

## ¿LOS MUROS DE TROMBE SIRVEN EN EL PERU?

Natividad Alvarado Juan José-[jjnatividad@uni.pe](mailto:jjnatividad@uni.pe)

Ocupa Florián Daniel-[docupaf@uni.pe](mailto:docupaf@uni.pe)

Manfred Horn – [mhorn@uni.edu.pe](mailto:mhorn@uni.edu.pe)

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

### 5. Energía solar y ambiente construido

**Resumen:** El objetivo del presente estudio es evaluar si los muros de Trombe son útiles en el Perú, ubicado dentro de la latitud tropical, en especial en la región sur del Perú afectada por el friaje durante los meses de Junio y Julio. Se elaboró un programa para calcular la irradiancia solar directa extraterrestre y terrestre en un día, para superficies inclinadas y orientadas en cualquier dirección, en función de la latitud y altitud de la zona a analizar. Se calculó la irradiación diaria extraterrestre y terrestre sobre una superficie horizontal, y sobre superficies orientadas hacia los puntos cardinales. Luego se consideró un acotamiento en la energía recibida para el caso del vidrio, material usado en los muros de Trombe, el cual refleja mayormente y transmite muy poca radiación que incide con un ángulo mayor a 70°. A continuación se calculó la variación de la irradiación en una superficie que se inclina hacia el ecuador en función del ángulo de inclinación.

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos para dos ubicaciones elegidas: Cuzco y Puno, ubicadas a diferente altitud y latitud. El análisis de los resultados obtenidos demuestra la poca utilidad de los muros de Trombe colocados verticalmente, y sugiere su posible uso en paredes con una distinta inclinación para obtener una eficiencia mayor, o, todavía mejor, aprovechar la radiación solar incidente sobre un techo de la casa que tiene una inclinación hacia el norte.

**Palabras-clave:** Energía Solar, Irradiación Extraterrestre, Irradiación Terrestre, Muros de Trombe.

### 1. INTRODUCCIÓN

Un muro Trombe es un dispositivo que se utiliza para el calentamiento interno de casas, patentado en 1881 por Edward Morse, y popularizado en 1964 por el ingeniero francés Félix Trombe y el arquitecto Jacques Michel /1/. Es un sistema pasivo (sin intervención de una máquina) de recolección de energía solar de forma indirecta: La radiación solar es absorbida por una pared de la casa (y transformado en calor), encima de la cual se ha colocado un vidrio (de ventana) a pocos centímetros de distancia. El vidrio común es transparente en todo el rango espectral de la radiación solar, y deja, por lo tanto, pasar la radiación solar hacia la pared. Pero el vidrio es opaco en el rango infrarrojo y, por lo tanto, evita que la radiación infrarroja, emitida por la pared caliente, escape al exterior, reduciendo así fuertemente las pérdidas por radiación infrarroja. A parte, el vidrio evita que el viento, y en general el aire frío exterior, esté en contacto con la pared, reduciendo así también las pérdidas de calor por convección y conducción hacia el exterior. El calor absorbido en la pared es conducido al interior de la casa por conducción a través de la pared (demorando varias horas, según espesor y material de la pared) y, eventualmente, por convección a través de orificios colocados en la parte baja y alta de la pared, generándose así un flujo de convección natural del aire encerrada entre el vidrio y la pared al interior de la casa.

Evidentemente, este dispositivo puede contribuir a la calefacción de una casa en la medida que incide mayor o menor cantidad de radiación solar sobre el muro Trombe. Para esto es necesario que se tenga, por un lado, buena radiación solar (días solados) y, por otro lado, que la radiación solar incidente sea lo más perpendicularmente posible sobre el muro. En latitudes geográficas mayores, como en Francia donde el Ing. Trombe lo difundió, en el invierno el sol incide bien sobre paredes que miran hacia el sur. Sin embargo, en las latitudes pequeñas, como en el Perú que está dentro de la zona tropical, el sol a medio día (inclusive en el invierno) está más cerca al cenit, incidiendo poco sobre paredes verticales, y, por lo tanto, la eficacia de una pared de Trombe es reducida. A pesar de eso, en los últimos pocos años, SENCICO (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción), una entidad estatal peruana, ha promovido y construido muchos muros de Trombe en casas campesinas, mayormente de adobe, en las regiones alto andinas del sur del Perú /2/, con la intención de contrarrestar las bajas temperaturas ambientales que se tiene en estos lugares en los meses de junio y julio ("friaje"), con el resultado de muchas personas, sobre todo niños, con enfermedades respiratorias, inclusive, cada año mueren muchos por efecto del friaje. A pesar de la amplia difusión que SENCICO da a esta labor /3/, en el campo hay muchas críticas y dudas en relación a la utilidad de las paredes de

Trombe, lo que nos ha llevado a evaluar, desde un punto de vista teórico, la posible eficacia de este dispositivo, calculando la energía solar (medido en kWh/m<sup>2</sup>día), que puede incidir en un día completamente solado sobre un muro, o techo, de una casa en Cusco o en Puno, durante todo un día cualquiera del año.

Para calcular esta energía se elaboró un programa en lenguaje Matlab, que considera las siguientes superficies: techo horizontal, paredes verticales orientadas al: sur, norte, este y oeste, y superficies inclinadas respecto de la horizontal y orientadas hacia el ecuador. Este cálculo se realizó con el fin de determinar si el muro de Trombe es un medio apropiado y conveniente para usarlo en el Perú, especialmente para las latitudes que corresponden a las siguientes ciudades de Cuzco (lat.  $\approx 13^\circ$ , altitud  $\approx 3400$  msnm) y Puno (lat.  $\approx 15^\circ$ , altitud  $\approx 4000$  msnm), pues son ciudades que tienen que vivir una época de friaje extrema en los meses de junio y julio; además se obtiene una herramienta que ayude a evaluar los efectos del sol en distintos tipos de situaciones, tales como en construcciones bioclimáticas, en instalaciones solares térmicas y fotovoltaicas, así como en cualquier aplicación práctica que requiera estimar los aportes solares y/o lumínicos.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1 Muros de Trombe

Es un sistema de calefacción solar pasivo, en la cual el aprovechamiento de energía solar se da por convección, conducción y radiación; primero la radiación solar incide sobre una pared negra, o oscura, cubierto por un vidrio, obteniendo como resultado un incremento en la temperatura de la pared; esto hace que la pared emita radiación infrarroja, que es atrapada por el vidrio, opaco en el infrarrojo, reduciendo así las pérdidas, y caliente el aire en su superficie (conducción). El calentamiento del aire provoca un movimiento natural debido a la diferencia de densidades (convección) y, debido a orificios en la parte baja y alta de la pared, el aire caliente entra al interior de la casa (por los orificios en la parte alta) y aire fresca entra por los orificios en la parte baja de la pared del interior de la casa al espacio entre pared y vidrio. Durante el día, los rayos del sol atraviesan la lámina de vidrio calentando la superficie oscura del muro y almacenando el calor en la masa térmica de este. Debido a esto la temperatura media diaria del muro es sensiblemente más alta que la media exterior. Si la superficie vidriada es mejorada en su aislamiento térmico (mediante doble vidrio) la pérdida de calor hacia el exterior es todavía menor, elevando la temperatura del local. Esto permite que mientras en el exterior hay bajas o muy bajas temperaturas, el interior del local se encuentre en confort térmico y si es adecuadamente diseñado se puede lograr una temperatura constante de  $18^\circ\text{C}$  o  $20^\circ\text{C}$  en el interior de la casa. Es necesario recalcar que estos estudios se realizaron en países cuya latitud es relativamente grande (mayor a  $40^\circ\text{LN}$  y  $40^\circ\text{LS}$ ), para los cuales la incidencia de la radiación solar en las paredes orientadas al sur (hemisferio norte) y orientadas al norte (hemisferio sur) es durante todo el año y el ángulo con el que inciden los rayos solares en dichas superficies son tales que se puede almacenar en la pared más del 70% de la radiación solar directa incidente en la superficie durante la época de invierno /4/.

Para un buen dimensionamiento del muro hay que tener en cuenta el clima, la latitud y obviamente de las necesidades de calefacción (pérdidas de calor), que se pueden definir como los factores externos. Además, los elementos que en este intervienen: el muro (espesor y material), la superficie de vidrio, el número y dimensiones de los orificios, ya que de esto dependerá la eficiencia del muro (factores internos).

**Factores externos:** El clima: La cantidad de calor perdido por el muro depende necesariamente de la diferencia entre la temperatura externa e interna del cuarto, entre más grande sea la diferencia mayor será las pérdidas, por eso, para climas muy fríos se deberá sobredimensionar el muro. La latitud y orientación: La radiación solar incidente sobre la fachada sur en invierno para latitudes por encima del ecuador y sobre la fachada norte para las latitudes por debajo del ecuador, varía según sea la latitud del lugar. Para latitudes mayores a  $40^\circ$  el sistema resulta eficaz. Es importante también tener en cuenta la trayectoria del sol durante las diferentes épocas del año.

**Factores internos:** El muro debe tener gran capacidad de absorción y de almacenamiento de energía calorífica. Estos factores dependen básicamente del espesor y de la conductividad y capacidad térmica de su material. Por lo general se utiliza un vidrio ordinario de forma vertical, aunque a veces es necesario inclinarlo para obtener el punto donde se pueda captar la mayor radiación. La dimensión de los orificios: Para esto no hay un parámetro especial pero, básicamente el área de estos debe ser suficiente para garantizar un flujo uniforme y constante, sin producir movimientos fuertes del aire circulante.

## 2.2 Radiación solar

La Irradiancia Solar Total Extraterrestre (TSI) es la cantidad total de energía solar por unidad de área presente en cada instante de tiempo fuera de la atmósfera terrestre; por lo tanto, varía a lo largo del año debido a la variación en la distancia entre la tierra y el sol, sin embargo, para muchos fines prácticos se define la llamada Constante Solar ( $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ ), que viene hacer el promedio de la radiación solar incidente durante un año en una superficie extraterrestre. La irradiancia extraterrestre ( $I_{ext}$ ) al llegar a la atmósfera se fragmenta. Una parte se refleja, otra es absorbida (componente ultravioleta debido al ozono y componente infrarroja debido al vapor de agua), otra es dispersada en por las moléculas de gas, agua y partículas existentes en el aire, parte se refleja en las nubes y por último otra parte llega a la tierra en forma de irradiancia directa ( $I_n$ ), de las componentes reflejadas y dispersadas una parte llega al planeta en forma de irradiancia difusa ( $I_d$ ). Todas las formulas mencionadas en lo que sigue de los aspectos teóricos las podrá encontrar con más detalle en la referencia /5/.

La irradiancia extraterrestre que alcanza la atmósfera de la Tierra se suele calcular en función de la Contante Solar y del factor de excentricidad (Exc), D = distancia entre el sol y la tierra,  $D_0 = 1.496 \times 10^8 \text{ Km}$  que es el valor medio de la distancia sol-tierra y suele denominarse unidad astronómica (UA).

$$I_{ext} = I_{sc} \left( \frac{D_0}{D} \right)^2 = I_{sc} \cdot Exc \quad (1)$$

La tasa a la cual la radiación es recibida por una superficie por unidad de área se denomina irradiancia, la misma que se expresa en unidades de potencia por unidad de área,  $\text{W/m}^2$ . La cantidad de radiación recibida por una superficie por unidad de área durante un determinado período se denomina irradiación o simplemente radiación incidente. Se expresa en unidades de energía por unidad de área,  $\text{Wh/m}^2$ . El presente programa solo calcula la irradiación directa incidente en una superficie cualquiera en un día despejado. Para el cálculo de la irradiación directa se ha utilizado un modelo paramétrico de cielo despejado (sin nubes), es decir, solo se considera la atmósfera transparente, en el cual la irradiancia normal esta dado por el producto de las transmitancias de diferentes procesos que suceden en la atmósfera transparente. Y la irradiación directa (energía) sobre una superficie se calcula mediante la siguiente formula:

$$E = \int_{t^-}^{t^+} I_n \cos(\theta) dt \quad (2)$$

Donde  $I_n$  : Irradiancia solar

$\theta$  : Ángulo de incidencia, formado entre la normal a la superficie y los rayos solares.

$t^-$  : Hora de salida del sol por encima de la superficie

$t^+$  : Hora de puesta del sol por debajo de la superficie

## 2.3 Cálculo de la irradiancia directa en cielo despejado

El cómputo de radiación está basado en el modelo paramétrico de Bird & Hulstrom (1981) modificado por Iqbal (1983) con la constante solar actualizada. Este modelo computa la radiación directa y tiene en cuenta la atenuación atmosférica debida a la transmitancia por vapor de agua, aerosoles, mezcla de gases, ozono y dispersión de Rayleigh. El modelo tiene en cuenta el aumento de la transmitancia con la altura. El modelo propuesto por Bird & Hulstrom viene dado por la siguiente ecuación:

$$I_n = 0.9751 I_{ext} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad (3)$$

Donde  $I_{ext}$  es la radiación extraterrestre y las distintas  $\tau$  son las transmitancias para cada uno de los procesos que intervienen en la atmósfera,  $\tau_r$  es la transmitancia por Rayleigh,  $\tau_o$  es la transmitancia por ozono,  $\tau_g$  es la transmitancia de los gases mezclados uniformemente,  $\tau_w$  es la transmitancia por vapor de agua y  $\tau_a$  la transmitancia por aerosoles.

Estas transmitancias dependen fundamentalmente de la masa de aire a presión estándar (1013.25mbars o 1 atm), siendo esta:

$$M_r = \frac{1}{\text{sen}(\text{angulo cenital}) + 0.15(93.885 - \text{angulo cenital})^{-1.253}} \quad (4)$$

Y de la masa de aire a la presión atmosférica a la cual se encuentra la zona a analizar:

$$M_a = M_r \frac{P}{P_o} \quad (5)$$

$$P = P_o e^{-0.0001184 Z} \quad , \quad Z = \text{altitud de la localidad} \quad P_o = 1013 \text{ mbar}$$

La transmitancia por la dispersión Rayleigh esta dado por:

$$\tau_r = e^{-0.0903 M_a^{0.84(1 + M_a - M_a^{1.01})}}$$

La transmitancia por el ozono:

$$\tau_o = 1 - [0.1611 L M_r (1 + 139.48 L M_r)^{-0.3035} - 0.002715 L M_r (1 + 0.044 L M_r + 0.0003 (L M_r)^2)^{-1}],$$

L=0.3cm

La transmitancia por gases:

$$\tau_g = e^{-0.0127 M_a^{0.26}}$$

La transmitancia por el vapor de agua esta dado por:

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U [(1 + 79.034 U)^{0.6828} + 6.385 U]^{-1}$$

Siendo U el espesor de la capa de vapor de agua

$$U = U_o \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right)^{0.75}$$

Tomando  $U_o = 1\text{cm}$

Una expresión para la transmitancia del aerosol es un modelo basado en la atenuación espectral para dos longitudes de onda comúnmente utilizadas por las redes meteorológicas, 0.38 y 0.5  $\mu\text{m}$ , longitudes de onda en la cual la absorción molecular es mínima. La transmitancia del aerosol esta dado por:

$$\tau_a = e^{-K_a^{0.873} (1 + K_a - K_a^{0.7088}) M_a^{0.9108}}$$

Siendo  $K_a$  el espesor óptico de los aerosoles y esta dado por:

$$K_a = 0.275K_1 + 0.35K_2 \quad , \quad K_1 = 0.087 \quad K_2 = 0.069$$

### 3. PROGRAMA ELABORADO

El software desarrollado ha sido programado en lenguaje Matlab. Gracias a las características de dicho lenguaje, el programa presenta tanto gráfica, como numéricamente los resultados, de una manera sencilla y versátil. Los datos necesarios para el cálculo de la irradiación, son la latitud y altitud de la zona o localidad de interés para el estudio de la radiación solar incidente en el lugar; además dependiendo de la zona se tendrá que acotar las horas en las que el sol incide en determinada superficie, esto dependerá si la casa a analizar se encuentra en la puna o en un valle, para el primer caso se considera un trayectoria del sol de 180° sobre superficie plana, sin ningún obstáculo, por lo contrario en el segundo caso no se puede considerar lo mismo, pues los rayos solares, al amanecer demoran en incidir en las superficies debido a los cerros y por la misma razón se ocultan antes. Además, el programa sirve para aproximar el ángulo adecuado de inclinación de una superficie orientada al ecuador en el cual incide, la mayor cantidad de radiación, comparada con las otras superficies, durante la época de friaje (junio, julio).

### 3.1 Funcionamiento del programa

El programa simula la radiación solar directa incidente sobre una superficie de  $1 \text{ m}^2$  durante todo un día despejado (sin nubes). Este cálculo se realiza para 5 superficies diferentes: superficie horizontal, superficies verticales orientadas al sur, norte, este y oeste; también una superficie inclinada hacia el norte, esto para varios ángulos de inclinación respecto a la normal. Los pasos que sigue son los siguientes:

*Cálculo de la irradiancia.* dado por la ecuación (2) la cual depende de la irradiancia solar extraterrestre (ecuación (1)) y las transmitancias de los procesos que ocurren en la atmosfera, que a su vez dependen de la masa del aire, por tanto, también de la presión atmosférica de la zona o de la altitud de la misma.

*Hora de amanecida y puesta solar.* Se calcula la hora de amanecida y puesta del sol para cada día del año, esto encontrara la hora para la cual el sol se encuentra en el este y en el plano horizontal y la hora a la que se oculta cuando se encuentra en el oeste y también en el plano horizontal.

*Irradiación directa solar diaria en un día despejado.* Se realiza un proceso de integración de la irradiación incidente durante todo un día (desde la hora de amanecida hasta la hora de puesta del sol, ambas calculadas en el paso anterior) en cada una de las superficies a analizar, lo cual nos da por resultado toda la energía solar brindada a la pared durante todo el día. Se realizo este proceso para todos los días del año.

*Grafica de la irradiación solar directa.* Finalmente obtenemos una grafica de la energía recibida en cada superficie durante todo un día ( $\text{Wh}/\text{m}^2$  día) para todos los días del año, considerando día 1 al primero de enero y día 365 al 31 de diciembre. Este calculo estaría acorde con una casa ubicada en una zona prácticamente plana como puede ser la puna en nuestro país.

*Acotación del programa por efecto de reflexión.* Para el caso especial de los muros de Trombe, cuya superficie expuesta a la radiación es un vidrio, el cual es bastante transparente a la radiación bajo cierto ángulo de incidencia (ángulos menores a  $70^\circ - 75^\circ$  respecto de la normal al plano del vidrio), pero para ángulos mayores a estos valores, la mayor parte de la radiación es reflejada y muy poco es transmitido Por lo que se agrega al programa un condicional para que haga cero la radiación incidente bajo un ángulo mayor a  $70^\circ$ .

*Superficie inclinada.* Como nos encontramos en el hemisferio sur y dentro de la zona geográfica de los trópicos, resulta conveniente orientar las superficies hacia el ecuador, y analizar la variación de la radiación a medida que el ángulo de la superficie aumenta respecto a la horizontal, siendo siempre orientada hacia el norte (Ecuador).

## 4. RESULTADOS

Para observar el funcionamiento del programa se mostrarán dos ejemplos para dos zonas del país que sufren las inclemencias del friaje como son Cuzco (lat.  $\approx 13^\circ$ , altitud  $\approx 3400$  msnm) y Puno (lat.  $\approx 15^\circ$ , altitud  $\approx 4000$  msnm).

En general, el programa calcula la radiación incidente en un plano en el cual el sol barre un ángulo de  $180^\circ$  por encima de este. En la realidad un plano horizontal se comportaría de esta forma solo en planicies, sin montañas que limiten el número de horas de sol.

La Fig. 1 y Fig. 2 muestran la irradiación solar extraterrestre directa incidente en 5 superficies: horizontal y verticales orientadas al sur, oeste, este y sur, en un día despejado (sin nubes). Se observa que la radiación solar extraterrestre es relativamente constante y alta para las superficies este, oeste y horizontal (mayores a  $4 \text{ kWh}/\text{m}^2$  día durante todo el año). Es interesante observar que en ambas graficas la radiación incidente en la pared norte es mayor que en la superficie horizontal solamente para pocos días del año siendo el 21 de junio el día en que se tiene la mayor radiación en la pared norte, pero disminuyéndose rápidamente al alejarse de esa fecha.

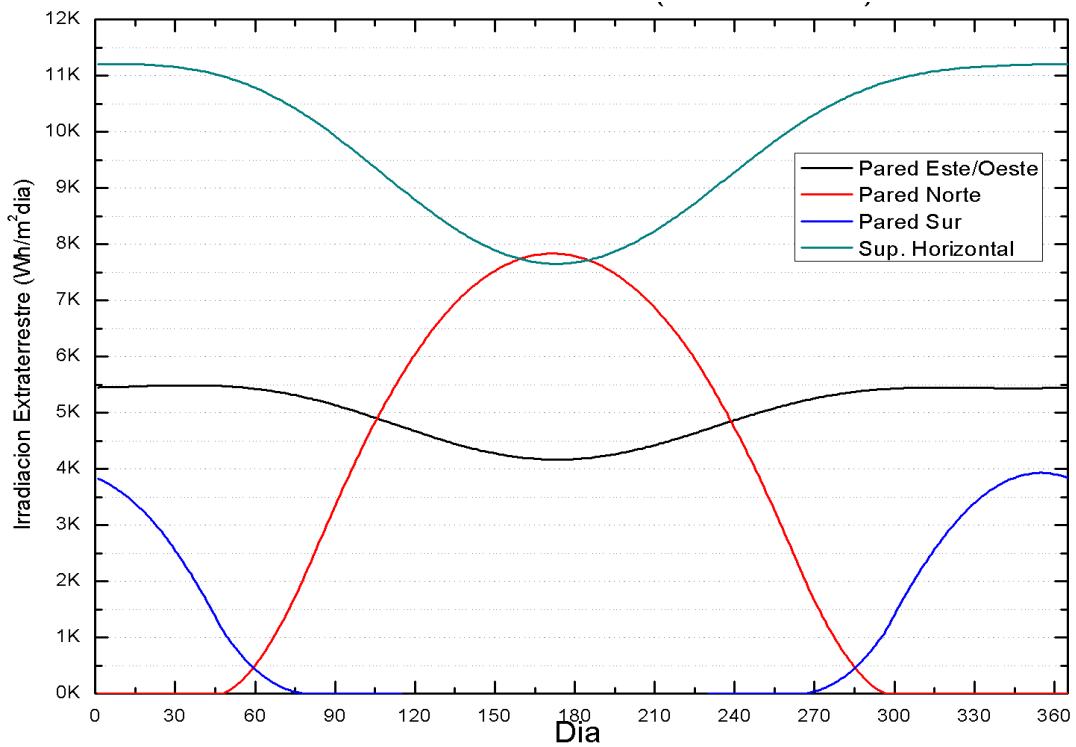


Figura 1- Curva de la radiación solar extraterrestre diaria, durante un año.  
Cuzco (lat.  $\approx 13^\circ$ )

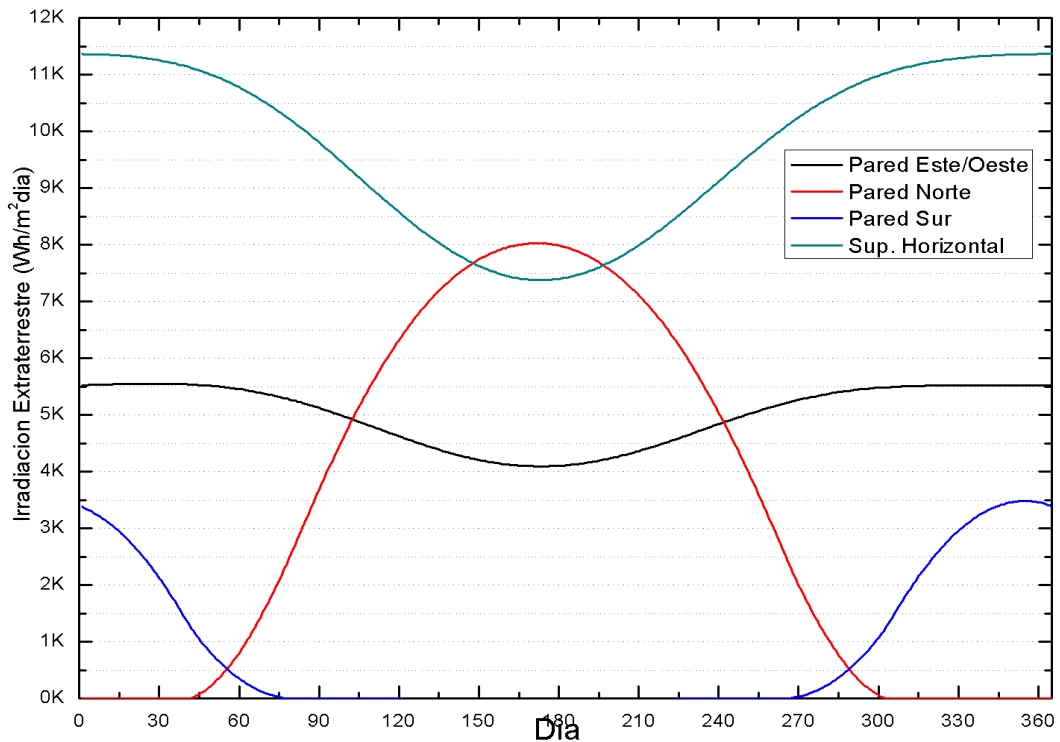


Figura 2- Curva de la radiación solar extraterrestre diaria, durante un año.  
Puno (lat.  $\approx 15^\circ$ )

La Fig. 3 y Fig. 4 muestran la irradiación solar terrestre diaria, en días completamente despejadas. Esta vez se considera el efecto de la atmósfera en la radiación por lo que disminuyó considerablemente para todos los casos. La radiación incidente en la pared norte, para el caso de Cusco, resulta menor a la radiación incidente en la superficie horizontal; sin embargo, Puno recibe una mayor cantidad mayor de radiación en la pared vertical norte que en la superficie horizontal durante 23 días donde la máxima diferencia de radiación es  $\approx 95 \text{ Wh/m}^2 \text{ día}$ .

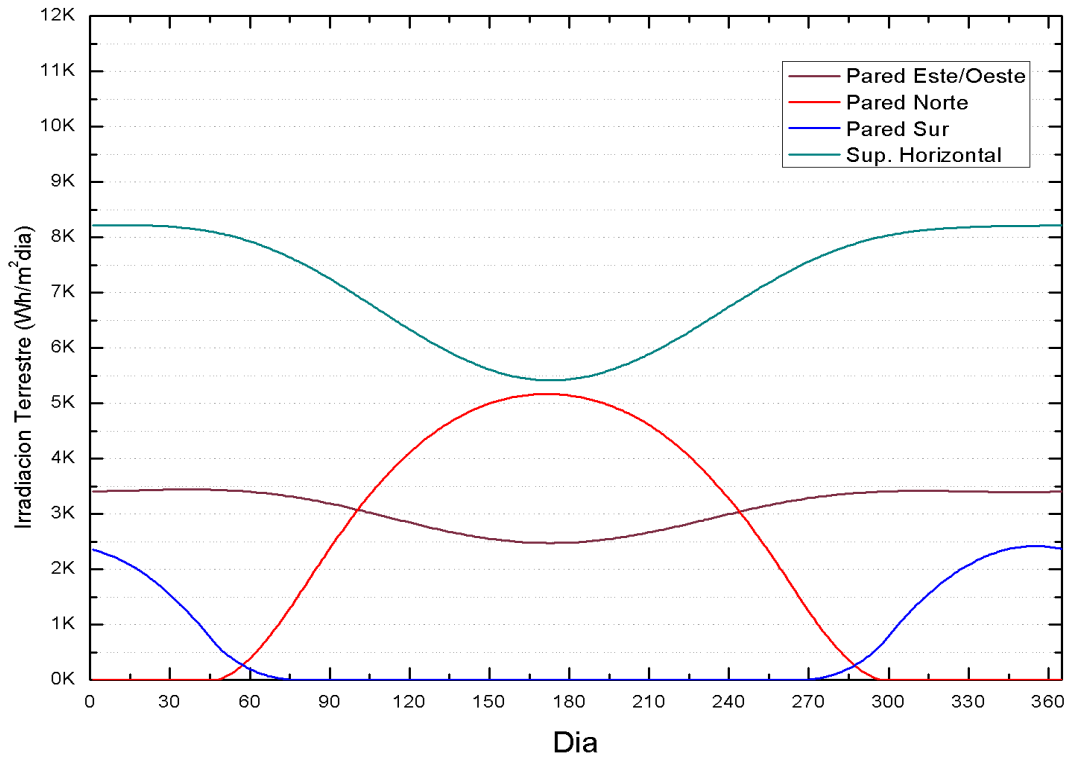


Figura 3- Curva de la radiación solar terrestre directa diaria, durante un año. Cuzco (lat.  $\approx 13^\circ$ , altitud  $\approx 3400$  msnm)

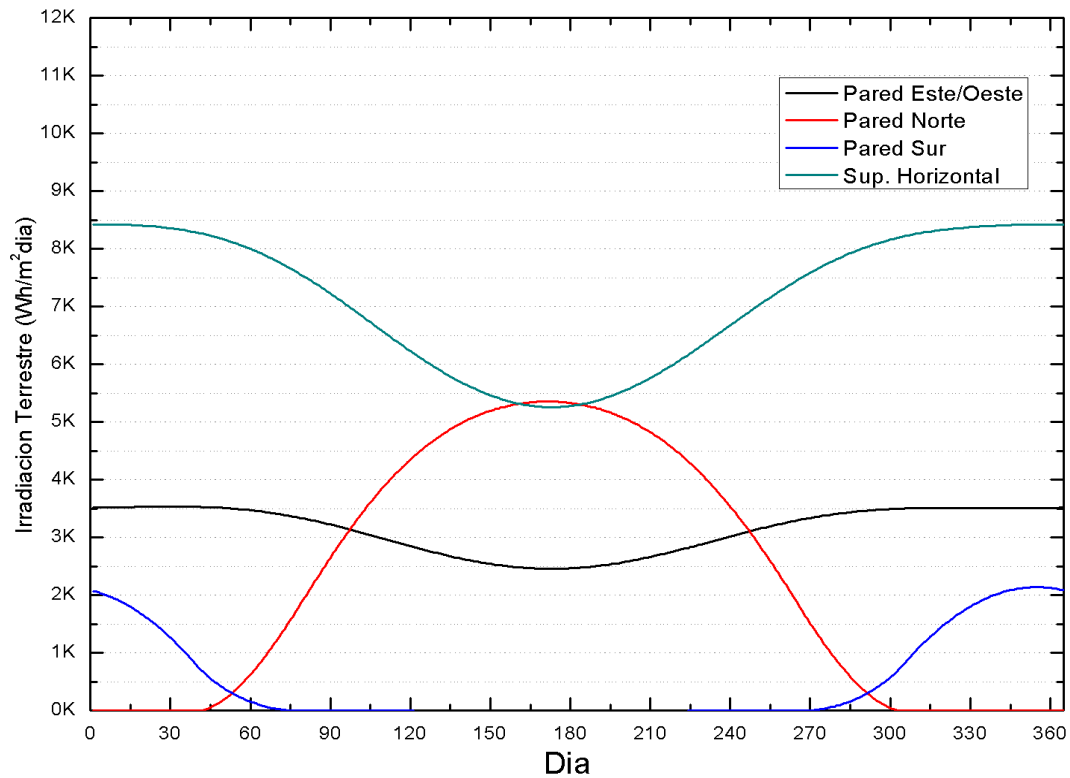


Figura 4- Curva de la radiación solar terrestre directa diaria, durante un año. Puno (lat.  $\approx 15^\circ$ , altitud  $\approx 4000$  msnm)

En la Fig. 5 y Fig. 6 se muestra la irradiación en las mismas superficies pero esta vez consideramos que las superficies son vidrios cuyo funcionamiento depende mucho del ángulo formado entre la normal a la superficie de

vidrio y el rayo de sol incidente, debido a la reflexión la radiación disminuye respecto a la radiación terrestre. En ambos casos la radiación incidente en la pared norte resulta mucho menor que en la superficie horizontal. Por lo que es ineficiente usar los muros de Trombe colocados en la pared norte de forma vertical.

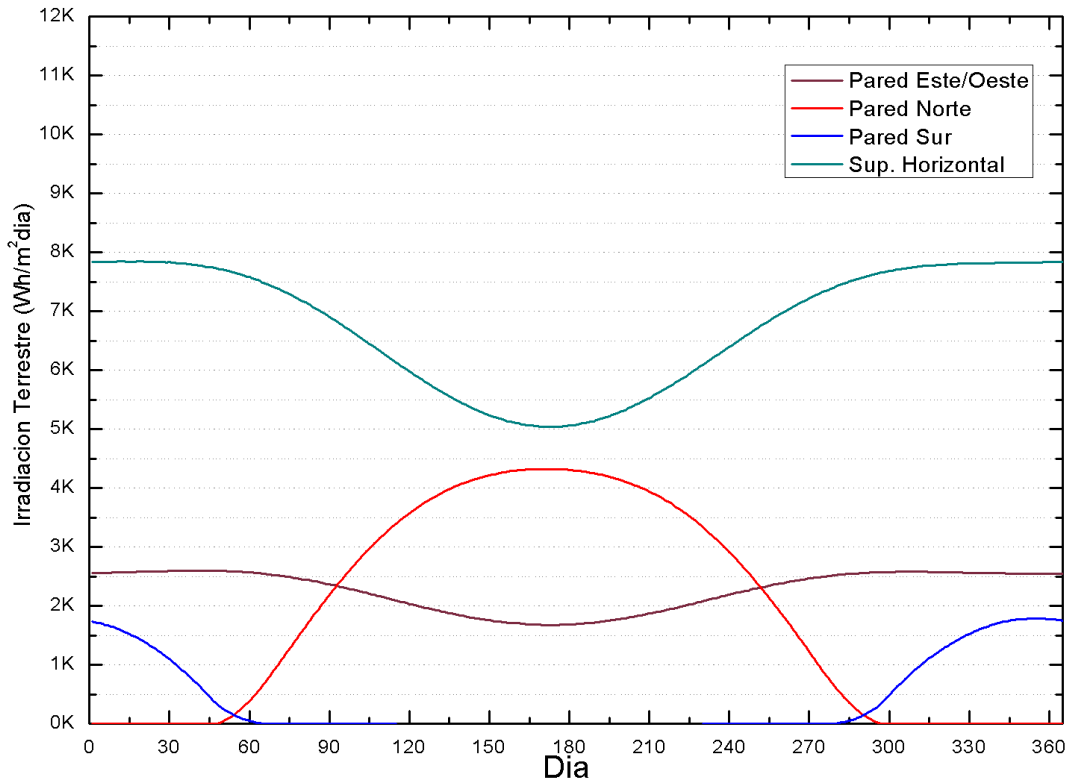


Figura 5- Curva de la radiación solar directa terrestre diaria, durante un año pasando por un vidrio. Cuzco (lat.  $\approx 13^\circ$ , altitud  $\approx 3400$  msnm)

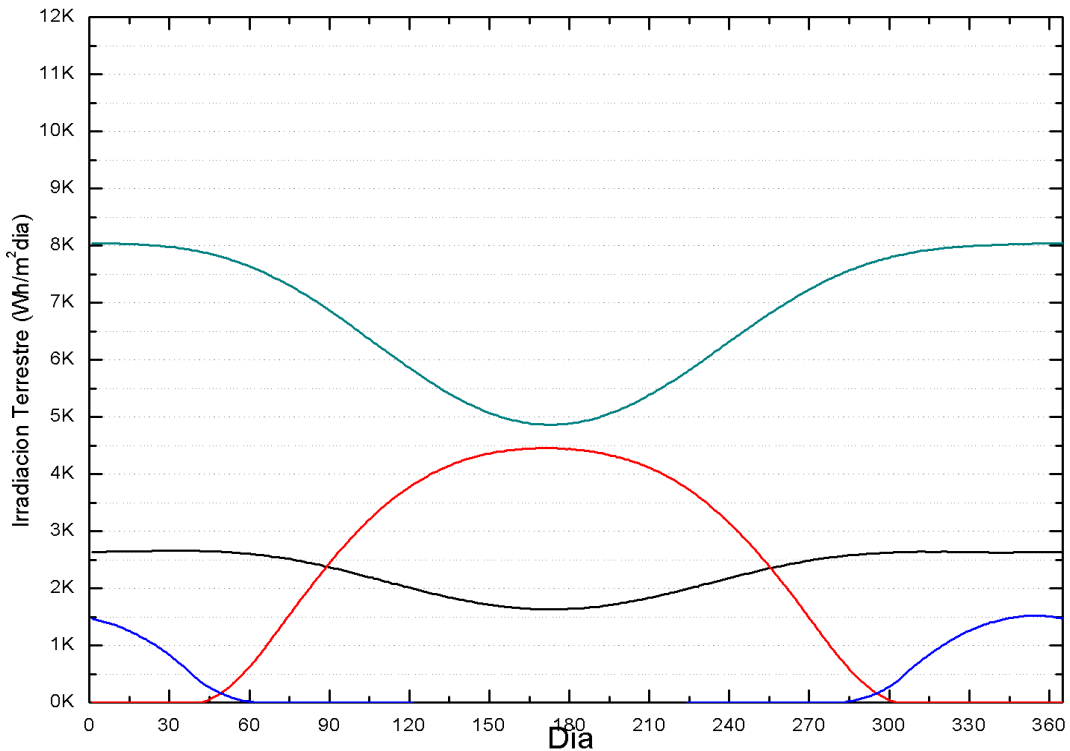


Figura 6- Curva de la radiación solar terrestre directa diaria, pasando por un vidrio, durante un año. Puno (lat.  $\approx 15^\circ$ , altitud  $\approx 4000$  msnm)



La irradiación en las paredes este y oeste se superponen en todas las Figuras debido a la simetría que existe entre la trayectoria del sol en un día respecto de las superficies en mención. Notar que la radiación en la pared este y oeste es mas o menos constante para todo el año, esto podría ser de gran utilidad para aplicaciones solares que necesiten una radiación constante durante todo el año.

En general, la radiación en la superficie horizontal para todos los casos es notablemente mayor que la radiación incidente en otras superficies para casi todo el año y mayor a  $4.5 \text{ kWh/m}^2\text{día}$ , esto se puede asumir para latitudes menores a  $15^\circ$ . Para Puno solo en los días cercanos al solsticio de invierno resulta ligeramente menor que la radiación en la pared norte (Fig.4), durante 23 días.

En la Fig. 5 y Fig. 6 se puede observar que la diferencia de la radiación máxima entre la pared norte y la superficie horizontal aumenta a mayor latitud sur, esto debido a que el sol permanece más tiempo en el norte a medida que aumenta la latitud.

Finalmente observamos la Fig. 7 y Fig. 8, que resultan las más interesantes: lo que se observa es la radiación solar incidente para una superficie inclinada, que aumenta su ángulo de inclinación cada  $20^\circ$  respecto a la horizontal, viéndose orientada hacia el norte a medida que aumenta el ángulo hasta llegar a la vertical. Para un ángulo de inclinación entre  $20^\circ$  y  $40^\circ$  se obtendría un máximo de irradiación, y una irradiación mayor a  $4.5 \text{ kWh/m}^2\text{día}$  para todo el año. Para una inclinación de  $20^\circ$  una irradiación solar mas o menos constante y alta (mayor a  $6.5 \text{ kWh/m}^2\text{día}$ ) durante todo el año.

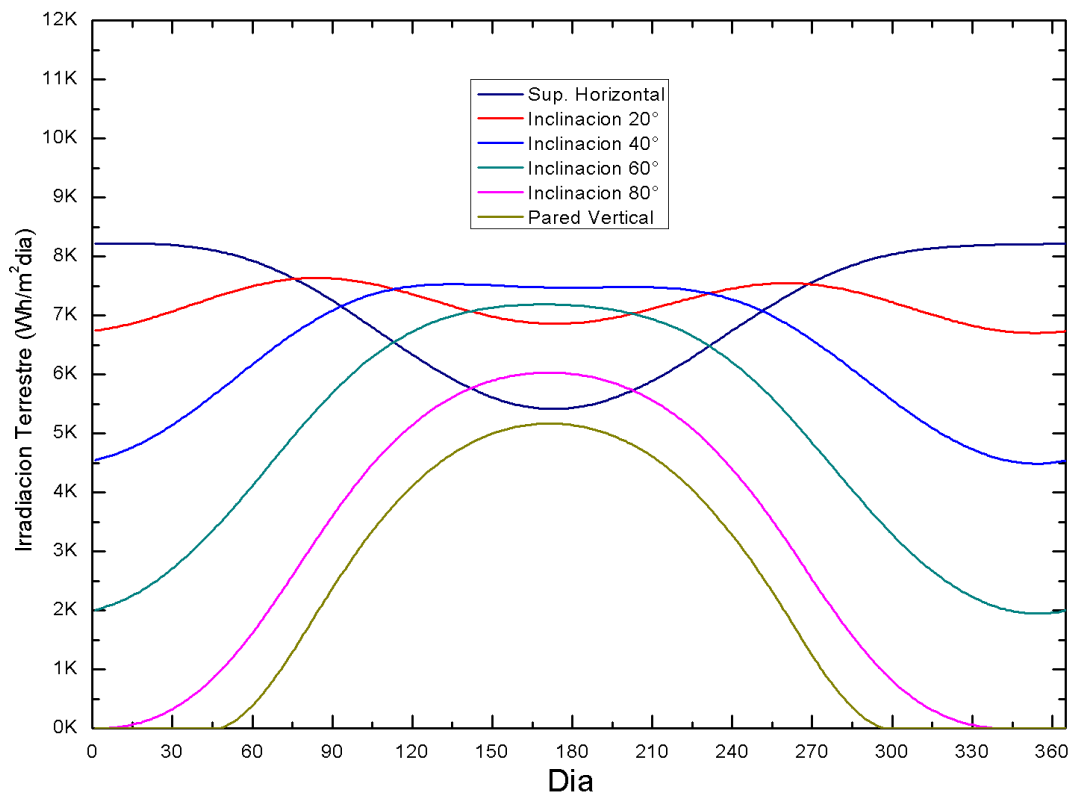


Figura 7 Curva de la radiación solar terrestre directa diaria, incidente en una superficie con una inclinación respecto a la horizontal, durante un año. Cuzco (lat.  $\approx 13^\circ$ , altitud  $\approx 3400 \text{ msnm}$ )

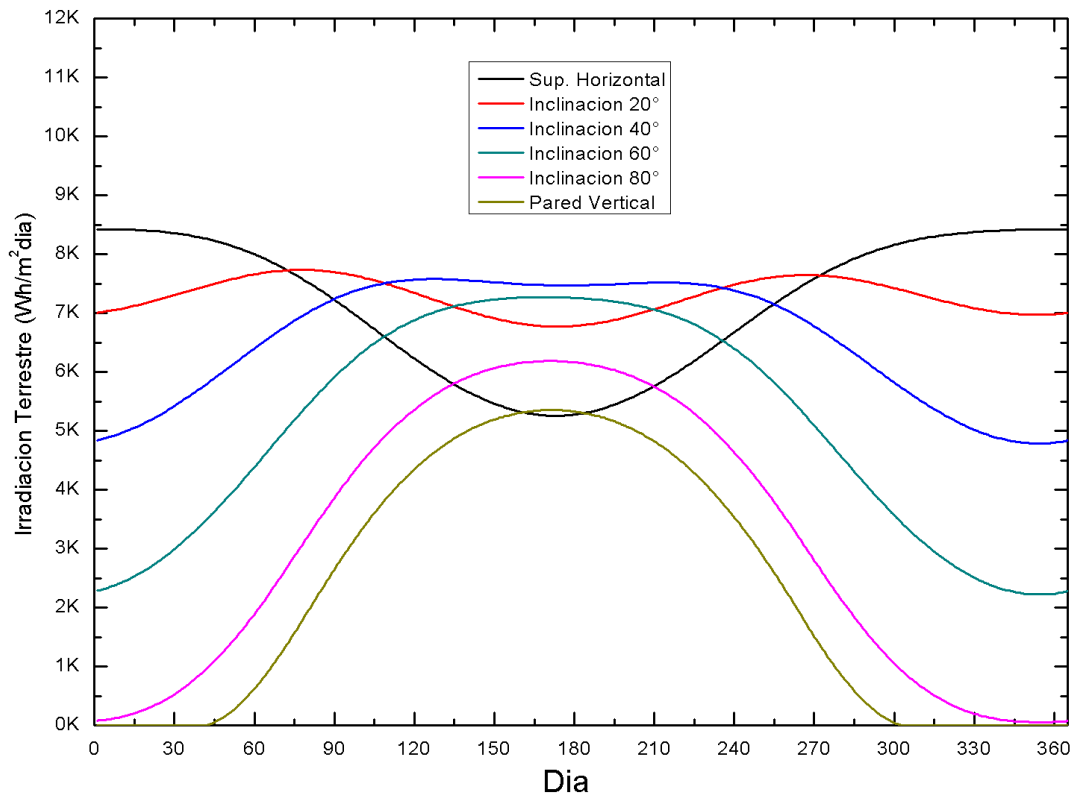


Figura 8- Curva de la radiación solar terrestre directa diaria, incidente en una superficie con una inclinación respecto a la horizontal, durante un año. Puno (lat.  $\approx 15^\circ$ , altitud  $\approx 4000$  msnm)

## 5. CONCLUSIONES

La finalidad de realizar este programa para simular la radiación solar directa incidente en distintas superficies sobre la tierra fue determinar si los muros de Trombe son apropiados para su utilización en el Perú, especialmente en la zona sierra sur (principalmente Puno, Cuzco, Ayacucho) en la que las temperaturas pueden llegar a ser muy bajas (menores a  $0^\circ\text{C}$ ) en época de invierno. Por esta razón, observando los resultados se puede concluir que no es eficiente construir los muros de Trombe de forma vertical, tal como es útil en latitudes mayores. Inclinando la pared  $10^\circ$  o  $20^\circ$  respecto de la vertical, se mejora la irradiancia, pero el uso seguiría siendo ineficaz, pues no se recibiría la máxima irradiación solar que se puede obtener para las latitudes estudiadas, la que se obtendría para una inclinación entre  $20^\circ$  y  $40^\circ$  respecto a la horizontal. De lo contrario, resultaría más conveniente usar la radiación incidente en la superficie horizontal, tal como ocurre en los invernaderos, que pueden adosarse a las casas andinas. Lo ideal es poner tragaluces, o colectores térmicos, en techos con una inclinación de  $20 - 30^\circ$  hacia el norte. En este caso no solamente la radiación solar sería máxima en la época de friaje, muy superior a la radiación recibida por una pared norte, sino sería bastante constante durante todo el año.

Hay que anotar que aquí hemos evaluado la radiación solar directa incidente sobre diferentes paredes en días completamente despejados, sin nubes. Por suerte, esto es mayormente el caso en los meses de mayor frío, junio – julio, por lo cual consideramos que las conclusiones expuestas aquí también son válidas en condiciones reales, con eventuales nubes.

## 6. REFERENCIAS

- /1/ Ver, por ejemplo, [http://es.wikipedia.org/wiki/Muro\\_Trombe](http://es.wikipedia.org/wiki/Muro_Trombe)
- /2/ Ver, por ejemplo, <http://www.sencico.gob.pe/prensa/Noticias/noticia003.html>
- /3/ Ver, por ejemplo en Youtube, <http://www.youtube.com/watch?v=9-9bUGbJRYI> o, <http://www.youtube.com/watch?v=RSxGVILz-x8>
- /4/ Mazria, Edward (1983) El Libro de la energía solar pasiva. Ediciones G. Gili S.A.
- /5/ Iqbal, M., (1983) An introduction to solar radiation, Academic Press, Toronto.

## **Are Trombe Walls Useful in Peru?**

**Abstract:** *The aim of this study is to determine whether Trombe walls are applicable in the geographical region of Peru, especially in the southern Andean region of Peru affected by very cold temperatures during the months of June and July.*

*A program was developed to calculate the terrestrial and extraterrestrial daily solar irradiation to surfaces oriented in any direction, as a function of latitude and altitude (terrestrial radiation).*

*The daily extraterrestrial and terrestrial irradiation on a horizontal surface and on surfaces oriented toward the cardinal points was calculated. Then we considered the reflection in the case of glass at high incidence angles, used in Trombe walls, which reflects mostly and does not transmit few radiation incident at angles greater than about 70°. In addition the variation of radiation on inclined surfaces that look toward the Equator was calculated. This paper gives the results for two selected locations: Cuzco and Puno, located at different altitudes and latitudes. The analysis shows that Trombe walls are inefficient if placed vertically, something better if inclined 10 – 20° with respect to the vertical, but it is much better to use glassed light entrances in the roof, or solar heat collectors, preferable inclined 20 – 30° to the north. In this case one gets the highest irradiance and nearly constant during the whole year.*

**Keywords:** *Solar Energy, Solar Irradiation, Terrestrial Radiation, Trombe Wall.*