días más largos en verano. Dichos ángulos se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$\alpha_s = \sin^{-1}(\sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega) \quad (1)$$

$$\gamma_s = \text{signo}(\omega) \cdot \left[2\pi - \cos^{-1} \left(\frac{\cos\delta \cdot \cos\omega - \sin\alpha_s \cdot \cos\phi}{\cos\alpha_s \cdot \sin\phi} \right) \right] \quad (2)$$

en donde:

Φ : latitud geográfica del sitio

δ : declinación del sol

ω : ángulo horario del sol

De este modo el azimut es 0° en dirección del norte, 90° en dirección del este y -90° en dirección del oeste. El ángulo horario es 0° al mediodía, negativo a la mañana y positivo a la tarde. A las 6:00 h es de -90° y a las 18:00 h es de 90°. La declinación es un ángulo que depende de la fecha. Es 0° en los días de equinoccio, 23,5° en el solsticio de verano y -23,5° en el solsticio de invierno. En latitudes entre el ecuador y el trópico de capricornio en los días de verano el sol puede pasar al otro lado del zenit. Para esos casos la fórmula para calcular (α_s) tiene que ser modificada a la siguiente forma:

$$\alpha_s = 2\pi - \sin^{-1}(\sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega) \quad (3)$$

Método de elaboración de las tablas de sombras

El primer paso consiste en generar para cada mes valores horarios de radiación global horizontal media (G_h) utilizando la fórmula propuesta por Collares-Pereira M. y Rabl A. (1979a), que utiliza como variables los promedios mensuales de la radiación global diaria (G), el ángulo horario (ω) y el ángulo horario de la puesta del sol (ω_s). Teóricamente, para generar dichos valores se podrían utilizar también los datos de irradiancia horaria para el sitio de interés disponibles en la plataforma “Power Data Access Viewer” por un periodo de más de 20 años (2001 a 2022) y promediarlos para cada hora del año. Sin embargo, en este caso el método dejaría de ser de fácil aplicación, ya que el proceso de calcular los promedios es engorroso llevando mucho tiempo:

$$G_h = G \cdot (a + b \cos\omega) \frac{\frac{\pi}{24}(\cos\omega - \cos\omega_s)}{\sin\omega_s - \left(\frac{2\pi\omega_s}{360}\right) \cos\omega_s} \quad (4)$$

en donde los coeficientes a y b son definidos como:

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (5)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (6)$$

ω_s se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\delta \cdot \tan\Phi) \quad (7)$$

Para luego poder transformar esos valores desde el plano horizontal al plano inclinado de forma analítica es necesario discriminar primero la radiación global horizontal horaria en sus componentes directa y difusa para luego transponerlos por separado al plano inclinado. La plataforma “Power Data Access Viewer” no cuenta con datos referentes a la radiación difusa o directa, razón por la cual se tiene que recurrir a algún modelo que permita separar los dos tipos de radiación. En Paraguay tampoco se cuenta hasta ahora con ninguna estación que haya medido por separado la irradiancia global y la irradiancia difusa durante un periodo prolongado. Por este motivo es necesario recurrir a algún modelo a pesar de que están sujetos a una cierta incertidumbre. Varios autores han propuesto en el pasado fórmulas empíricas para realizar esa separación, tanto para valores diarios como horarios. Los pioneros en esta tarea fueron Liu B.Y.H. y Jordan R.C. (1960). Igual que el método de varios otros autores que siguieron (Orgill J.F. y Hollands K.G.T., 1977; Erbs D.G. et al., 1982; Reindl D.T. et al., 1990; Lam J.C. y Li D.H.W., 1996; Boland J. et al., 2001; Oliveira A.P. et al., 2002; Soares J. et al., 2004) su método se basa en el cálculo de la fracción difusa (F_d) en función del índice de claridad (k_T). Esas correlaciones se obtuvieron generalmente mediante análisis estadísticos de valores medidos en varios sitios geográficos con diferentes latitudes y tipos de clima.

Pero varios autores, entre ellos principalmente los ya mencionados Reindl D.T. et al. (1990) y Boland J. et al. (2001) lo encontraron conveniente considerar para el cálculo de la fracción difusa (F_d) de valores horarios de la radiación global, aparte del índice de claridad, otros parámetros astronómicos y meteorológicos. Reindl D.T. et al. (1990) por ejemplo propusieron, luego de haber hecho un análisis de la pertinencia de una serie de parámetros, incluir por un lado el ángulo de altura del sol (α_s) y por otro lado la temperatura del ambiente (T_a) y la humedad relativa (H), que son parámetros que normalmente se miden en cualquier estación meteorológica. Sobre la base de mediciones realizadas en diferentes sitios del mundo utilizando valores horarios de un año completo para cada uno de los sitios analizados Reindl D.T. et al. (1990) desarrollaron 3 diferentes grupos de ecuaciones empíricas para el cálculo de la fracción difusa (F_d) para la radiación solar horaria con diferentes cantidades de parámetros. (F_d) es la relación entre la radiación difusa y la global. El primer grupo considera como único parámetro el índice de claridad (k_T), el segundo adicionalmente el ángulo de altura (α_s) y el tercero incluyendo también la temperatura del ambiente (T_a) y la humedad relativa (H). Luego compararon entre sí los resultados en relación a la suma de los residuos cuadrados (SRC) para evaluar su precisión. Finalmente validaron estas ecuaciones con un conjunto de datos de otro sitio que no fue utilizado para obtener las ecuaciones. Cada grupo se compone a su vez de 3 ecuaciones diferentes según el intervalo del (k_T) que hallaron:

1. Un parámetro:

$$0 \leq k_T \leq 0,3: F_d = 1,02 - 0,248 k_T \quad (8a)$$

$$0 \leq k_T \leq 0,78: F_d = 1,45 - 1,67 k_T \quad (8b)$$

$$0,78 \leq k_T: F_d = 0,147 \quad (8c)$$

2. Dos parámetros:

$$0 \leq k_T \leq 0,3: F_d = 1,02 - 0,254 k_T + 0,0123 \sin \alpha_s \quad (9a)$$

$$0 \leq k_T \leq 0,78: F_d = 1,4 - 1,749 k_T + 0,177 \sin \alpha_s \quad (9b)$$

$$0,78 \leq k_T: F_d = 0,486 - 0,182 \sin \alpha_s \quad (9c)$$

3. Cuatro parámetros:

$$0 \leq k_T \leq 0,3: F_d = 1,000 - 0,232 k_T + 0,0239 \sin \alpha_s - 0,000682 T_a + 0,0195 H \quad (10a)$$

$$0 \leq k_T \leq 0,78: F_d = 1,392 - 1,716 k_T + 0,267 \sin \alpha_s - 0,00357 T_a + 0,106 H \quad (10b)$$

$$0,78 \leq k_T: F_d = 0,426 k_T - 0,256 \sin \alpha_s - 0,00349 T_a + 0,0734 H \quad (10c)$$

Reindl D.T. et al. (1990) encontraron que al incrementar la cantidad de parámetros la SRC disminuye de forma significativa para la mayoría de los sitios analizados. Por ejemplo, para el sitio de Cabo Cañaveral en Florida con 3596 conjuntos de datos obtuvieron para las ecuaciones de un solo parámetro un valor del SRC de 55,49. Con 2 parámetros bajó a 50,63 y con 4 parámetros a 45,85. Pero incluso su ecuación con un solo parámetro arrojó mejores resultados de SRC que la correlación publicada por

Erbs D.G. et al. (1980), que es una correlación ampliamente utilizada basada solo en el índice de claridad, cuyo SRC para Cabo Cañaverl era de 57,97. La mejora del SRC entre 1 y 2 parámetros era en promedio entre todas las estaciones analizadas del 9,2%. En cambio, entre 2 y 4 parámetros la mejora media era de solo 5,8%. Cabe mencionar que Cabo Cañaverl se encuentra a una latitud de 28° N, lo que es similar a la del sur de Paraguay, pero en el hemisferio sur, y también tiene un clima húmedo similar. Por eso consideramos que el hecho de que Reindl D.T. et al. (1990) convalidaron su modelo con los datos de Cabo Cañaverl sugiere que el modelo puede ser aplicado con bastante precisión para Paraguay.

Normalmente no se disponen de promedios horarios de cada mes, ni de temperatura, ni de humedad relativa para la mayoría de las estaciones meteorológicas, sino solo de promedios mensuales, así como de máximos y mínimos medios mensuales. Por esta razón se consideró más conveniente para los efectos del presente estudio de utilizar la fórmula de solo 2 parámetros, es decir el índice de claridad y el ángulo de altura. Es fácilmente entendible que el ángulo de altura tiene una influencia importante, ya que a menor altura los rayos solares tienen que atravesar una mayor capa de la atmósfera, lo que incrementa la parte difusa de la radiación. Analizando los valores de (k_T) obtenidos se pudo constatar que se encuentran todos en el rango de 0,3 a 0,78 razón por la cual era suficiente aplicar la fórmula 2b) para todos los cálculos. Los valores del índice de claridad (k_T) para cada hora fueron calculados utilizando la siguiente fórmula:

$$k_T = \frac{G_h}{G_{eh}} \quad (11)$$

en donde:

G_h : radiación global horaria horizontal (W/m^2)

G_{eh} : radiación extraterrestre horaria horizontal (W/m^2)

Este último parámetro se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$G_{eh} = C_s \cdot E0 (\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \quad (12)$$

en donde:

C_s : constante solar igual a 1367 W/m^2

$E0$: ecuación del tiempo

$E0$ se calculó mediante la siguiente fórmula empírica simplificada:

$$E0 = 1 + 0,033 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n}{365} \right) \quad (13)$$

en donde:

n : día del año

Una vez obtenida la fracción difusa (F_d) para cada hora del año se realizó el cálculo de transposición de los 3 diferentes tipos de radiación al plano inclinado aplicando las siguientes fórmulas para la radiación directa (G'_b), difusa (G'_d) y el albedo (G'_a):

$$G'_b = abs \left[(1 - F_d) \cdot G \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \alpha_s} \right] \quad (14)$$

en donde:

θ : ángulo entre la incidencia del sol y la normal al plano inclinado

$$G'_d = F_d \cdot G \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (15)$$

$$G'_a = G \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (16)$$

en donde:

β : ángulo de inclinación del plano de captación

ρ : reflectancia de las superficies cercanas al captador

El ángulo (θ) se calcula mediante la siguiente fórmula trigonométrica:

$$\cos \theta = \sin \delta (\sin \phi \cdot \cos \beta - \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) + \cos \delta \cdot \cos \omega (\cos \phi \cdot \cos \beta + \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (17)$$

en donde:

γ : azimut del plano de captación

La radiación global en el plano inclinado (G') se obtiene entonces sumando los 3 tipos de radiación:

$$G' = G'_b + G'_d + G'_a \quad (18)$$

Este cálculo se realizó para todas las horas del día durante las cuales el sol se encuentra por encima del horizonte y para los 12 meses del año considerando los días 21 de cada mes como fecha representativa, ya que como vimos anteriormente las 5 líneas longitudinales del ábaco de asolamiento se refieren a ese día de los todos los meses que lo conforman. A partir de esos valores se calculó luego la radiación global horaria correspondiente a cada cuadrícula del ábaco de asolamiento. Para eso se tomaron en cuenta para cada cuadrícula los meses que forman parte de la franja del ábaco a la cual pertenece la respectiva cuadrícula. Dado que las líneas que constituyen el ábaco se refieren a los días 21 de los respectivos meses, se distribuyeron dichos meses proporcionalmente entre dos franjas contiguas. La distribución de los meses que corresponden a cada franja del ábaco está representada en la Tabla 2. De este modo se obtiene la tabla de sombras compuesta por los valores absolutos de la radiación solar horaria de todo el año. Como último paso se calculan los valores relativos de cada cuadrícula en % dividiendo los respectivos valores absolutos de cada cuadrícula por la sumatoria de los 56 valores absolutos de la tabla obteniendo de este modo la tabla de sombras buscada. Al configurar todo este procedimiento descrito arriba en tablas Excel es posible generar el ábaco de asolamiento y calcular en un instante la tabla de sombras para cualquier sitio de Paraguay y de otros países del hemisferio sur.

Tabla 2: Meses y sus fracciones considerados para las 4 franjas que componen el ábaco de asolamiento

Franja	Meses
A	30% abril, mayo, junio, julio, 70% agosto
B	30% marzo, 70% abril, 30% agosto, 70% septiembre
C	30% febrero, 70% marzo, 30% septiembre, 70% octubre
D	30% octubre, noviembre, diciembre, enero, 70% febrero

RESULTADOS

A título de ejemplo generamos las tablas de sombras asociadas al ábaco de asolamiento para la ciudad de Asunción que tiene una latitud geográfica de $-25,3^\circ$ utilizando los valores de la radiación solar global horizontal por cada mes en $\text{kWh/m}^2\text{d}$ obtenidos de la NASA. El ábaco de asolamiento está representado en la Figura 2. Los resultados de la generación de los valores horarios medios de radiación global por cada mes a partir de la radiación global media mensual se encuentran en la Tabla 3.

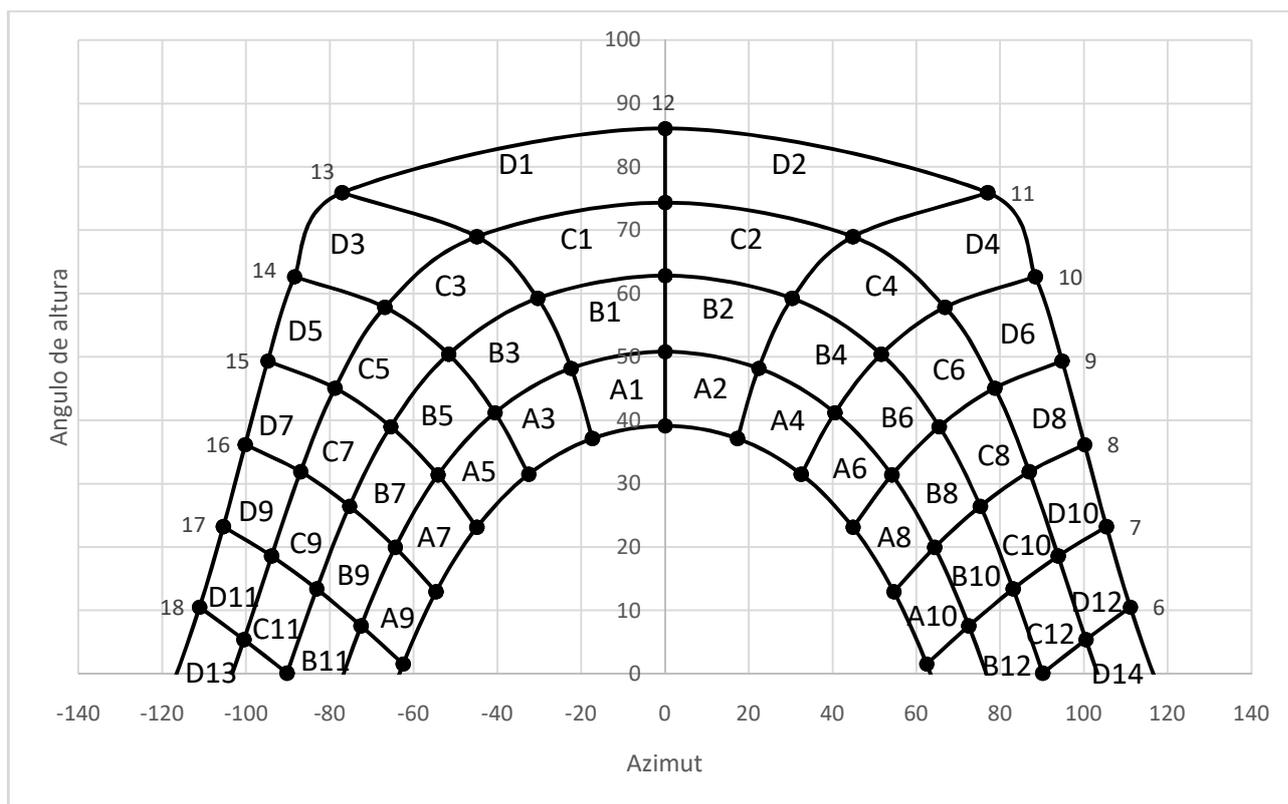


Figura 2: Abaco de asolamiento generado para la ciudad de Asunción (latitud: $-25,3^\circ$)

Tabla 3: Valores horarios medios de radiación global por cada mes a partir de la radiación global media mensual de la NASA para Asunción en kWh/m^2

hora	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,085	0,044	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,043	0,083	0,098
7	0,239	0,191	0,136	0,076	0,037	0,021	0,034	0,073	0,125	0,178	0,230	0,249
8	0,412	0,358	0,297	0,219	0,166	0,133	0,155	0,209	0,273	0,332	0,395	0,416
9	0,582	0,526	0,460	0,369	0,305	0,256	0,287	0,353	0,424	0,487	0,557	0,580
10	0,726	0,670	0,603	0,501	0,430	0,366	0,404	0,480	0,556	0,620	0,695	0,719
11	0,823	0,768	0,700	0,592	0,516	0,443	0,486	0,567	0,645	0,709	0,788	0,812
12	0,858	0,802	0,734	0,625	0,547	0,470	0,515	0,598	0,677	0,741	0,820	0,845
13	0,823	0,768	0,700	0,592	0,516	0,443	0,486	0,567	0,645	0,709	0,788	0,812
14	0,726	0,670	0,603	0,501	0,430	0,366	0,404	0,480	0,556	0,620	0,695	0,719
15	0,582	0,526	0,460	0,369	0,305	0,256	0,287	0,353	0,424	0,487	0,557	0,580
16	0,412	0,358	0,297	0,219	0,166	0,133	0,155	0,209	0,273	0,332	0,395	0,416
17	0,239	0,191	0,136	0,076	0,037	0,021	0,034	0,073	0,125	0,178	0,230	0,249
18	0,085	0,044	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,043	0,083	0,098
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Suma	6,595	5,917	5,129	4,141	3,456	2,905	3,247	3,962	4,723	5,480	6,316	6,595

Tabla 4: Tabla de sombras generada para Asunción con inclinación de 15° y azimut de 30° del plano de captación

	A	B	C	D
13	0,00%	0,01%	0,05%	0,22%
11	0,12%	0,16%	0,28%	0,86%
9	0,67%	0,54%	0,72%	1,84%
7	1,55%	1,05%	1,26%	2,96%
5	2,45%	1,54%	1,78%	4,03%
3	3,20%	1,95%	2,20%	4,89%
1	3,65%	2,20%	2,45%	5,41%
2	3,72%	2,23%	2,49%	5,49%
4	3,37%	2,05%	2,30%	5,12%
6	2,69%	1,68%	1,92%	4,36%
8	1,80%	1,19%	1,41%	3,33%
10	0,87%	0,67%	0,86%	2,19%
12	0,21%	0,22%	0,35%	1,09%
14	0,00%	0,01%	0,06%	0,29%
suma	24,30%	15,50%	18,13%	42,08%
	100,00%			

Tabla5: Tabla de sombras generada para Asunción con inclinación de 15° y azimut de 0° del plano de captación

	A	B	C	D
13	0,00%	0,00%	0,03%	0,22%
11	0,17%	0,18%	0,29%	0,94%
9	0,78%	0,61%	0,79%	2,00%
7	1,69%	1,12%	1,34%	3,14%
5	2,60%	1,62%	1,85%	4,19%
3	3,32%	2,01%	2,25%	5,00%
1	3,72%	2,23%	2,47%	5,44%
2	3,72%	2,23%	2,47%	5,44%
4	3,32%	2,01%	2,25%	5,00%
6	2,60%	1,62%	1,85%	4,19%
8	1,69%	1,12%	1,34%	3,14%
10	0,78%	0,61%	0,79%	2,00%
12	0,17%	0,18%	0,29%	0,94%
14	0,00%	0,00%	0,03%	0,22%
suma	24,57%	15,54%	18,07%	41,82%
	100,00%			

Tabla 6: Tabla de sombras generada para Asunción con inclinación de 45° y azimut de 0° del plano de captación

	A	B	C	D
13	0,00%	0,00%	0,04%	0,25%
11	0,23%	0,19%	0,28%	0,84%
9	0,94%	0,64%	0,76%	1,73%
7	1,93%	1,17%	1,30%	2,82%
5	2,92%	1,68%	1,82%	3,84%
3	3,71%	2,09%	2,22%	4,63%
1	4,15%	2,32%	2,45%	5,06%
2	4,15%	2,32%	2,45%	5,06%
4	3,71%	2,09%	2,22%	4,63%
6	2,92%	1,68%	1,82%	3,84%
8	1,93%	1,17%	1,30%	2,82%
10	0,94%	0,64%	0,76%	1,73%
12	0,23%	0,19%	0,28%	0,84%
14	0,00%	0,00%	0,04%	0,25%
suma	27,79%	16,17%	17,73%	38,32%
	100,00%			

Para la transposición de la radiación global horaria a un plano inclinado se implementaron a título de ejemplo tres diferentes casos, todos aplicando los valores de radiación global mensual y de la latitud de la ciudad de Asunción. En el caso 1 se tiene un ángulo de inclinación de 15° y un azimut de 30° en relación al norte. En el caso 2 se consideró el azimut en 0° conservando la inclinación y en el caso 3 la inclinación se incrementó a 45° y el azimut es igualmente de 0°. En los 3 casos la reflectancia de la superficie de apoyo es de 0,2. Los resultados de los cálculos están representados en las Tablas 4, 5 y 6.

Analizando los diferentes valores de la Tabla 4 se nota una total coherencia de los mismos entre sí. Como es a esperar los valores porcentuales más elevados se registran durante las horas centrales del día en verano (D1 y D2) y los más bajos en horas cercanas a la salida y la puesta del sol. Los valores en la Tabla 4 no son simétricos entre la mañana (números pares) y la tarde (números impares), lo que se debe al hecho que el plano inclinado tiene un azimut diferente de 0°. Mayor es el valor del azimut, mayor va ser la diferencia de los valores entre la tarde y la mañana. Comparando las sumatorias de los valores de las 4 columnas A, B, C y D se tienen valores mayores en A y D que en B y C, lo que corresponde a lo esperado, ya que una mayor cantidad de meses se encuentran en las franjas A y D por ser los meses cercanos a los solsticios (ver Tabla 3).

Comparando las Tablas 5 y 6 entre sí se puede observar el efecto de una mayor inclinación del plano de captación sobre los valores de porcentaje de la tabla de sombras en las diferentes franjas del ábaco. Al aumentar el ángulo de inclinación la suma de los valores de los meses de invierno (A) se incrementa ligeramente de 24,57% a 27,79%, mientras que la de los meses de verano (D) se reduce de 41,82% a 38,32%.

Cómo última etapa del desarrollo de este método con el objetivo de verificar su validez se realizó una comparación de sus resultados para dos sitios de la República Argentina que son vecinos del territorio de Paraguay (ciudades de Formosa y Posadas, Misiones) con los publicados en Secretaría de Gobierno de Energía (2019). Formosa es una ciudad ubicada sobre el río Paraguay frente a la ciudad paraguaya de Alberdi a unos 150 km al sur de Asunción con una latitud de -26,2°. La ciudad de Posadas teniendo una latitud de -27,6° se encuentra a pocos km de distancia de la ciudad de Encarnación del otro lado del río Paraná. El documento utilizado para la comparación se basa en un trabajo de maestría realizado

por Wallace C. (2017) utilizando el modelo anisotrópico para la radiación difusa de Pérez R. et al. (1988). Se eligieron como ejemplos para el plano de captación una inclinación de 15° y de 45°, ambos con un azimut de 0° y una reflectancia para el albedo de 0,2. Se notan diferencias relativamente pequeñas de los valores entre ambos métodos. Para ilustrarlas se representaron en las Tablas 7 y 8 las respectivas sumas de las columnas A a D. Con 15° de inclinación la mayor diferencia con 5,07% se registró en la columna A y la menor en la columna B con 0,04%. Con 45° de inclinación las diferencias son mayores (mayor: 12,03% en D; menor: 0,85% en C). Cabe mencionar que se desconoce en detalle la metodología aplicada para la elaboración de las tablas en Secretaría de Gobierno de Energía (2019).

Tabla 7: Comparación de las sumas de las columnas entre las tablas de sombras para Formosa entre la publicada en Secretaría de Gobierno de Energía (2019) (arriba) y la generada mediante el cálculo propio (abajo) con inclinación de la superficie captadora de 15° y su azimut de 0°

	A	B	C	D	Suma
Guía	26,00%	15,53%	18,17%	40,18%	99,88%
Cálculo	24,68%	15,54%	18,04%	41,74%	100,00%
Diferencia	-5,07%	0,04%	-0,70%	3,88%	

Tabla 8: Comparación de las sumas de las columnas entre las tablas de sombras para Formosa entre la publicada en Secretaría de Gobierno de Energía (2019) (arriba) y la generada mediante el cálculo propio (abajo) con inclinación de la superficie captadora de 45° y su azimut de 0°

	A	B	C	D	Suma
Guía	31,91%	16,81%	17,50%	33,81%	100,03%
Cálculo	28,07%	16,16%	17,65%	38,12%	100,00%
Diferencia	-12,03%	-3,86%	0,85%	12,75%	

Ya que para las fechas representativas de los 12 meses del año fueron considerados los días 21 en vez de los días 15 que corresponde a la mitad del mes se intentó evaluar los resultados modificando los valores de la radiación solar global diaria media horizontal para cada mes realizando un promedio ponderado con 70% del respectivo mes y 30% del siguiente mes. De este modo las diferencias con los valores para Formosa de Secretaría de Gobierno de Energía (2019) se redujeron aún más (ver Tablas 9 y 10). Con 15° de inclinación la mayor diferencia con 2,81% se registró en la columna D y la menor en la columna B con 0,06%. Con 45° de inclinación las diferencias son también mayores (mayor: 11,34% en D; menor: 0,76% en C).

Tabla 9: Comparación de las sumas de las columnas entre las tablas de sombras para Formosa entre la publicada en Secretaría de Gobierno de Energía (2019) (arriba) y la generada mediante el cálculo propio (abajo) con inclinación de la superficie captadora de 15° y su azimut de 0° con los valores de radiación solar global media diaria modificada

	A	B	C	D	Suma
Guía	26,00%	15,53%	18,17%	40,18%	99,88%
Cálculo	25,30%	15,54%	17,85%	41,31%	100,00%
Diferencia	-2,68%	0,06%	-1,76%	2,81%	

Tabla 10: Comparación de las sumas de las columnas entre las tablas de sombras para Formosa entre la publicada en Secretaría de Gobierno de Energía (2019) (arriba) y la generada mediante el cálculo propio (abajo) con inclinación de la superficie captadora de 45° y su azimut de 0° con los valores de radiación solar global media diaria modificada

	A	B	C	D	Suma
Guía	31,91%	16,81%	17,50%	33,81%	100,03%
Cálculo	28,87%	16,11%	17,37%	37,65%	100,00%
Diferencia	-9,51%	-4,14%	-0,76%	11,34%	

Para Posadas los resultados con el mismo procedimiento utilizado para Formosa en las Tablas 9 y 10 son representadas en las Tablas 11 y 12. Las diferencias con los valores publicados en Secretaría de Gobierno de Energía (2019). Con 15° de inclinación la mayor diferencia con -5,04% se registró en la columna A y la menor en la columna C con 0,12%. Con 45° de inclinación las diferencias son también mayores (mayor: 12,99% en D; menor: 1,56% en C). En síntesis, quedó suficientemente comprobado que a pesar de las mencionadas diferencias menores el método desarrollado en el presente trabajo puede ser considerado como válido.

Tabla 11: Comparación de las sumas de las columnas entre las tablas de sombras para Posadas entre la publicada en Secretaría de Gobierno de Energía (2019) (arriba) y la generada mediante el cálculo propio (abajo) con inclinación de la superficie captadora de 15° y su azimut de 0° con los valores de radiación solar global media diaria modificada

	A	B	C	D	Suma
Guía	25,71%	15,80%	18,13%	40,36%	100,00%
Cálculo	24,41%	15,45%	18,15%	41,99%	100,00%
Diferencia	-5,04%	-2,24%	0,12%	4,04%	

Tabla 12: Comparación de las sumas de las columnas entre las tablas de sombras para Posadas entre la publicada en Secretaría de Gobierno de Energía (2019) (arriba) y la generada mediante el cálculo propio (abajo) con inclinación de la superficie captadora de 45° y su azimut de 0° con los valores de radiación solar global media diaria modificada

	A	B	C	D	Suma
Guía	31,56%	17,05%	17,50%	33,82%	99,93%
Cálculo	27,85%	16,16%	17,77%	38,21%	100,00%
Diferencia	-11,74%	-5,23%	1,56%	12,99%	

CONCLUSIONES:

En el presente trabajo se logró la generación de tablas de sombras asociadas a ábacos de asolamiento y de los propios ábacos de asolamiento para cualquier sitio en el hemisferio sur con énfasis en el territorio del Paraguay y sus zonas aledañas aplicando la fórmula propuesta por Reindl D.T. et al. (1990) que utiliza adicionalmente al índice de claridad el ángulo de altura del sol para la determinación de la fracción difusa de la radiación global para esos valores horarios, lo que permitió luego transponer la radiación solar global del plano horizontal a un plano inclinado. Comparando esas tablas con las publicadas en Secretaría de Gobierno de Energía (2019) para las ciudades de Formosa y Posadas, ambas vecinas de Paraguay, se pudo constatar que las generadas mediante el presente estudio arrojaron resultados muy parecidos, principalmente para pequeñas inclinaciones del plano de captación.

REFERENCIAS:

- Boland J, Scott L, Luther M. (2001). Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. *Environmetrics* Vol. 12. pp. 103-117.
- Collares-Pereira M, Rabl A. (1979a). The average distribution of solar radiation – correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* Vol. 22. pp. 155-164.
- Erbs D.G., Stauter R.C, Duffie J.A. (1980). Basis and effects of inaccuracies in diffuse radiation correlations. *Procedures of Annual Meeting 1980 – American Section of International Solar Energy Society*. p. 1429.
- Erbs D.G, Klein S.A, Duffie J.A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy* Vol. 28. pp. 293-302
- Lam J.C, Li D.H.W. (1996a). Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Building and Environment* Vol. 31. pp. 527-535.
- Liu B.Y.H, Jordan R.C. (1960). The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. *Solar Energy* Vol. 4. pp. 1-19.
- NASA (2021). Power Access Data Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- NREL: Calculadora PVWatts (2021). <https://pvwatts.nrel.gov/>
- Oliveira A.P, Escobedo J.F, Machado A.J, Soares J. (2002). Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of Sao Paulo, Brazil. *Applied Energy* Vol. 71. pp. 59-73.
- Orgill J.F, Hollands K.G.T. (1977). Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on Horizontal Surfaces. *Solar Energy* Vol. 19. pp. 357-359.
- Perez R, Stewart R, Seals R, Guertin T. (1988). The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model. SAND88-7030.
- Reindl D.T, Beckman W.A, Duffie J.A. (1990). Diffuse Fraction Correlations. *Solar Energy* Vol. 45. pp. 1-7.
- Secretaría de Gobierno de Energía (2019). Guía del Recurso Solar. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-47110-1-4
- Soares J, Oliveira A.P, Boznar M.Z, Mlakar P, Escobedo J.F, Machado A.J. (2004). Modelling hourly diffuse solar radiation in the city of Sao Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy* Vol. 79. pp. 201-214.
- Solar Pathfinder (2021): <https://www.solarpathfinder.com/PF>
- Sun Surveyor APK (2021): <https://apk-dl.com/dl/com.ratana.sunsurveyor>
- Wallace C. (2017). Cálculo y elaboración de los discos de irradiación solar para todas las provincias de la República Argentina

ABSTRACT: In the present work, a calculation methodology was developed for the generation of shadow charts based on sun path diagrams from average values of the horizontal monthly global solar radiation, easily available for any site. Together, both instruments serve to graphically determine the impact of shadows from nearby obstacles that receive solar energy collectors, both photovoltaic and thermal, on the energy performance of collection systems during a year, dividing the area of the sky swept by the sun during the year in more than 50 portions and determining for each of them the percentage of solar radiation it receives on average without considering shadows. These values that depend on the latitude, the angle of inclination of the catchment surface and its azimuth were calculated with a focus on Paraguay on the basis of hourly values of horizontal global solar radiation using a transformation model to generate them out of the monthly mean values and then transposing them to an inclined plane using another model based on the calculation of the diffuse fraction.

Keywords: shadow charts, Sun path diagrams, diffuse fraction, clearness index.