Distribución de la luz natural en pabellones japoneses del período Edo

DAVID MUÑOZ NOVOA, BENOIT BECKERS
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE
JULIO DE 2016

Contenidos

Introducción 2
Objetivo 3
La latitud de Japón 4
La climatología en Japón 6
El clima en Kyoto 6
El clima en Tokyo 6
La arquitectura del período Edo 7
El proceso de modelado en 3D de un pabellón japonés 9
Estudio del sol 12
Trayectos solares 12
Efecto de los saledizos 17
Efectos de la orientación 20
Escenario real en París 23
Estudio del factor de vista del cielo 27
Calculando el factor de vista del cielo 28
Cálculos sobre el pabellón 28
Estudio de los efectos climatológicos 32
Presencia de nubes 32
Factor UDI 34
Conclusiones 38
Referencias 39
Anexo 1: Datos climatológicos de Tokyo y Kyoto según la base de datos de Meteonorm 6.0 .. 40

Introducción

Este trabajo se plantea y desarrolla en paralelo a un proyecto de restauración de los pabellones japoneses de los Jardines de Albert Kahn, en París.

Este proyecto, llamado “Albert Kahn: Archéologie d’un Héritage Nippon”, y abreviado simplemente como “Proyecto Akahn”, tiene como objetivo llevar a cabo una prospección arqueológica completa de los edificios en paralelo a su restauración (2015-2016).

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando *in situ* métodos y técnicas no destructivos [Akahn 2015] y hay participación por parte de tres universidades juntas: la Université Paris-Sorbonne, la Université Paris-Pierre et Marie Curie y la Université de Technologie de Compiègne.

La dirección del proyecto está a cargo del arquitecto y arqueólogo Jean-Sébastien Cluzel, especialista en la historia de la arquitectura en Japón.

El autor principal de este trabajo quiere agradecer aquí sus directores de tesis, Gustavo Patow y Gonzalo Besuievsky (Universitat de Girona), así como Raphaël Nahon, co-autor del programa “Heliodon Plus” aquí utilizado. Ellos, como los principales participantes del proyecto Akahn, han expuesto sus trabajos en el workshop "Daylight simulation in historical buildings and urban environment", organizado el 10 de julio de 2015 en la UTC (https://www.utc.fr/presse.html#-tab4).

Objetivo

El objetivo de este trabajo es estudiar cómo trata la arquitectura japonesa del período Edo la luz natural. Mediante el estudio físico de un caso real, se pretende descubrir si esta arquitectura se creó teniendo en cuenta las condiciones de la luz natural y si es óptima para dichas condiciones.

La primera parte concierne la situación de nuestro caso de estudio, Japón. Se presentan los datos necesarios para dicha situación, como son la posición geográfica y el período histórico de la arquitectura que se estudia.

La segunda parte trata sobre la climatología en Japón. Mediante datos recogidos en estaciones meteorológicas situadas en Tokyo y en Kyoto, se estudia el clima de dichas zonas geográficas, para tenerlo en cuenta en las simulaciones.

La tercera parte se centra en la propia arquitectura del período Edo. Una arquitectura modular de la cual se muestran la estructura, las medidas y también la construcción de un modelo 3D sobre el cual realizar los cálculos físicos necesarios para el estudio.

La cuarta parte explica la teoría de los trayectos solares y los muestra en el caso de estudio. Los resultados incluyen pruebas sobre la arquitectura japonesa del período Edo en Tokyo, en Kyoto y en París. El objetivo de este apartado es mostrar cómo afectan los trayectos solares al estilo arquitectónico presente y si dicho estilo los tuvo en cuenta cuando se estableció.

La quinta parte muestra los cálculos del factor de vista del cielo en diversos casos prácticos simulados sobre el modelo 3D.

Por último, la sexta parte combina los resultados de los apartados anteriores con los datos climáticos reales de las zonas de estudio, para ver cómo el clima influye en el comportamiento de esta arquitectura en relación a la luz natural.

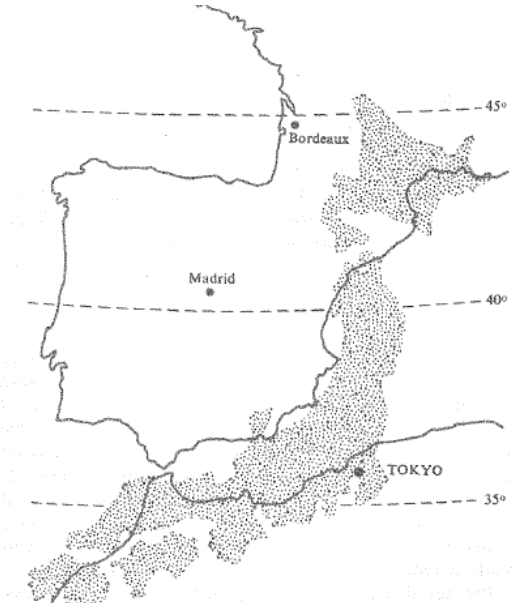
La latitud de Japón

El estilo arquitectónico tratado en este estudio proviene de Japón, país situado al norte de Asia, entre el Océano Pacífico y el Mar de Japón. El país consta de cuatro islas principales rodeadas por más de 4.000 islas pequeñas y su superficie es de 377.873 km^2, casi tan grande como Alemania y Suiza juntas.

Mapa de Japón [nationsonline.org]

La población de Japón supera los 127 millones de habitantes, la mayoría residentes en zonas urbanas de alta densidad. La capital del país es Tokyo, y su población es de aproximadamente 12 millones.

Si se rota Japón sobre el eje longitudinal del planeta, se aprecia que sus latitudes coincidirían con la franja desde el sur de Francia hasta el norte de África, coincidiendo la mayor parte del país con España. Así pues, el trayecto solar de Japón también coincidirá con el de las zonas mencionadas.



Japón reportado a las latitudes de Europa [Reischauer 1973]

De este país interesan para el estudio dos ciudades en particular, Kyoto y Tokyo, que son las zonas más relevantes del período Edo en Japón. Ambas ciudades se encuentran separadas por aproximadamente 700 km, aunque en latitudes próximas, y su clima es distinto, como se verá en siguientes apartados del capítulo.

Situación de Kyoto y de Tokyo en Japón [bootsnall.com]

Tokyo se encuentra en la latitud 35º 42’ N y Kyoto se encuentra en la latitud 35º 00’ N.

La climatología en Japón

Aunque Japón se extiende a lo largo de 3000 km aproximadamente, desde Wakkanai a Kagoshima, para nuestro estudio los datos analizados son de Kyoto y Tokyo, encontrándose ambas en aproximadamente los 35º de latitud.

El clima en Kyoto

Mediante las mediciones registradas por una estación meteorológica en Kyoto (latitud 35.017 y longitud 135.733) entre los años 1961 y 1990, se observa que en invierno la temperatura media del aire no desciende por debajo de 0º C y en verano alcanza aproximadamente los 28ºC. La humedad relativa media suele mantenerse entre un 67% y un 71%, siendo especialmente más suave en los meses de primavera.

El clima en Tokyo

Las mediciones registradas por una estación meteorológica en Tokyo (latitud 35.683 y longitud 139.767) entre los años 1961 y 1990 muestran temperaturas del aire parecidas a las de Kyoto, con una media que alcanza los 27º C en agosto y en enero desciende hasta 5º C aproximadamente. La humedad relativa media está entre 49% y 76%, mostrando un clima más húmedo en verano y más seco en invierno.

Para más datos climatológicos de Japón, se puede consultar el anexo 1 del capítulo. En el apartado que trata el efecto del clima, se pueden ver datos sobre la energía directa y difusa del sol, además de otras variables interesantes.

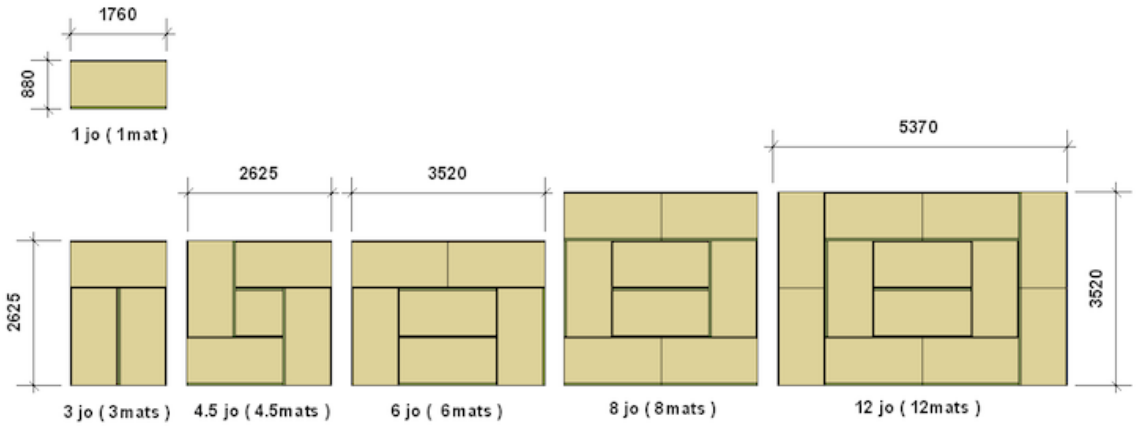
La arquitectura del período Edo

La arquitectura del período Edo se caracteriza por su simplicidad y modularidad. Esto es así porque la ciudad de Edo era repetidamente asolada por incendios y esto condujo a una arquitectura simplificada para una fácil reconstrucción. Tras un incendio, filas de casas eran rápidamente reconstruidas. Además, por la política de la época, fueron construidos muchos parques de paseo para el placer de los gobernantes y sus invitados, así como también grandes casas.

El pabellón este de los Jardines Albert Kahn en París

En cuanto a los pabellones japoneses, simplificando un poco se puede decir que están compuestos por los tatamis, los pilares de madera, los paneles verticales y las puertas corredizas. Todos estos componentes se ensamblan como si se tratase de un gran rompecabezas, sin más anclaje ni nexo que las muescas y encajes en los laterales de cada elemento.

Los tatamis son cuadrados o bien rectangulares (doble longitud) y se disponen de lado encajados entre ellos para configurar el tamaño de las salas. Las configuraciones de tatamis se suelen catalogar y reconocer de forma numérica, como se muestra en el siguiente diagrama.

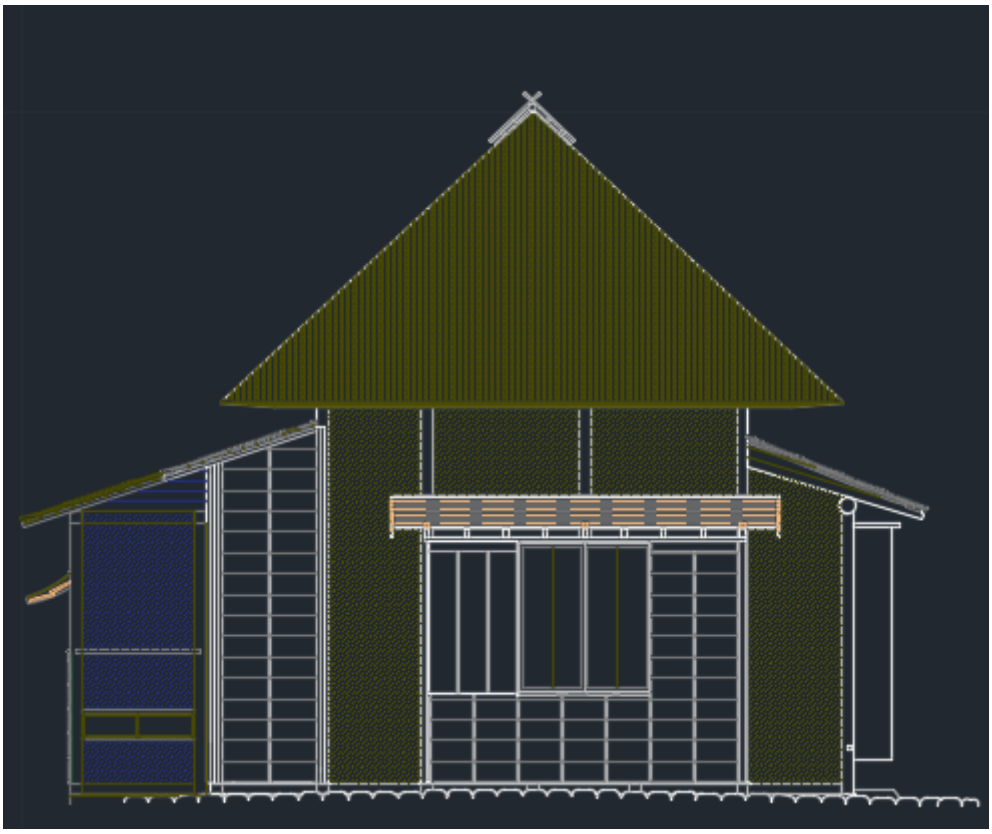


Las distintas configuraciones de tatamis, con sus medidas en jō

Así pues, uno puede referirse a un estilo de un pabellón enumerando las configuraciones de sus tatamis. Por ejemplo, un pabellón 6-8 estará conformado por dos salas, de 6 y 8 tatamis respectivamente, ensamblados tal como se ha mostrado en el diagrama anterior.

La medida arquitectónica de los tatamis es el "jō", que equivale aproximadamente a 1,80 metros de longitud. Como se puede observar en la figura anterior, los tatamis rectangulares miden 1 jō de largo.

Por último, en cuanto a los tejados, cabe destacar que son muy característicos de la época y que eran la mayor decoración para coronar una arquitectura muy simplista. No obstante, en el estudio se probará si además de decorar, tenían algún otro propósito en relación a la luz del entorno.



Mapa del perfil del pabellón oeste de los Jardines Albert Kahn

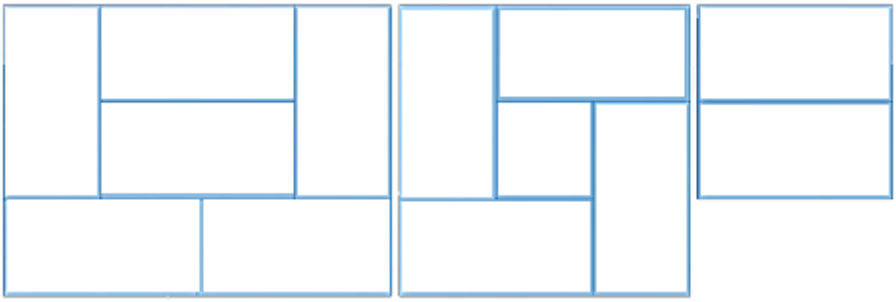
El proceso de modelado en 3D de un pabellón japonés

En este apartado del capítulo, se muestra el paso a paso con el que se ha logrado reproducir la estructura de un pabellón japonés lo más fiel posible a los reales para poder realizar los cálculos de los trayectos solares y el factor de vista del cielo, entre otros.

El modelado en 3D se ha realizado a través del estudio de los planos arquitecturales que se han diseñado durante el estudio de los dos pabellones de los Jardines de Albert Kahn en París. Dichos pabellones se han restaurado recientemente y se ha aprovechado la ocasión para estudiarlos durante el desmontaje y la sustitución de sus estructuras más dañadas por otras nuevas.

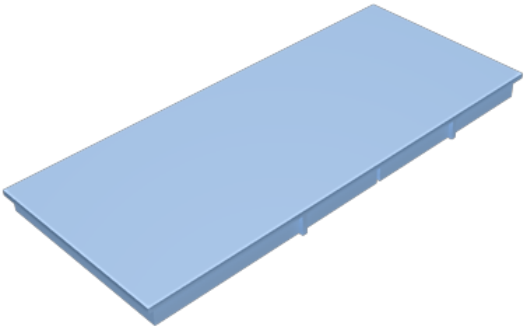
Partiendo del propio plano de *AutoCAD* y varios libros sobre estructura y forma de la arquitectura japonesa [Engel 1989, Nishi 1985], se ha logrado modelar un conjunto de pabellones japoneses acordes a este tipo de arquitectura, entre ellos una réplica de uno de los que se pueden visitar en los Jardines de Albert Kahn: el pabellón este.

El primer paso consiste en modelar la configuración de los tatamis, que como se ha tratado en el apartado previo, ya que estos son la piedra angular que determina la estructura y distribución del pabellón entero. En el caso del pabellón real que se ha usado como base para el modelo, la configuración de tatamis es la 8-4.5-2 y se muestra en la imagen a continuación. Siguiendo las medidas de los planos, se han podido usar los dos tipos de tatami para configurar las salas acorde al edificio real.



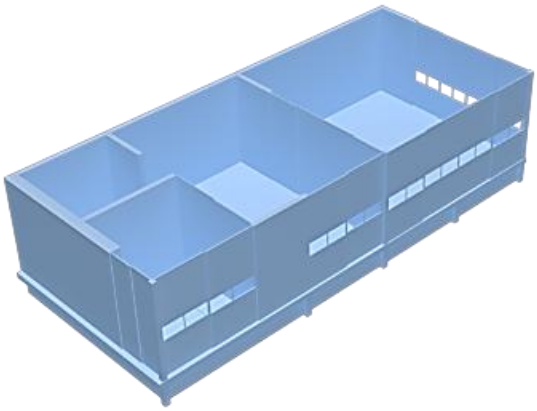
Tatamis del pabellón este, con configuraciones 6, 4.5 y 2, de izquierda a derecha

Lo siguiente ha sido levantar estos tatamis sobre las estructuras que elevan y soportan la carga del pabellón. Así pues se han modelado los listones y pilares sobre los que reposa el edificio.



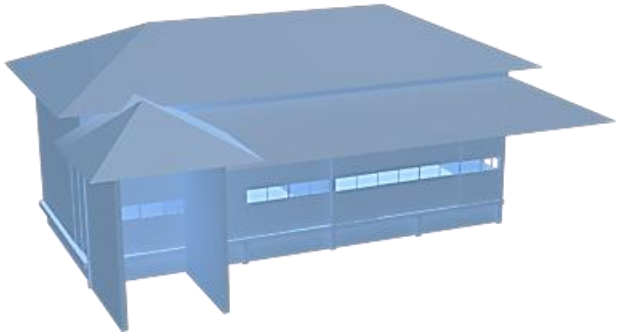
Fundamentos del pabellón

A continuación, se ha modelado una puerta corrediza y se ha clonado varias veces para irlas colocando según su alineación. Estas puertas son las que configuran cómo se distribuye el espacio de los tatamis entre varias salas. Las puertas se han creado a partir de cajas que se han ajustado a las dimensiones requeridas. Las exteriores se han vaciado para modelar así las pequeñas ventanas a través de las cuales penetra la luz del día. Estas aperturas son las únicas que permiten que el sol penetre directamente en el interior del pabellón cuando todos los paneles y puertas deslizantes están cerrados. Así que la única iluminación natural proviene de las ventanas y de la translucidez de los paneles exteriores.



Pabellón con los paneles y puertas deslizantes

Tras haber creado y colocado las puertas y paneles necesarios, queda añadir el acceso y también el diseño del tejado, que es la parte más compleja de la construcción. Para lograr el modelo, se han creado las aristas con líneas que luego se han unido para dar volumen a la geometría. De ese modo, todas las piezas han encajado bien y se ha conseguido la simetría deseada.



Pabellón completo, con los tejados y el acceso

Una vez se ha obtenido el modelo, se han fusionado componentes para eliminar geometría redundante, con el objetivo de agilizar el poder ocultar o mostrar varias partes de la estructura en los experimentos posteriores.

El modelo se ha exportado desde *Autodesk3ds Max* a un archivo tipo “stl”, de forma que otros programas puedan importarlo de forma fácil, ya que el archivo no es más que un listado de vértices y triángulos, aunque también puede guardar materiales para la geometría. Este modelo del pabellón este de los Jardines de Albert Kahn consta de 1197 triángulos, así que se puede importar cómodamente en muchos softwares por su ligero tamaño.

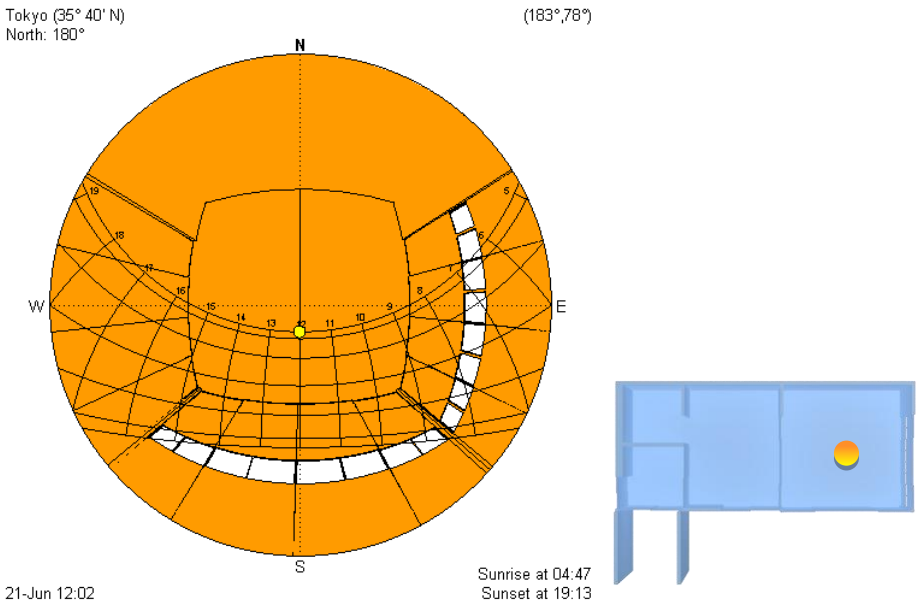
Como dato adicional, se avanza que en esta configuración (todos los paneles deslizantes extendidos, cerrando completamente la estructura y aislándola del exterior), sólo puede penetrar el sol a través de las dos ventanas de apenas 24 centímetros de alto que hay en cada puerta de la cara sur y la cara este de la estructura. Estas ventanas, además, están situadas a medio metro de altura de los tatamis, con lo cual es obvio prever que toda la parte superior a las ventanas no va a recibir sol directamente.

Estudio del sol

Trayectos solares

En este apartado, para estudiar el comportamiento del sol se ha realizado un estudio en *Heliodon 2* [Beckers 2006] con el modelo 3D del pabellón este de los Jardines de Albert Kahn que se ha mostrado en el apartado anterior.

El primer paso ha sido importar el modelo en *Heliodon 2* y ajustar la latitud y longitud a las correspondientes a Tokyo (35º 40' N). También se ha ajustado la brújula para orientar la pared sin ventanas hacia el norte. Una vez realizados estos rápidos ajustes, es posible situar un captor en el centro de la sala grande del pabellón y observar la estereografía solar para ver cómo penetra el sol a través de las pequeñas ventanas de las puertas de las paredes este y sur. En la estereografía se muestra en tono naranja todo el modelado que enmascara el sol y en blanco las aperturas por dónde la luz solar puede penetrar hasta el punto de observación.



Estereografía solar desde el centro de la sala este

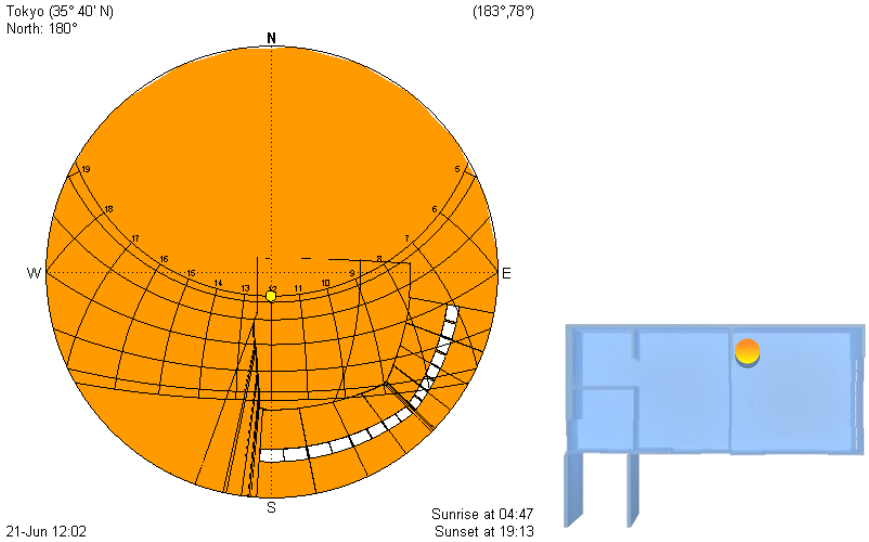
Se puede observar que durante todo el año, el interior del pabellón cuenta con media hora de sol por la mañana, que entra por la pared este, a través de las pequeñas ventanas.

En invierno se cuenta con un poco más de sol por la mañana gracias las ventanas de la pared sur, que alargan este período de sol entrante y proporcionan sol adicional por la tarde.

En la estereografía se pueden ver también la salida y la puesta de sol y también la altura a la que el sol alcanza su cénit al mediodía.

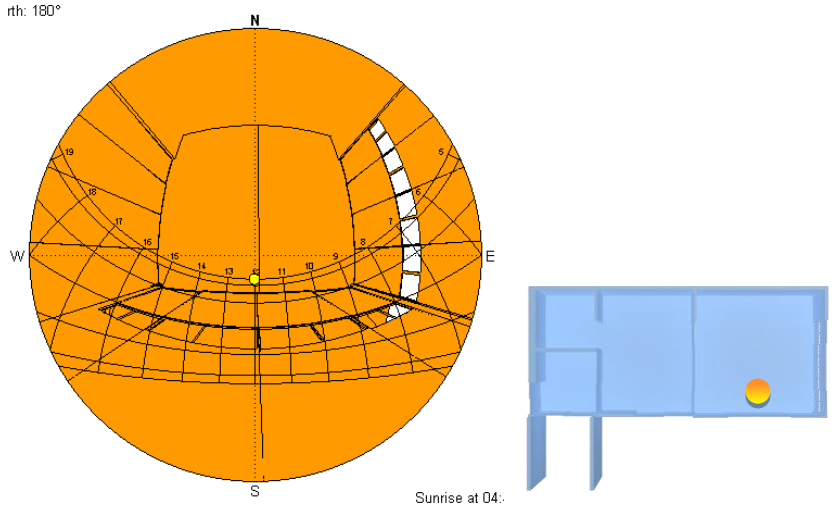
	Inclinación del sol (mediodía)	Salida del sol	Puesta del sol
21 de junio	78º	4:47	19:13
21 de diciembre	31º	7:13	16:47

Si se sitúa el captor en la esquina dónde se encuentran los armarios de la sala, en el punto más alejado de las ventanas, se observa que aun así esta parte del pabellón recibe media hora de sol por la mañana durante medio año, en otoño e invierno. No obstante, las ventanas de la cara sur no proporcionan sol a esta parte del pabellón.



Estereografía solar desde el centro de la sala este (rotación de 180º)

Por el contrario, acercando el captor a la pared sur, se observa cómo esta parte de los tatamis no recibe sol alguno de la pared sur pero recibe media hora por la mañana durante medio año, desde el este, entre los equinoccios y el solsticio de verano.



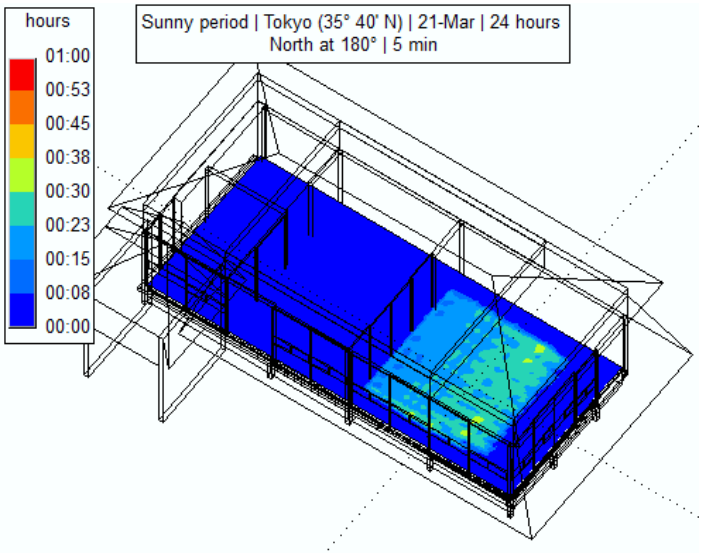
Estereografía solar desde el centro de la sala este (rotación de 180º)

En la anterior figura se aprecia también cómo el punto de observación está protegido del sol de la cara sur, mediante el tejado saledizo sobre el exterior de las puertas correderas.

Así pues, se asume que la correcta orientación de este tipo de arquitectura es, como ya era de suponer, con la cara sin ventanas hacia el norte, para tener siempre un período de sol por la mañana y para ampliar ese período en invierno, cuando el sol se agradece más.

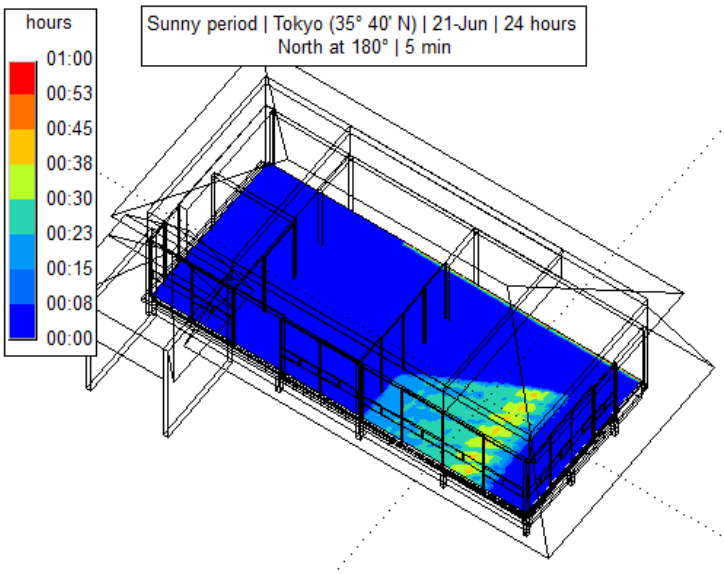
La siguiente prueba del estudio consiste en mallar los tatamis de las dos salas, para poder calcular la potencia solar durante el año. En primer lugar, se ha estudiado en cada posible estación, es decir durante los dos solsticios y durante un equinoccio. El mallado de los tatamis está compuesta por mallas de 11 centímetros de lado y las medidas del sol se realizan durante 24 horas con 5 minutos de precisión.

En primer lugar, se observa como en los equinoccios (en la siguiente figura vemos el de primavera, aunque el de otoño es idéntico) la iluminación proviene de las ventanas de la cara este, por la mañana. Así que los tatamis cuentan con aproximadamente media hora de sol al día, la observada en la estereografía anterior.



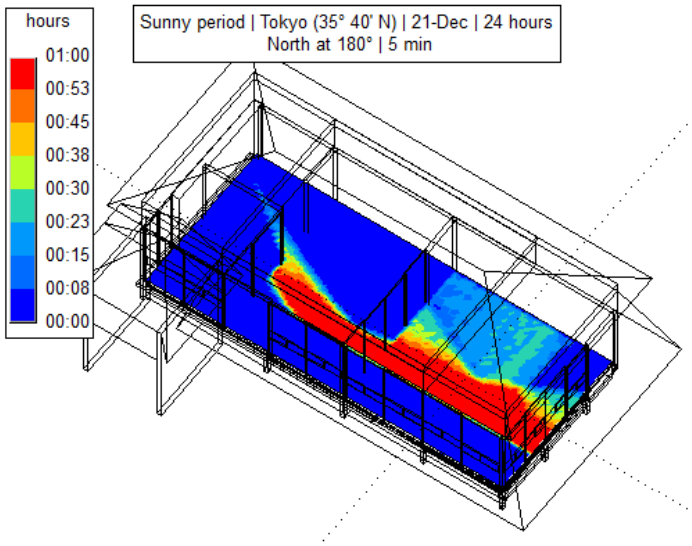
Asoleo directo en el equinoccio de primavera

Estudiando los solsticios, se aprecia en verano una inclinación en el ángulo de incidencia del sol, teniendo menos sol en la parte más alejada de las ventanas, mientras que en las zonas que aún reciben sol, parece que este penetra durante más tiempo.



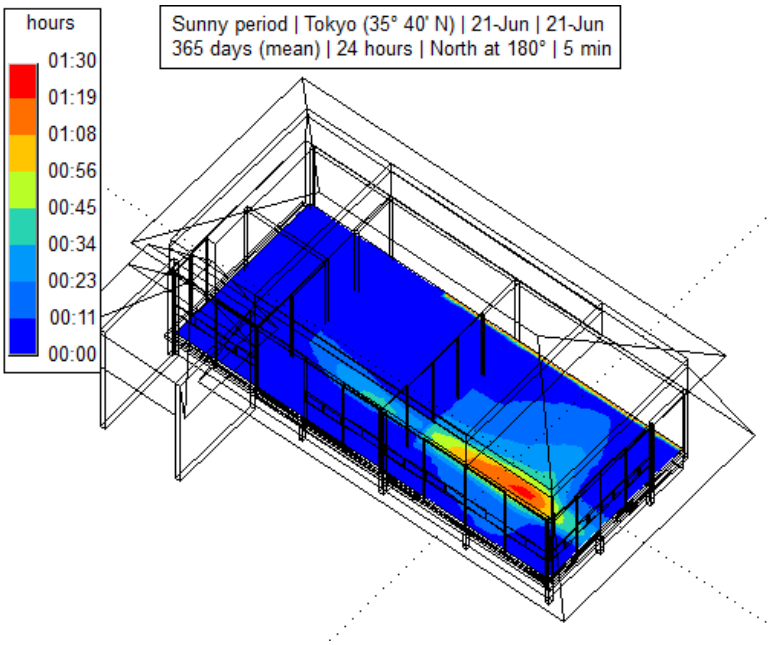
Asoleo directo en el solsticio de verano

En último lugar, durante el invierno, se observa cómo hay más sol en los tatamis que durante el resto del año, especialmente debido al que penetra por la cara sur por la tarde. Se llega a tener sol durante una hora en algunas zonas de los tatamis. Tener más sol permite tener más luz natural y más calor en el interior, hecho que es especialmente útil en esta estación del año.



Asoleo directo en el solsticio de invierno

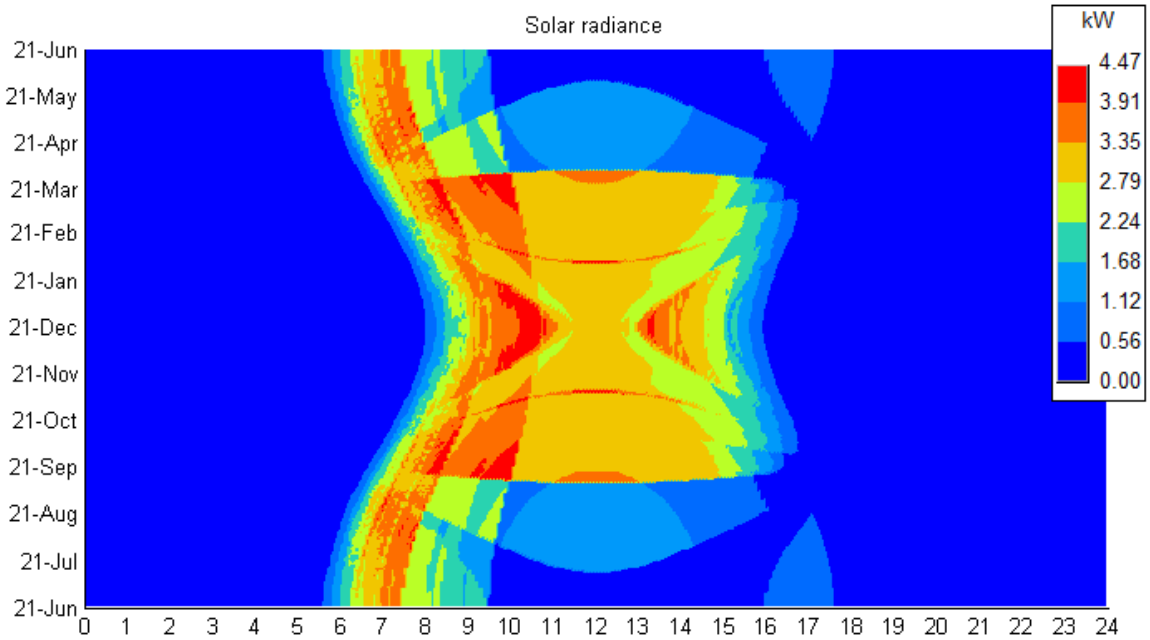
Heliodon 2 permite hacer el cálculo de la evolución durante 365 días, para poder ver el asoleo directo diario promediado durante un año entero. En la siguiente figura se puede apreciar qué zonas reciben más sol durante el año. También se observa cómo en la habitación contigua, en la parte más interior del edificio, sólo penetra sol por las ventanas de la cara sur.



Evolución del asoleo directo durante un año completo

Si se observan detenidamente las figuras anteriores, se puede ver que la habitación interior del pabellón no recibe sol en los equinoccios ni en verano, sino solamente durante el invierno. La prueba de que en invierno el sol penetra mucho en esta habitación desde la cara sur, es que puede observarse claramente su impacto en la gráfica de la evolución durante un año completo. Así pues, se muestra cómo esta arquitectura trata de optimizar la recepción de sol en las distintas épocas del año.

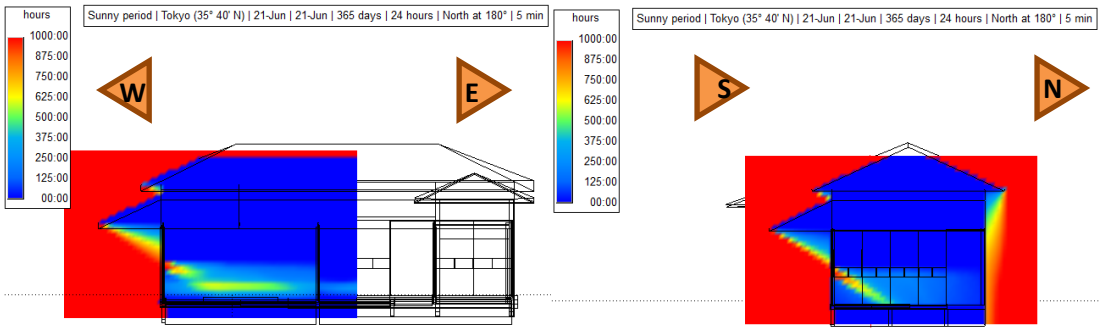
Finalmente, también es posible visualizar una gráfica de la evolución de la potencia solar al cabo de un año completo. Se observa cómo la curva vertical de la izquierda, de un color intensamente más cálido, muestra los períodos del día en que entra el sol por la ventana este, acentuándose en invierno cuando también entra un poco por la cara sur en la esquina sureste del edificio. Y también se aprecia que por la tarde hay sol durante el invierno, por el período del día en que entra sol por las ventanas de la cara sur.



Evolución de la potencia solar al cabo de un año completo

Efecto de los saledizos

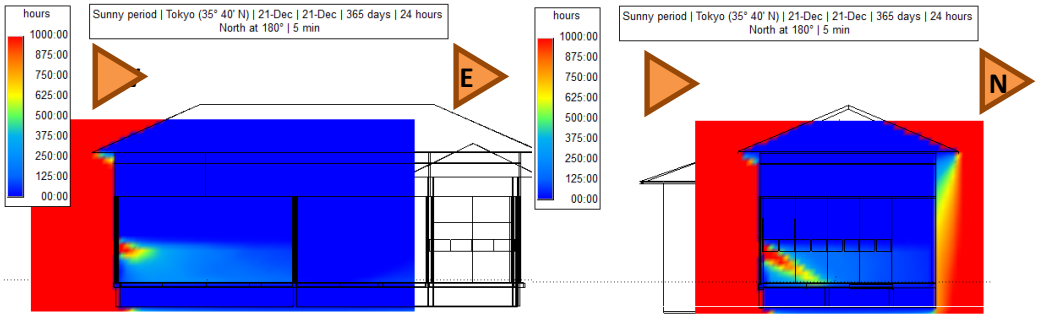
El estudio con *Heliodon 2,* además de servir para observar cómo penetra el sol a través de las pequeñas ventanas de las puertas correderas, también permite analizar la forma en que los tejados saledizos que sobresalen por encima de las puertas enmascaran el sol. Con dos mallas verticales virtuales que cruzan la sala de seis tatamis, se puede calcular la potencia solar durante un año entero para luego observar las imágenes resultantes.



Perfiles desde las caras norte y este del pabellón

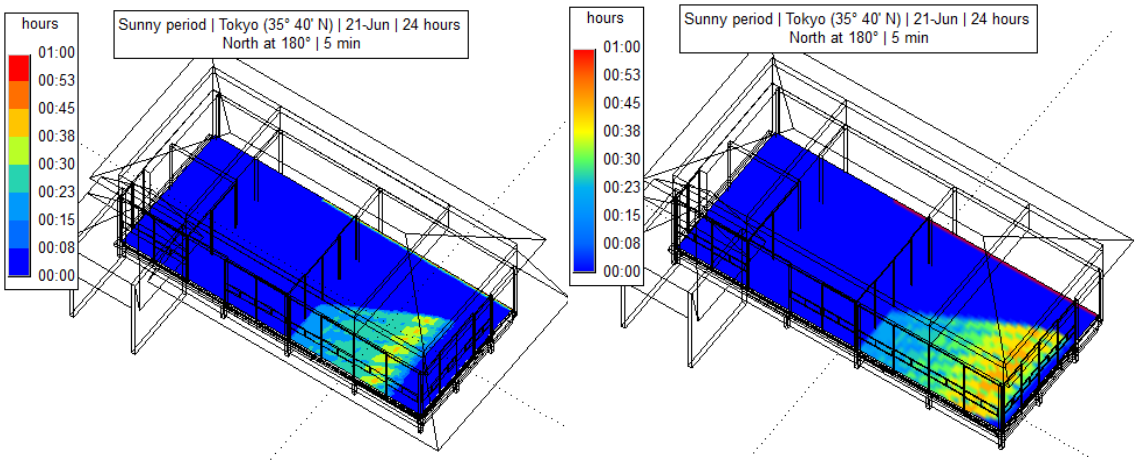
Viendo los ángulos de incidencia y cómo se traza una recta casi perfecta desde la punta de los tejados hasta el extremo superior de las ventanas, parece claro que los tejados que sobresalen por encima del pabellón sin duda enmascaran parte del sol que penetraría por las ventanas en ciertas horas del día.

Es posible repetir la prueba sin la parte sobresaliente de los tejados y observar a continuación cómo efectivamente penetra más sol al interior. Las dos siguientes figuras muestran mayor incidencia del sol, especialmente desde la cara sur.



Perfiles desde las caras norte y este del pabellón, sin los saledizos

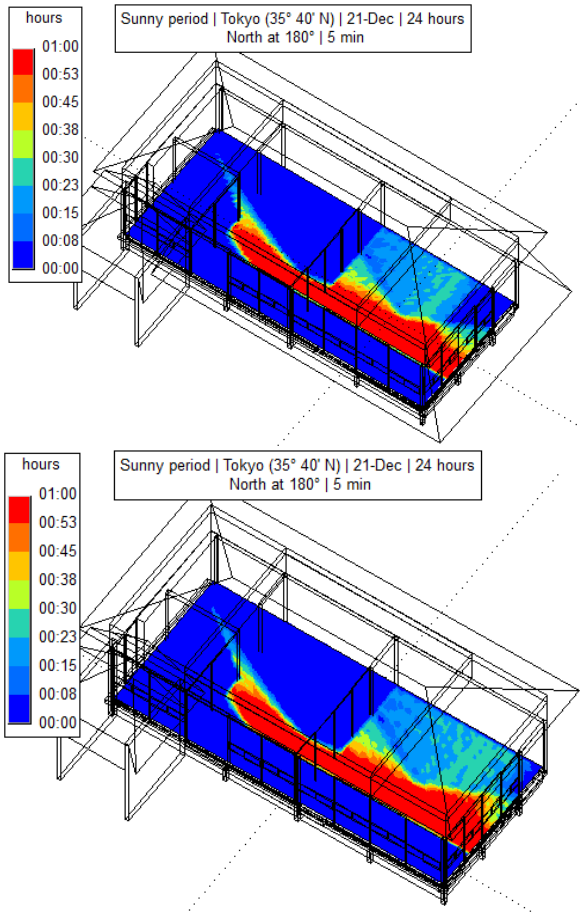
Se pueden comparar estos perfiles con y sin el saledizo durante el solsticio de verano con los anteriores para apreciar que esta arquitectura de tejados no es meramente decorativa, sino que también tiene su función de enmascarar el sol incidente a ciertas horas del día, como se podía intuir al ver alguna de las estereografías del apartado anterior.



Asoleo directo durante el solsticio de verano (izquierda con saledizos, derecha sin saledizos)

Se puede visualizar cómo entra más sol en el interior del edificio durante el verano desde la cara este de la estructura, al no tener el tejado saledizo para enmascararlo en ciertos períodos del día.

En invierno, sin embargo, no se observa influencia en la cantidad de sol, ya que es exactamente la misma con y sin los saledizos.

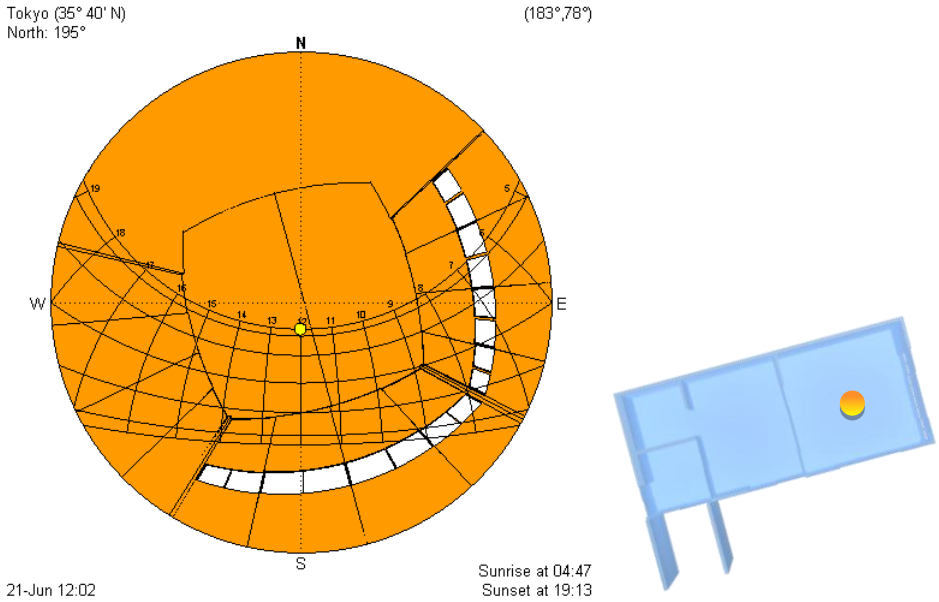


Asoleo diercto durante el solsticio de invierno (izquierda con saledizos, derecha sin saledizos)

Así pues, se ha podido mostrar cómo el situar un saledizo sobre las puertas correderas con ventana de la cara este contribuye a enmascarar el sol durante el verano, mientras que el saledizo de la cara sur no afecta al sol de invierno. El saledizo es, por lo tanto, un elemento funcional para ajustar la cantidad de sol en ciertas épocas del año y no solamente un elemento decorativo.

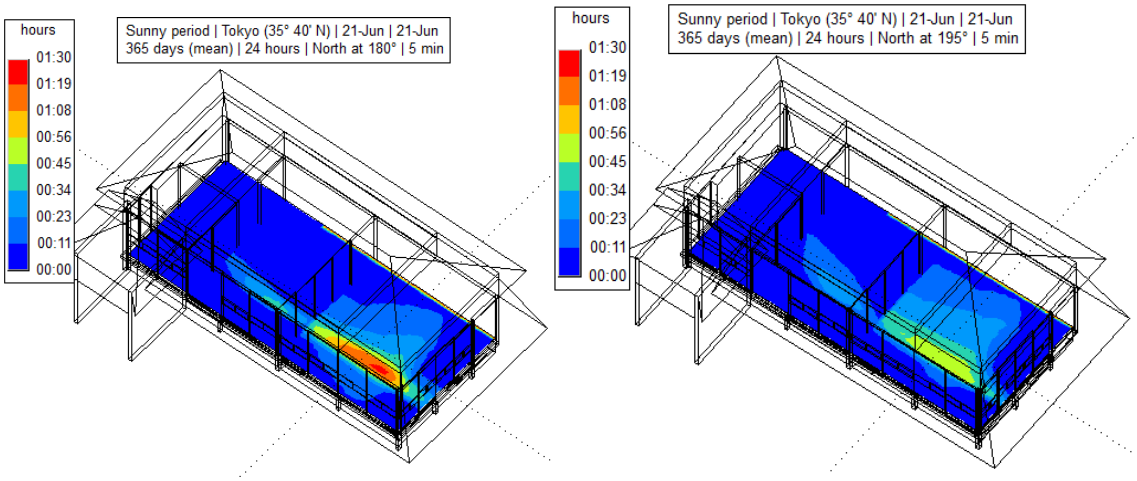
Efectos de la orientación

Es posible estudiar cómo un cambio de orientación en esta arquitectura afecta al comportamiento solar. Para ello, se va a rotar 15º en sentido horario el pabellón, viendo a continuación la estereografía y la evolución de la potencia solar.



Estereografía solar desde el centro de la sala este (rotación de 15º)

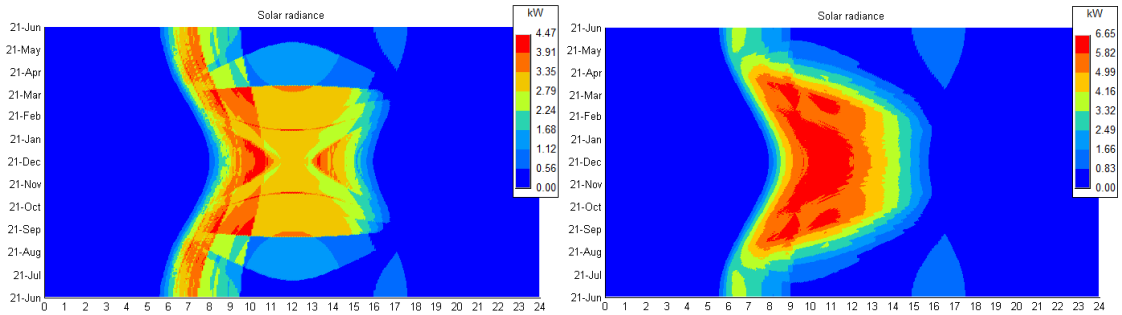
En la estereografía se puede apreciar rápidamente cómo al rotar 15º el pabellón en sentido horario, se gana sol por la mañana en invierno pero se pierde el de la tarde en esa misma estación. Las siguientes figuras permiten comparar la potencia solar durante un año completo (a la izquierda con la orientación original y a la derecha con la rotación de 15º en sentido horario).



Evolución del asoleo directo durante un año completo

Se observa claramente cómo entra más sol en el interior del pabellón desde la cara sur del mismo, aunque disminuye la cantidad de sol acumulado, ya que no hay zonas que reciban una media superior a una hora diaria.

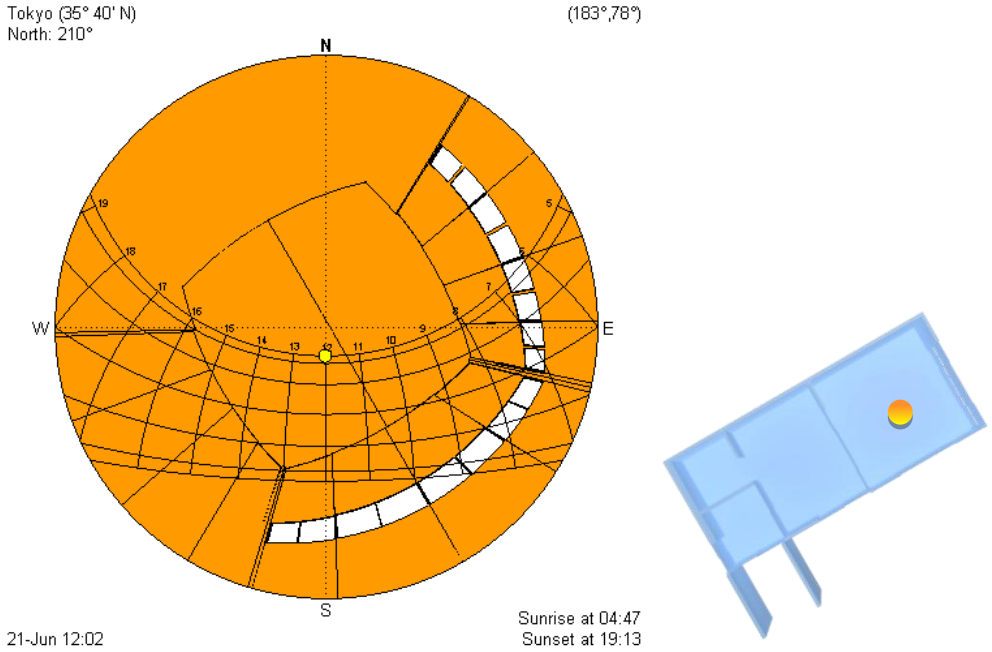
Las gráficas de la evolución de la potencia solar a lo largo de un año completo son las siguientes.



Evolución de la potencia solar al cabo de un año completo

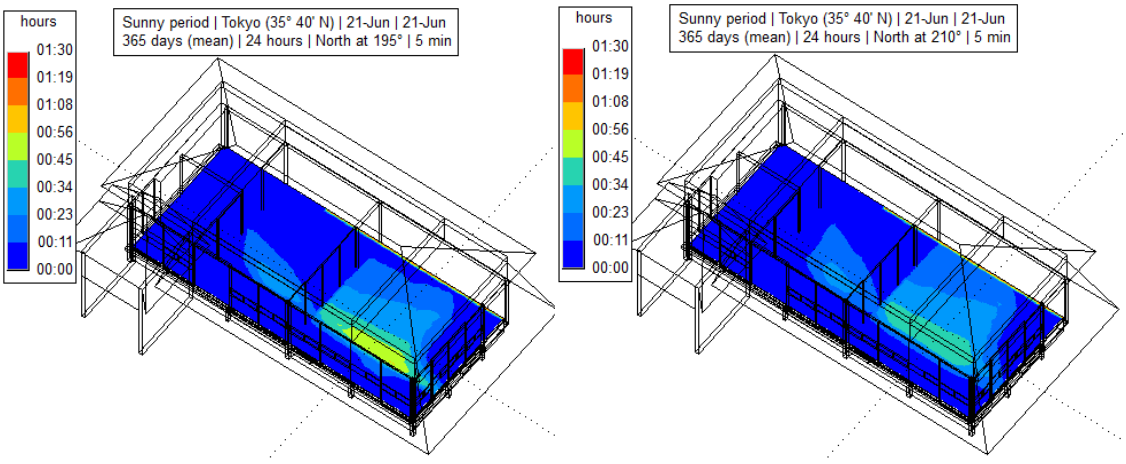
Nuevamente es notable cómo en la gráfica de la derecha (con el pabellón rotado 15º en sentido horario), el interior del pabellón cuenta con más sol.

A continuación se repite el experimento pero rotando 15º más el pabellón, llegando a una diferencia de 30º en sentido horario respecto la orientación original de la cara sin ventanas hacia el norte.



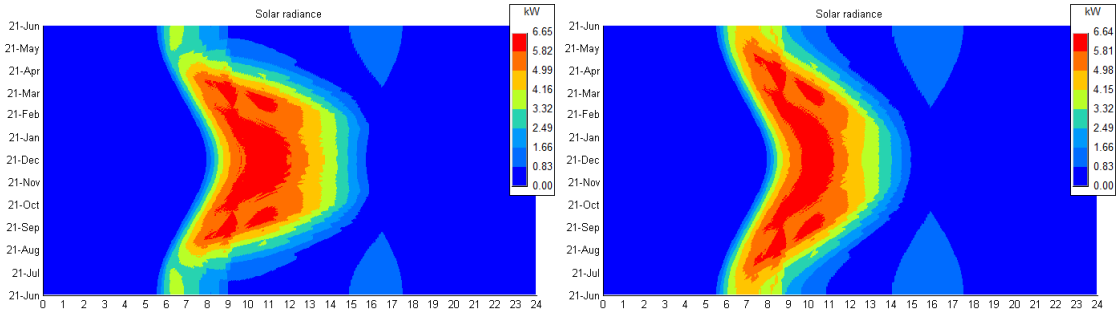
Estereografía solar desde el centro de la sala este (rotación de 30º)

El cambio respecto la rotación de 15º es un incremento de sol en invierno por la mañana, aunque el resto del año sigue igual. En las siguientes figuras vemos la comparativa de potencia solar (a la izquierda rotando 15º y a la derecha rotando 30º).



Evolución del asoleo directo durante un año completo

Se observa rápidamente un incremento mucho mayor de sol en el interior del pabellón. Incluso en la sala contigua en el centro del edificio se puede ver cómo el sol penetra más desde la cara sur, pese a que sigue decreciendo la media de sol acumulado en la parte más expuesta.



Evolución de la potencia solar al cabo de un año completo

La gráfica de evolución de la potencia solar se suaviza respecto la tomada con 15º de rotación, ya que entra más sol por las mañanas durante el verano y menos durante el invierno.

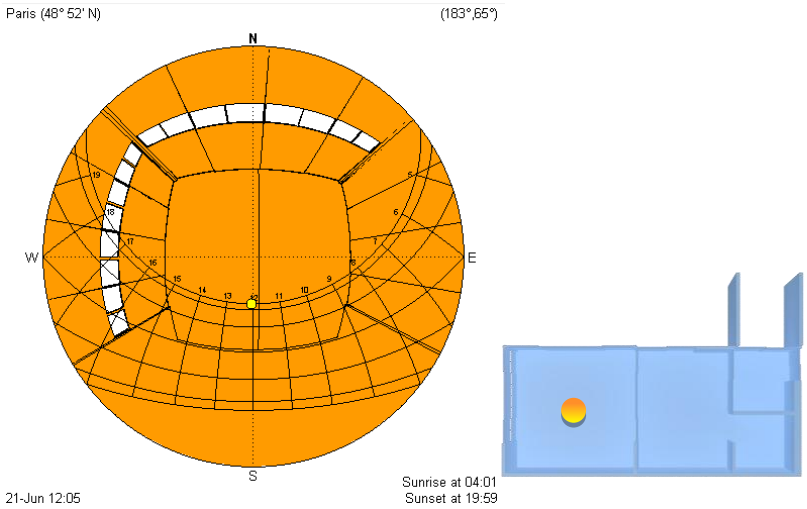
Con estos experimentos queda constancia de cómo los cambios de orientación rotando el pabellón sobre su propio eje también afectan al comportamiento del sol en el mismo.

Escenario real en París

Finalmente y para terminar este apartado del capítulo, es posible reproducir el experimento una vez más, pero con un cambio sustancial. Se van a utilizar las coordenadas de París y la rotación respecto el norte con que está situado el pabellón real en los Jardines de Albert Kahn.

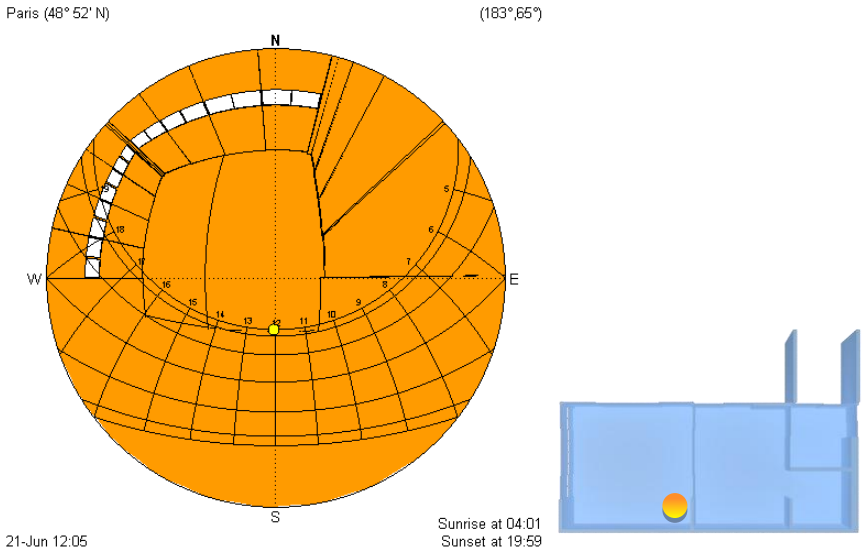
Así pues, se ha ajustado el estudio de *Heliodon 2* a las coordenadas geográficas de París (48° 51' N) y se ha rotando el pabellón hasta que esté orientado como el edificio original (aproximadamente 180º respecto a su orientación con la cara sin ventanas hacia el norte).

Como en el estudio anterior, se empieza observando las estereografías solares y su análisis.



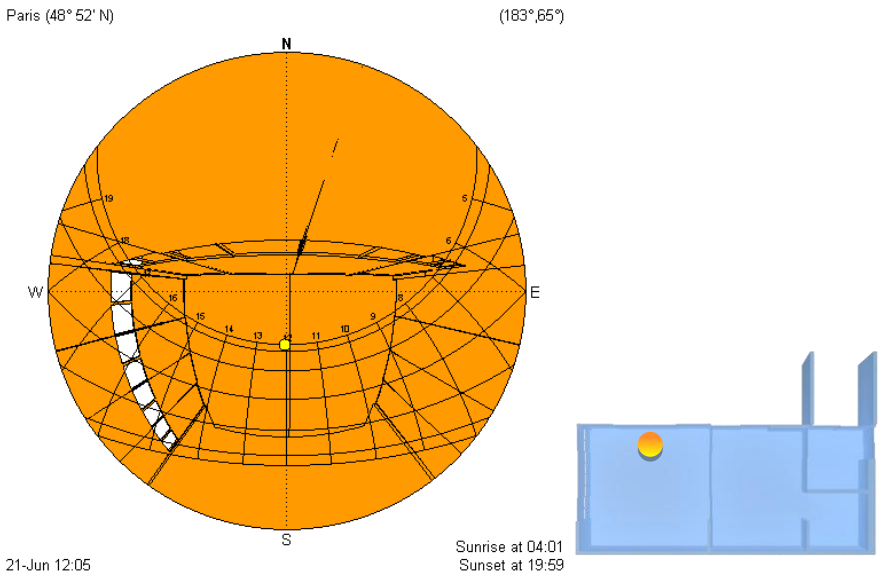
Estereografía solar desde el centro de la sala este (rotación de 180º)

Lo primero que se observa es cómo la cara norte (antigua cara sur) no ofrece sol alguno al centro de la sala grande del pabellón. Y la cara oeste (antigua cara este) sólo ofrece una media hora de sol diaria durante las tardes de primavera, verano y parte de otoño. Así pues, se aprecia que no hay sol durante invierno, algo que se va a comprobar con el estudio de potencia solar en breve.



Estereografía solar desde el punto más alejado de las ventanas (rotación de 180º)

Se observa en la anterior estereografía, cómo al tatami más alejado de las ventanas de la sala grande del pabellón, sólo hay media hora de sol diaria durante las tardes de primavera.

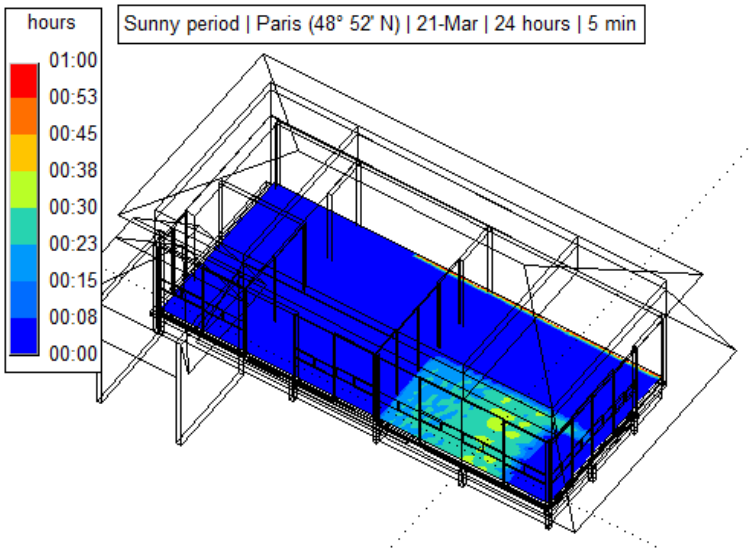


Estereografía solar desde un punto cercano a la cara norte (rotación de 180º)

En esta última estereografía se puede apreciar cómo la cara norte tampoco aporta sol a los tatamis y cómo la cara oeste da su media hora diaria por las tardes, durante todo el año.

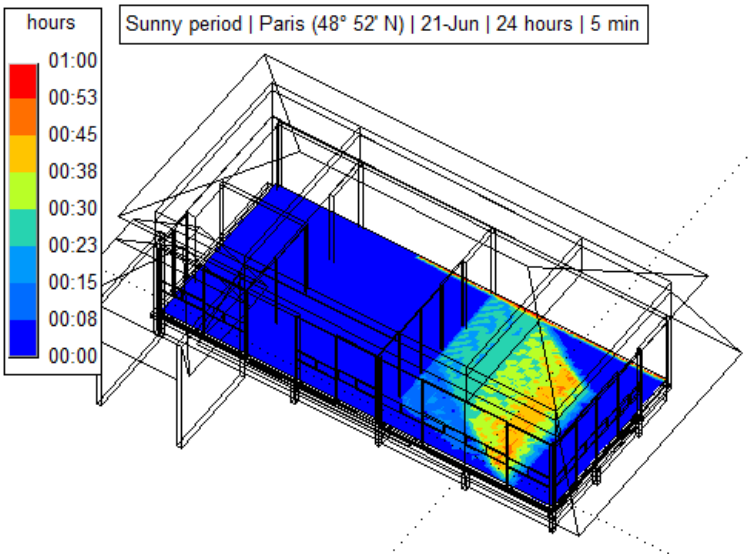
Con este análisis de las estereografías, se concluye que la posición de los pabellones no es la correcta, puesto que el sol que penetra en la estructura es escaso. Además, el poco sol que entra lo hace exclusivamente durante las tardes. Y finalmente, la cara norte no aporta absolutamente nada de sol a través de sus ventanas.

Se procede entonces a estudiar las gráficas de potencia solar.



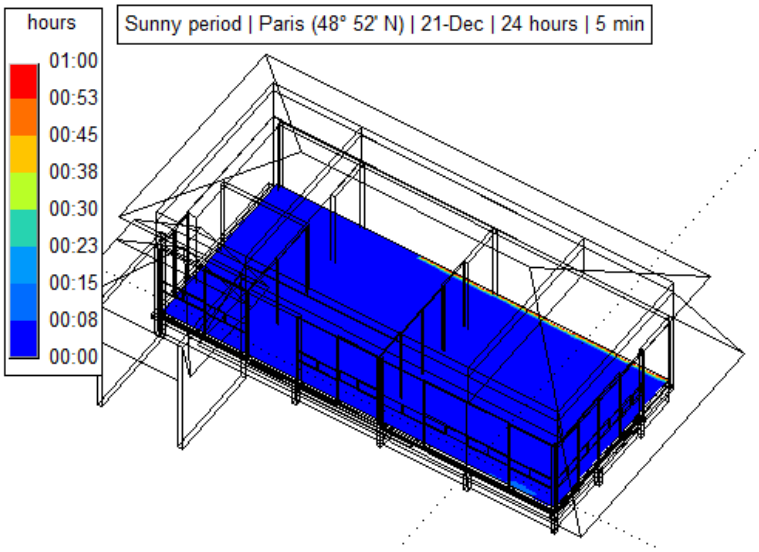
Asoleo directo en los equinoccios (rotación de 180º)

Se aprecia cómo aproximadamente la mitad de la sala grande del pabellón permanece sin sol, mientras que la sala interior no recibe absolutamente nada.



Asoleo directo en el solsticio de verano (rotación de 180º)

Se observa cómo la sala interior tampoco recibe sol en verano, mientras que la sala grande sí recibe sol casi en todas las zonas de los tatamis, aunque no llega apenas a 50 minutos diarios.

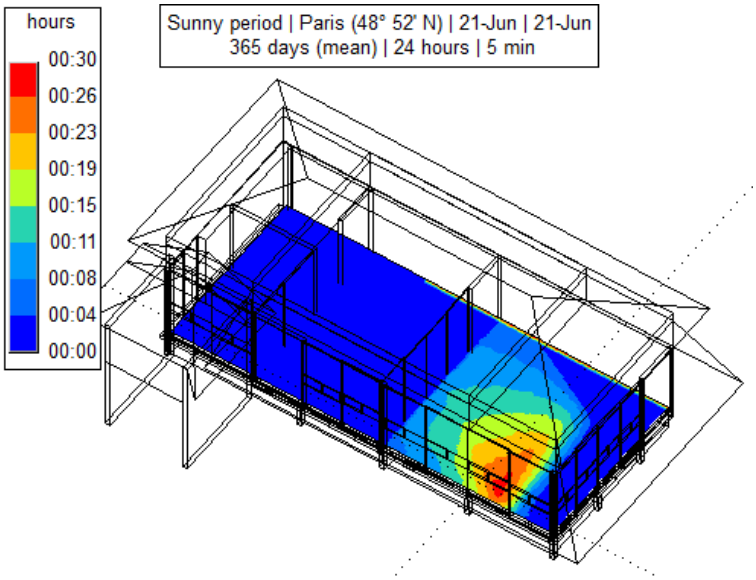


Asoleo directo en el solsticio de invierno (rotación de 180º)

En esta última gráfica se aprecia cómo no penetra absolutamente nada de sol durante invierno.

Habiendo estudiado en las estereografías cómo la cara sur (ahora cara norte por el cambio de orientación) no aporta absolutamente nada de sol a las dos salas del pabellón y cómo se tiene más sol en verano que en el resto de estaciones, mientras que en invierno no penetra absolutamente nada de sol, queda claro que esta orientación no es para la que se diseñó la estructura.

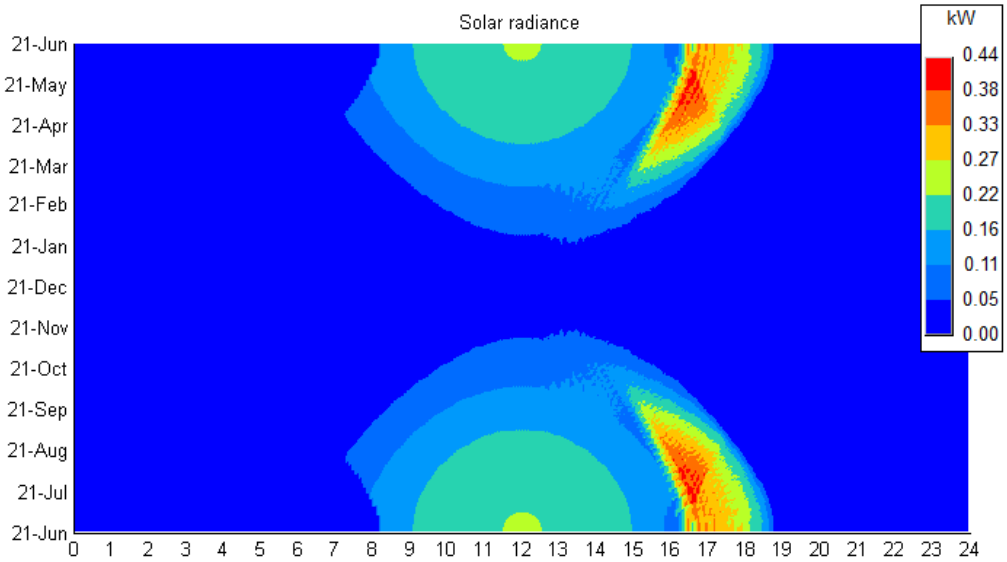
Como prueba final, se muestra aquí el gráfico de la evolución de la potencia solar durante un año completo.



Evolución del asoleo directo durante un año completo (rotación de 180º)

Se puede observar cómo efectivamente no llega sol a la sala interior y cómo la mayor parte de la sala grande sí recibe sol, aunque sabemos por el estudio anterior que durante el invierno no.

Finalmente, es posible visualizar el gráfico de la evolución de la potencia solar al cabo de un año completo.



Evolución de la potencia solar al cabo de un año completo (rotación de 180º)

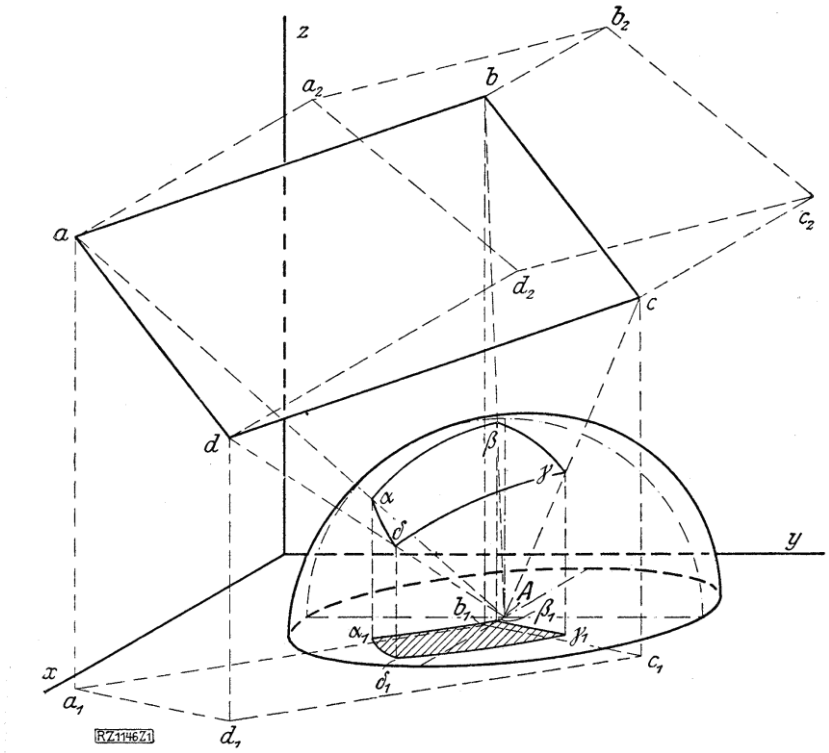
Lo primero que se observa es cómo durante invierno no llega nada de sol a los tatamis y cómo la mayor potencia solar recibida es entre las cuatro y las cinco de la tarde durante los equinoccios. Este comportamiento contrasta enormemente con el del primer estudio, despejando toda duda acerca de cuál es la correcta orientación de esta arquitectura.

Estudio del factor de vista del cielo

En radiosidad, la interacción entre distintos elementos es descrita mediante una expresión geométrica llamada “factor de vista”. Su significado físico es que representa la proporción de la potencia total recibida por un elemento desde otro. La analogía de Nusselt [Beckers 2009] muestra que este factor se puede evaluar proyectando la proyección esférica de las máscaras de forma ortogonal sobre el plano estudiado.

Este término es el resultado entonces de una doble integración sobre los dos elementos puestos en relación, siendo proporcional a los cosenos de los ángulos que forma el rayo con las normales de las dos superficies, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

En la siguiente figura, se muestra en representación oblicua cómo la superficie “abcd” es irradiada desde el punto A.



Radiación de abcd desde A, dibujo original de Nusselt

Con este factor, es posible calcular entonces el potencial que una superficie proyecta sobre otra, que trasladado a este estudio de la arquitectura japonesa, sería la proyección de la bóveda celeste sobre la superficie de un pabellón japonés, concretamente el interior.

La fórmula para calcular el factor de vista nace como parte de la resolución de la ecuación de iluminación global [Beckers 2014], que expresa la interacción entre superficies y se puede discretizar asumiendo que la “reflectancia” es constante en todos los elementos.

Calculando el factor de vista del cielo

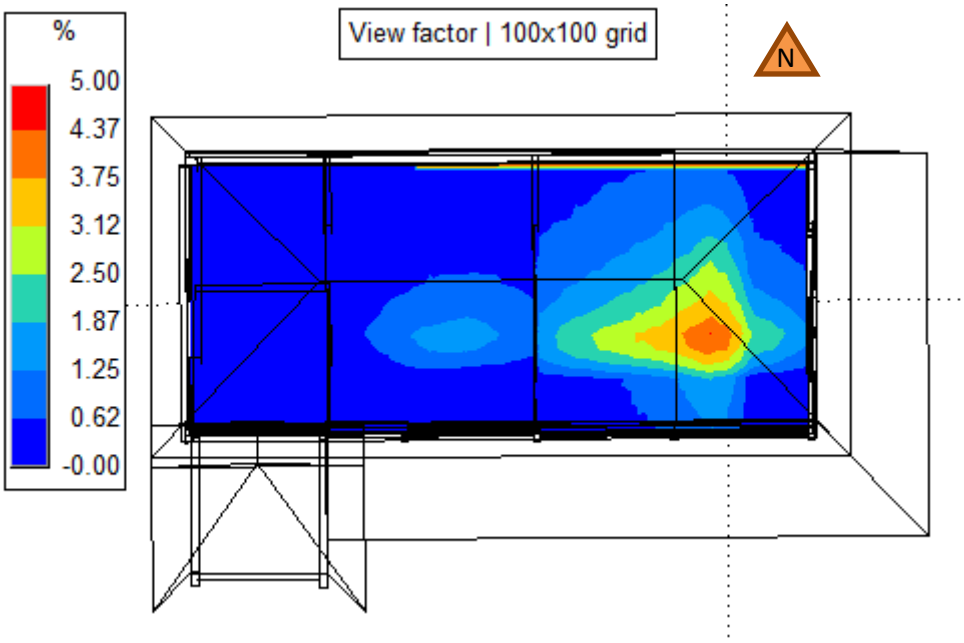
Volviendo al caso de estudio, es interesante estudiar el factor de vista del cielo sobre el pabellón modelado. En particular, es interesante calcularlo sobre los tatamis del interior, para ver qué proyección del cielo reciben a través de las aperturas exteriores. Este cálculo dará un indicador también de la luz natural, debido a la iluminancia del exterior, y además es necesario para calcular la radiación difusa y, a partir de esta, la iluminancia difusa para poder tener en cuenta los efectos climáticos, como se verá en apartados posteriores.

En *Heliodon 2* es posible calcular el factor de vista del cielo mediante la proyección ortogonal de la bóveda celeste sobre una superficie mallada. Es un cálculo breve y muestra en un mapa de color el porcentaje de proyección del cielo sobre cada punto de la malla.

Así entonces, lo siguiente a mostrar es el resultado de estos cálculos en nuestro modelo 3D.

Cálculos sobre el pabellón

Para esta parte del estudio, se ha vuelto a utilizar el modelo del pabellón, pero en esta ocasión no es relevante ni su orientación ni su latitud, puesto que no afectan al factor de vista del cielo, que es un cálculo puramente geométrico. Trazando un mallado sobre los tatamis con un ancho de celda de 10cm, *Heliodon 2* ha permitido calcular el factor de vista con una proyección ortográfica. Es posible visualizar el resultado del cálculo en la siguiente figura.



Factor de vista del cielo desde los tatamis del interior del pabellón

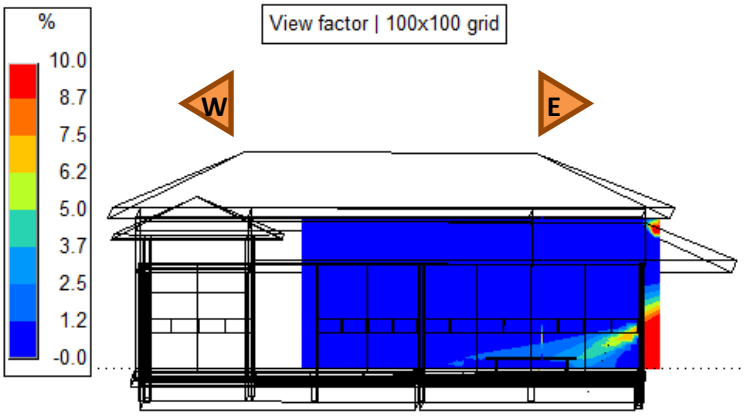
Se observa a simple vista que el interior permanece bastante oscuro y que la mayor parte de los tatamis no llega a alcanzar el 2% de factor de vista del cielo. El punto más luminoso se encuentra en el cuadrante sureste de la sala este del pabellón, sin llegar al 5% de factor de vista del cielo.

Como apunte adicional, hay que recordar que a la luz que penetre en el pabellón de forma directa y que se ha podido observar en el capítulo de trayectos solares, hay que añadir la recibida gracias a la traslucidez de los paneles deslizantes.

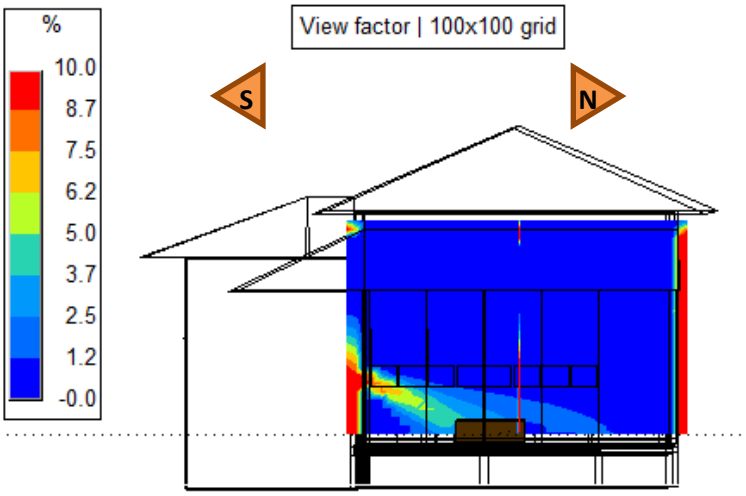
Con todo, es notorio que los pabellones de este tipo de arquitectura fueron diseñados y construidos como espacios de meditación, de forma que uno pudiera abstraerse de todo, buscando un confort especial. Esto se puede observar también en otros tipos de arquitecturas, como por ejemplo las catedrales góticas [Villazon 2008, Collin 2008], dónde en los espacios con más vista del cielo, el factor de vista alcanza como mucho el 3%.

Otro hecho relevante es que el punto con mayor factor de vista del cielo es justamente dónde está situada una pequeña mesa a baja altura. Es lógico pues que esté situada ahí, puesto que debido a la baja altura de las pequeñas ventanas, un individuo debe sentarse sobre el tatami y la mesa tiene que tener también una altura pequeña para poder usarse cómodamente.

En las siguientes figura se puede observar en un corte vertical el factor de vista del cielo sobre la sala este del pabellón, incluyendo la mesa baja, para demostrar claramente la observación.

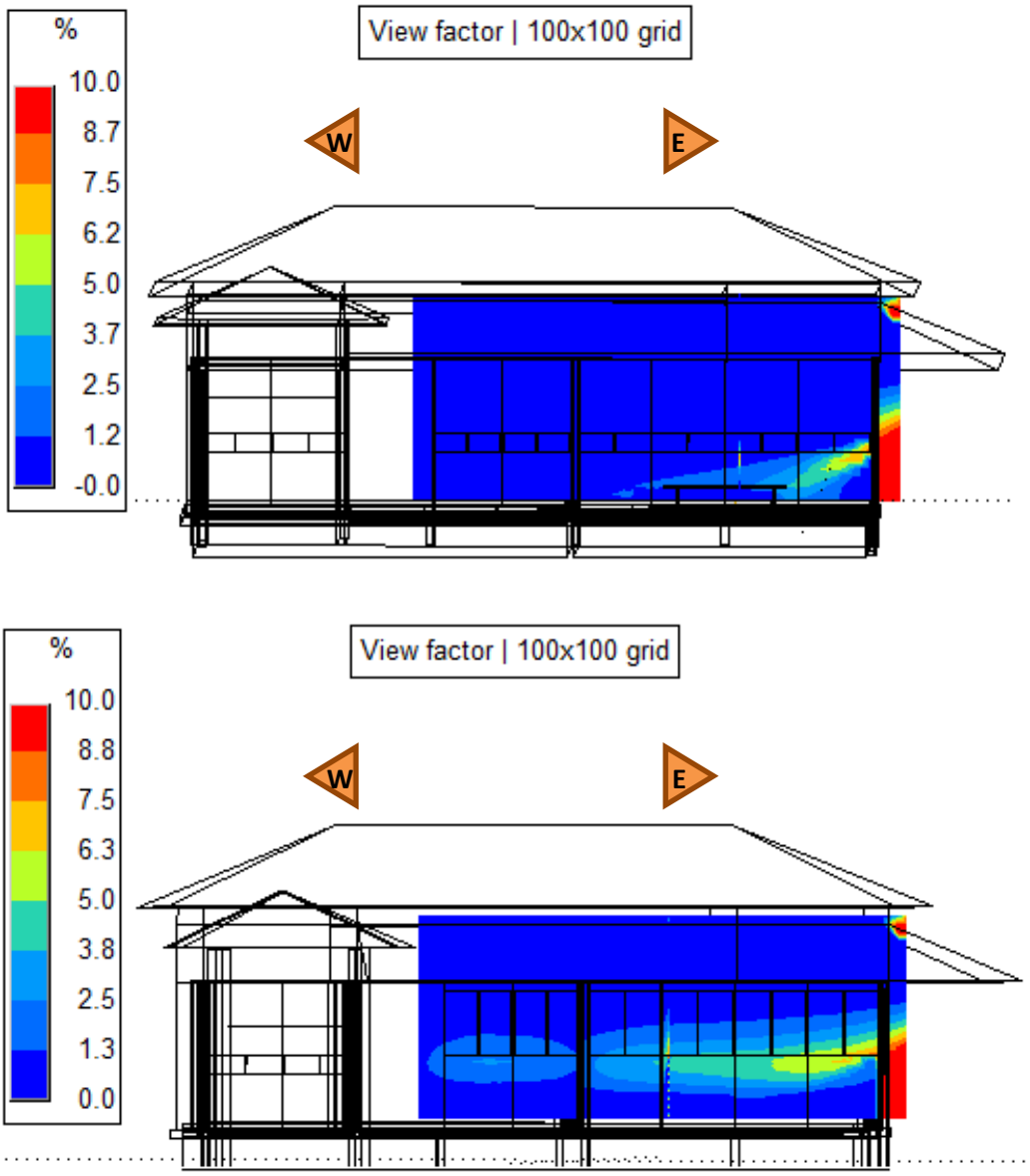


Perfil desde la cara sur (con mesa)



Perfil desde la cara este (con mesa)

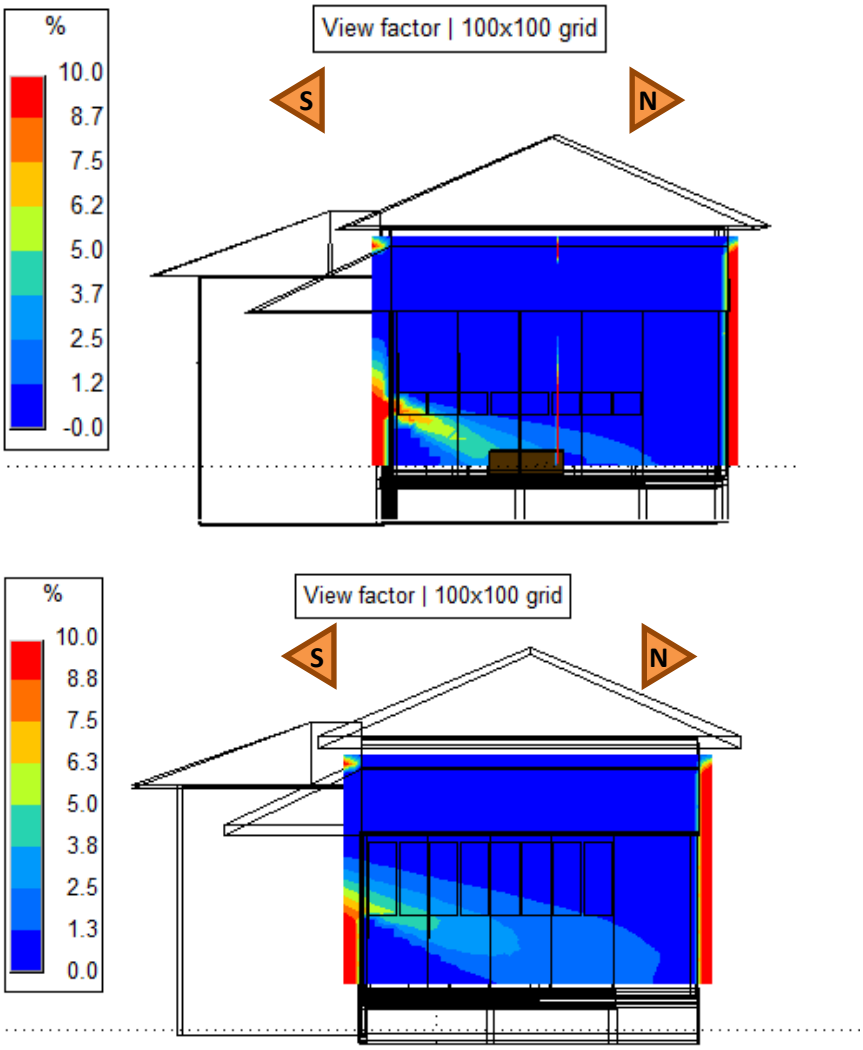
Si el pabellón contase con ventanas más altas y situadas a mayor altura, el resultado sería completamente distinto, como se puede observar en el siguiente corte vertical, usando un modelo con las ventanas de 1 metro de alto y situadas a casi 1 metro del suelo.



Perfil desde la cara sur (arriba modelo original, abajo modelo occidentalizado)

Comparando el modelo original con la mesa con el modelo occidentalizado, se aprecia rápidamente cómo hay mucha más proyección del cielo en el interior del pabellón, llegando incluso a la sala interior.

En el siguiente corte vertical se aprecia lo mismo con respecto a las ventanas de la cara sur, contrastando notablemente con el diseño arquitectónico tradicional.



Perfil desde la cara este (arriba modelo original, abajo modelo occidentalizado)

Así pues, habiendo estudiado los trayectos solares, el sol que penetra en el pabellón y el cielo visible desde el interior del mismo, queda evidenciado que este tipo de arquitectura buscaba adecuar su atmósfera para que el visitante encontrara el confort para su meditación o descanso, contando incluso con una mesa adecuada justo en el punto con más luz para disponer de ella si era necesario. Probablemente para tomar el té o incluso para escribir o dibujar.

Estudio de los efectos climatológicos

Presencia de nubes

En primer lugar, en este apartado se va a proceder al estudio de la presencia de nubes en los dos escenarios elegidos, Tokyo y Kyoto, gracias a los datos recogidos por las estaciones meteorológicas correspondientes.

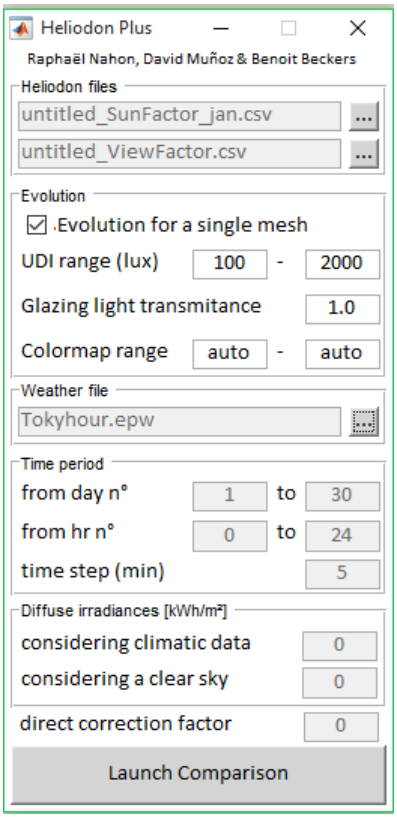
Para determinar la presencia de nubes, se comparan los datos teóricos de energía obtenidos mediante *Heliodon 2* con los datos reales medidos por la estación meteorológica local y se establece un factor de corrección.

Viendo la diferencia entre los valores teóricos y los medidos de la radiación directa, se procede a establecer un factor de corrección con la siguiente fórmula.

$$Facteur\ de\ correction = \frac{Rayonnement\ solaire\ calculé\ à\ partir\ des\ valeurs\ mesurées}{Rayonnement\ solaire\ calculé\ par\ Heliodon}$$

Así, se puede establecer el siguiente factor de corrección en porcentaje mes a mes. Para obtener los valores, se usa la aplicación *Heliodon Plus* [Nahon 2016], que mediante estos tres elementos de entrada permite calcular un factor de corrección para los valores de energía, a fin de tener en cuenta la meteorología de la zona de estudio, dejando así de asumir un cielo siempre despejado y aproximándose más a la realidad, como se ha visto en el apartado previo.

Se puede ver un ejemplo de uso en la siguiente figura.



Heliodon Plus calculando la corrección en enero con datos climáticos de Tokyo

Una vez aplicada la fórmula para calcular los factores de corrección, se obtiene la siguiente tabla para valorar la presencia de nubes mes a mes.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Correction	0.56	0.51	0.36	0.26	0.21	0.19	0.18	0.21	0.16	0.27	0.41	0.56

Factor de corrección para los valores de radiación según la presencia de nubes en Tokyo

Se observa cómo los meses de noviembre a febrero son los que cuentan con menor presencia de nubes (entre 41% y 56% de corrección sobre el cálculo teórico de radiación solar directa), mientras que setiembre es el mes más nublado (16% del cálculo teórico). La media anual de presencia de nubes sería entonces del 32,33%.

Se puede realizar el mismo estudio en Kyoto, para obtener la siguiente tabla.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Correction	0.61	0.39	0.40	0.23	0.33	0.25	0.24	0.31	0.33	0.35	0.50	0.56

Factor de corrección para los valores de radiación según la presencia de nubes en Kyoto

A simple vista, se aprecia menor presencia de nubes en Kyoto, incluso en los meses de verano. En invierno se llega al 61% de factor de corrección en enero y en julio se alcanza el 24%, siendo abril el mes más nublado. La media anual de presencia de nubes sería en este caso 37,50%. Sin duda la diferencia viene marcada también por los diferentes niveles de humedad relativa, pese a que ambas localizaciones estén en latitudes muy similares.

Lo más destacable de este análisis es que, estudiando las mediciones reales de las estaciones meteorológicas de Tokyo y Kyoto, se observa que el verano es mucho más nublado que el invierno.

Con estos factores de corrección es posible dar mayor precisión a los cálculos teóricos de radiación solar directa teniendo en cuenta el factor climático mediante datos reales recogidos en estaciones meteorológicas.

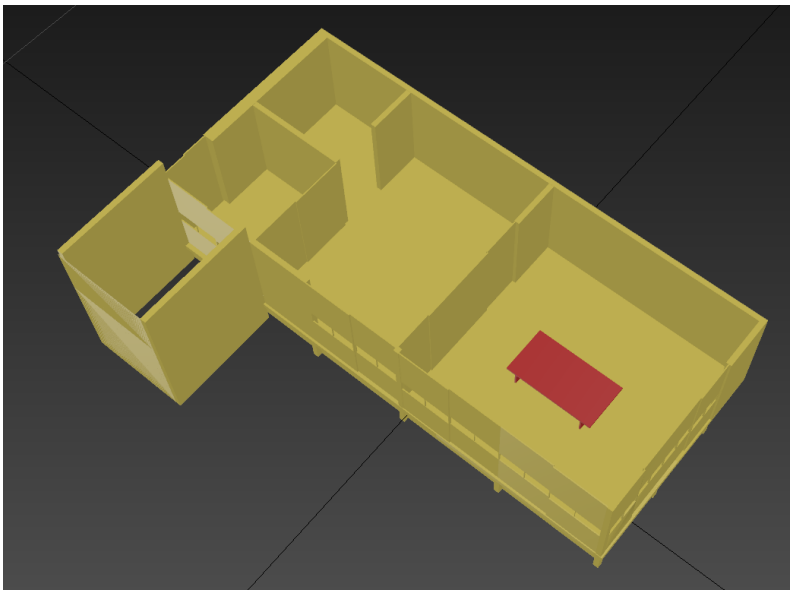
Una vez llegados a este punto, también es posible obtener la luminosidad en luxes, mediante factores de conversión para pasar de unidades energía a unidades de iluminancia (lux). No obstante, en esta estudio se va a omitir este paso del proceso, puesto que ya lo realiza automáticamente el aplicativo que se va a utilizar, y en el siguiente punto se va a proceder directamente al cálculo de rendimiento de la luz natural.

Factor UDI

La "Useful Daylight Illuminance" [Mardaljevic 2005] es una medida de rendimiento para el diseño sostenible de edificios, diseñada para cuantificar la luz natural en un espacio de trabajo.

El UDI se cumple cuando la ocurrencia anual de iluminancia a través de un espacio de trabajo se mantiene entre un rango de 100 a 2000 lux. Estos límites se basan en informes de preferencias y el comportamiento de los ocupantes en oficinas con luz natural. Se establece que 100 lux es la condición mínima de iluminancia para poder trabajar (menos dificultaría la visión) y 2000 lux son el máximo (más se considera deslumbramiento, dificultando también el trabajo).

Ambas medidas pueden ser utilizadas en este estudio para comprobar y cuantificar si sería posible el trabajo en un pabellón japonés del período Edo. Para ello se va a usar el modelo 3D que incluye la mesa en la sala grande.



Modelo 3D del pabellón japonés (sin techo) incluyendo la mesa de trabajo

En primer lugar, se han guardado en formato de hoja de cálculo todos los datos de salida de *Heliodon 2* sobre la mesa del modelo del pabellón, tanto estereográficos como ortográficos, para tener tanto la energía como los factores de vista del cielo. Los datos han sido recogidos con su configuración óptima, es decir, con las coordenadas geográficas de Tokyo y con la cara sin ventanas orientada hacia el norte. Además, de nuevo se cuenta con los datos climáticos recogidos por una estación meteorológica en Tokyo, entre 1961 y 1990. El rango horario estudiado comprende desde las 8 de la mañana hasta las 7 de la tarde, emulando un horario de oficina, por ejemplo. La simulación se ha realizado para un año completo y después se ha repetido el mismo experimento pero con la latitud de Kyoto.

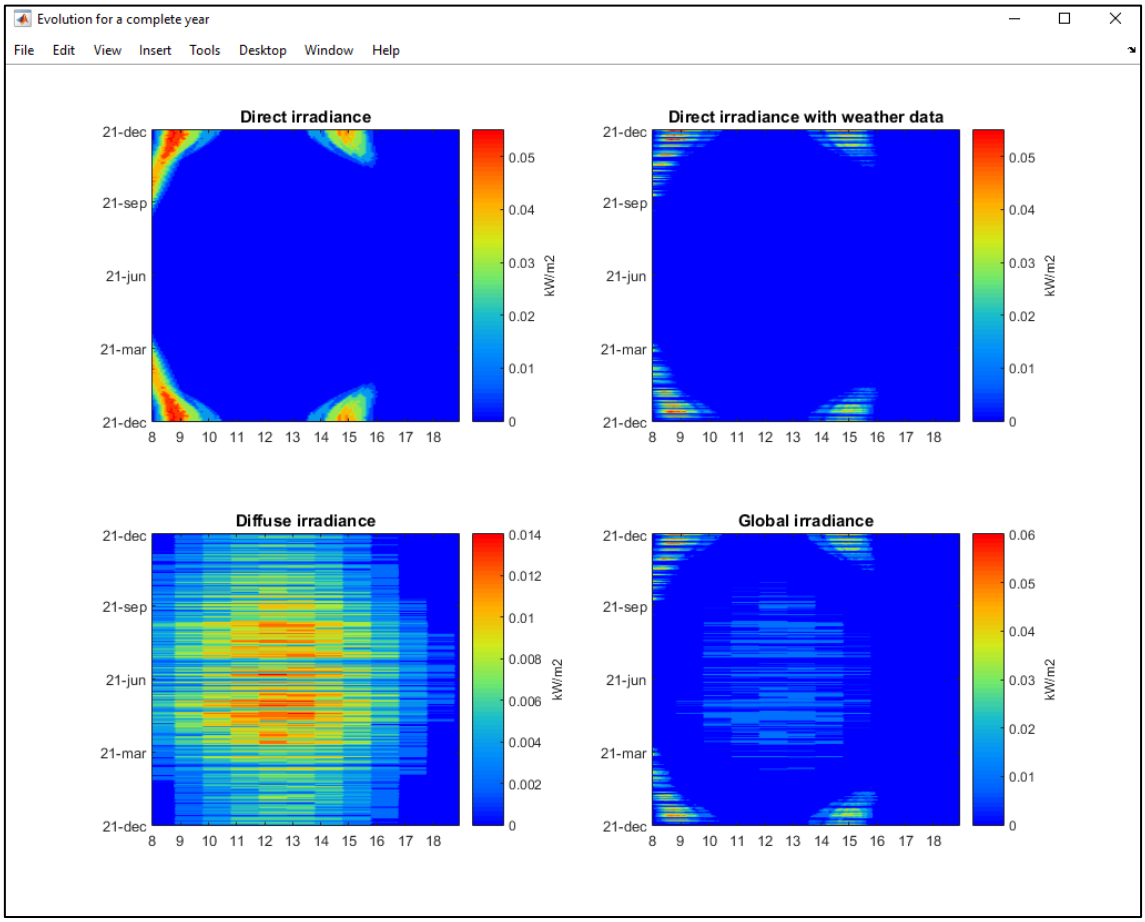
Una vez ejecutado *Heliodon Plus*, se obtiene una hoja de cálculo que contiene todas las nuevas variables. Manteniendo el enfoque en el factor UDI, se observa que para los escenarios de Tokyo y Kyoto, estos son los resultados.

	UDI (%)
Tokyo	83.79
Kyoto	83.48

Valores de UDI en el modelo del pabellón japonés con la mesa original

Se aprecia que en ambas localizaciones la mesa cumple con el UDI aproximadamente el 83% del tiempo.

Además, al finalizar el cálculo *Heliodon Plus* muestra unas gráficas para analizar visualmente cómo el sol incide en la zona mallada del modelo, en este caso la mesa en el interior del pabellón japonés.



Radiación solar en la mesa del pabellón con latitud y clima de Tokyo

Es importante aclarar que *Heliodon 2* realiza sus cálculos sin tener en cuenta la reflexión (todas las paredes son negras) ni la transmisión (todas las paredes son opacas). Así entonces, en esta arquitectura en particular, no se refleja en los resultados la energía recibida a través de los paneles translúcidos de las puertas exteriores ni tampoco los reflejos entre superficies.

Ahora, mediante una modificación del modelo, es posible sustituir la mesa por una mesa de estilo occidental, con las mismas dimensiones pero a 1 metro de altura del suelo en lugar de a 25 centímetros. Este tipo de mueble está pensado para trabajar sentado sobre una silla, manteniendo los brazos a una altura similar a la de la superficie plana de la mesa. Entonces, los

valores de UDI de la mesa cambian a los siguientes, que son más que previsibles debido a que la superficie plana de la mesa ahora queda situada por encima de las ventanas de las puertas correderas.

	UDI (%)
Tokyo	0.00
Kyoto	0.00

Valores de UDI en el modelo del pabellón japonés con la mesa alternativa

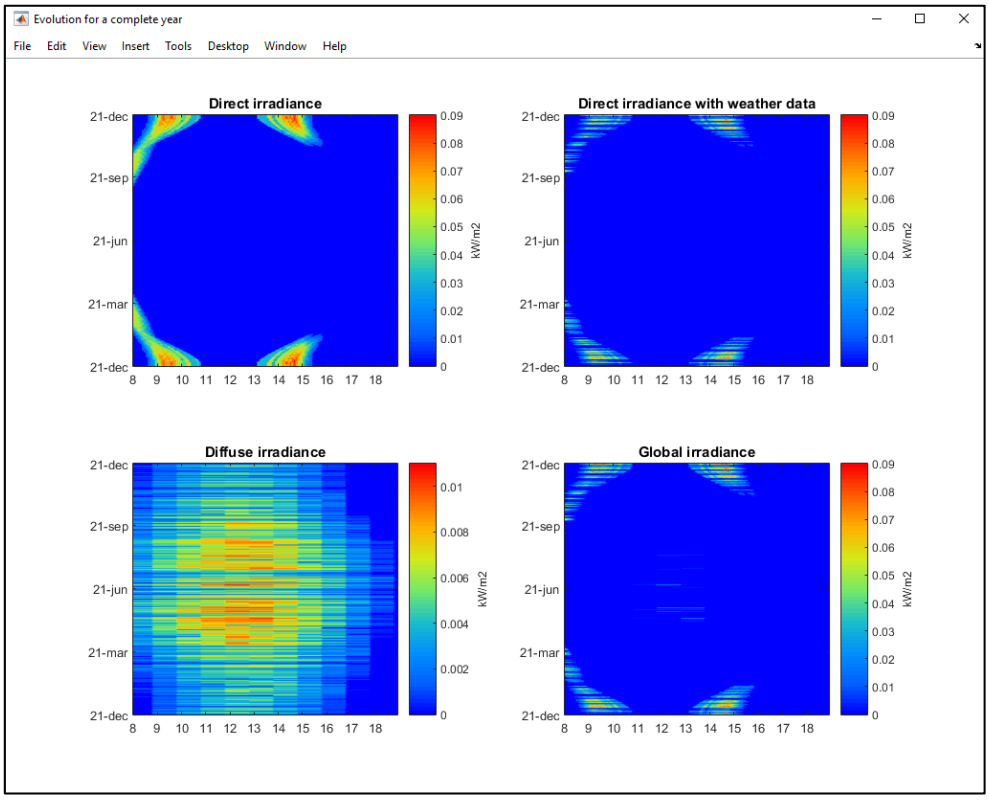
Se aprecia cómo en estas condiciones la eficiencia desaparece completamente, demostrando una vez más cómo este tipo de arquitectura sólo funciona si los visitantes realizan sus actividades a baja altura del suelo, normalmente sentados sobre los tatamis e inclinados sobre la mesa a 25-30 centímetros del suelo.

Volviendo a ejecutar los cálculos, esta vez con el modelo "occidentalizado" con las ventanas más altas y de mayor tamaño, este es el resultado sobre la mesa baja tradicional.

	UDI (%)
Tokyo	84.49
Kyoto	83.84

Valores de UDI en el modelo del pabellón japonés occidentalizado con la mesa original

Se aprecia cómo el tiempo en que la mesa cumple el UDI vuele a situarse entre un 83% y un 84% aproximadamente, ya que ahora la mesa occidental vuelve a tener factor de vista del cielo y también sol directo gracias al estilo occidental de ventanas. Se pueden ver las gráficas solares en la siguiente figura.



Radiación solar en la mesa del pabellón (occidentalizado) con latitud y clima de Tokyo

Se concluye por lo tanto que con muebles y elementos de otros estilos se pierde eficiencia porque la arquitectura estudiada está diseñada para una actividad a poca altura del suelo y tener ventanas más altas y grandes aumenta el deslumbramiento.

Conclusiones

En este trabajo, se han estudiado apartado tras apartado varios elementos relevantes de la arquitectura japonesa del período Edo de una forma experimental y se han demostrado también varias conclusiones. Todo esto se ha podido lograr mediante la recreación en 3D de un edificio real de este tipo de arquitectura y distintas pruebas con el aplicativo *Heliodon 2*, simulando los trayectos solares según las latitudes de tres escenarios de estudio: Tokyo, Kyoto y París.

En primer lugar, se ha mostrado que la orientación es muy importante, ya que tanto las ventanas de las puertas correderas exteriores como los propios tejados y saledizos están diseñados para mantener el interior a una ambientación de confort, enmascarando el sol durante el año permitiendo más su entrada en invierno. De esta forma se consigue tener una media hora de sol cada mañana para poder limpiar el interior, mientras que la luz directa no rompe en ningún momento la armonía ni la paz dentro de la estructura. Con la orientación original se consigue que la parte central de la sala grande tenga la luz adecuada, mientras que el fondo permanece más oscuro para que las estanterías y los armarios no reciban sol directo. Si se altera la orientación del pabellón, este delicado equilibrio se rompe y se pierde la eficiencia teniendo más sol en verano y menos en invierno, invirtiendo la fórmula del caso idóneo.

Además, se ha podido observar también cómo las dimensiones y la posición de las ventanas de las puertas regulan también el cielo visible, manteniéndolo también a un nivel suficiente para poder trabajar en la pequeña mesa de la sala grande, ni más ni menos. Si la mesa fuera una mesa de tipo occidental, considerablemente más alta y pensada para trabajar sentados en sillas, se pierde completamente la eficiencia ya que no llega luz a la superficie plana del mueble y eso imposibilita trabajar en ella sin luz artificial.

Posteriormente, y gracias a datos climatológicos recogidos por estaciones meteorológicas, se ha obtenido un indicador para cuantificar la presencia de nubes en cada zona, mediante un contraste entre los valores reales medidos y los valores teóricos calculados mediante *Heliodon 2*. Gracias a esto y al aplicativo *Heliodon Plus*, es posible obtener valores de energía más realistas y también otras medidas como la luminancia o el factor UDI. Estudiando estos últimos es como se ha llegado a la conclusión respecto a la idoneidad de la altura de la mesa de trabajo y también se ha observado cómo esta tiene una iluminación apta para el trabajo, mientras que el fondo de la sala (la parte más al norte) queda más oscuro y resguardado del sol puesto que ahí están los armarios y estanterías para guardar cosas.

Así pues, mediante el modelado fiel de una estructura real y su estudio teniendo en cuenta las coordenadas geométricas y la climatología, es posible hallar las funciones y el comportamiento de distintos elementos del estilo arquitectónico en cuestión. En este caso, de una arquitectura casi desaparecida como es la del período Edo en Japón.

Referencias

[Akahn 2015] Etude exploratoire des pavillons japonais du jardín Albert Kahn: rapports préliminaires de la caractérisation des bois et des polychromies. http://www.japonismearchitectural.com/akhan.html

[Beckers 2006] Beckers B., Masset L. Heliodon 2, software and user's guide. http://www.heliodon.net

[Beckers 2009] Beckers B., Masset L., Beckers P. (2009). Commentaires sur l'analogie de Nusselt. Rapport Helio004fr. http://www.heliodon.net.

[Beckers 2014] Beckers B., Beckers P. (2014). Reconciliation of Geometry and Perception in Radiation Physics. John Wiley & Sons.

[bootsnall.com] Highlights of Tokyo & Kyoto. http://adventures.bootsnall.com

[Collin 2008] Collin O (2008). Facteur de ciel: un paramètre d'évaluation des masques en architecture. Master thesis, Université de Liège.

[Engel 1989] Engel, H. (2015). Measure and construction of the Japanese house. Tuttle Publishing.

[Mardaljevic 2005] Mardaljevic, J. Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm for Assessing Daylight in Buildings, Lighting Research and Technology 37(1):41-59 · March 2005

[Nahon 2016] Nahon R., Muñoz D., Beckers B. Heliodon Plus, software and user's guide. http://www.heliodon.net

[nationsonline.org] One World - Nations Online. http://www.nationsonline.org

[Nishi 1985] Nishi, K., & Hozumi, K. (1985). What is Japanese architecture? Kodansha Amer Inc.

[Reischauer 1973] Reischauer E. Histoire du Japon et des Japonais, éditions du Seuil, 1973.

[Villazon 2008] Villazón C. (2008). Estudio de la luz y geometría en iglesias románicas y góticas, Master thesis, Fundación UPC.

Anexo 1: Datos climatológicos de Tokyo y Kyoto según la base de datos de Meteonorm 6.0

METEONORM Version 6.1.0.23

Nom du site = Tokyo

Latitude [°] = 35,683, Longitude [°] = 139,767, Altitude [m] = 5, Zone climatique = IV, 7

Modèle rayonnement = Standard (heure); Modèle température = Standard (heure)

Température: Période vieille = 1961-1990

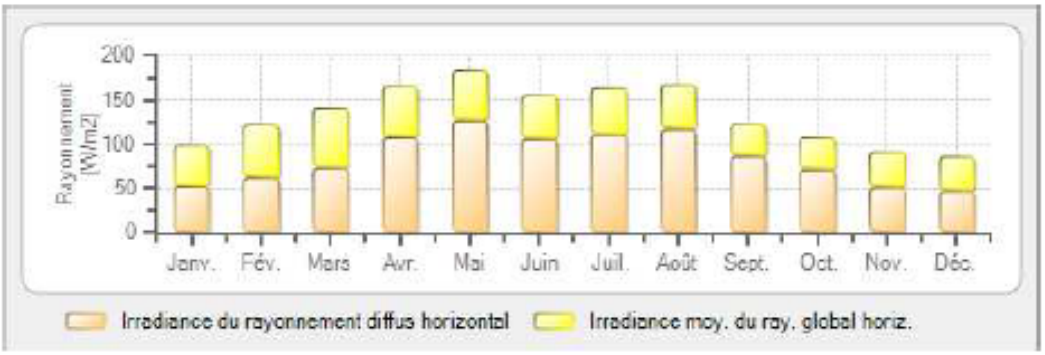
Rayonnement: Période vieille = 1981-1990

Paramètres mesurés (WMO nr: 476620) = Ta, FF, DD, RR, Td, Sd, Rd

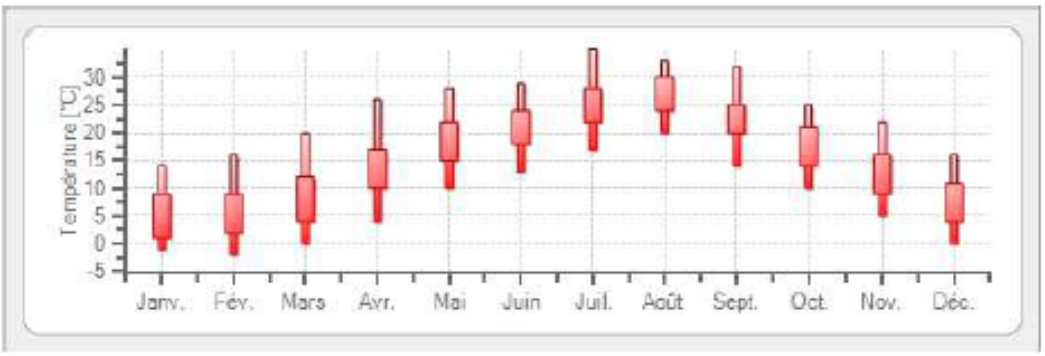
Mois	G_Gh	G_Bn	G_Dh	Lg	Ld	N
	[W/m2]	[W/m2]	[W/m2]	[W/m2]	[W/m2]	[octas]
Janv.	99	115	52	10564	6285	5
F□v.	122	118	62	13036	7515	5
Mars	141	112	73	15257	8943	5
Avr.	166	89	108	18211	12856	6
Mai	184	80	127	20439	15028	6
Juin	155	70	106	17468	13062	6
Juil.	164	76	111	18604	13573	6
Ao□t	168	74	117	19028	14681	6
Sept.	123	60	86	13904	10515	7
Oct.	108	71	71	12074	8646	6
Nov.	92	91	51	10117	6374	6
D□c.	86	101	47	9331	5696	5
Ann□e	134	88	84	14836	10264	6
Mois	Ta	Td	RH	p	DD	FF
Mois	[C]	[C]	[%]	[hPa]	[deg]	[m/s]
Janv.	5.2	-4.5	49	1014	338	3.4
F□v.	5.6	-3.4	52	1014	338	3.6
Mars	8.5	0.0	55	1014	338	3.8
Avr.	14.1	7.1	62	1014	338	3.7
Mai	18.6	12.0	66	1014	180	3.4
Juin	21.7	16.5	72	1014	180	3.3
Juil.	25.2	20.6	76	1014	180	3.0
Ao□t	27.1	21.7	73	1014	180	3.3
Sept.	23.2	18.0	73	1014	360	3.2
Oct.	17.6	11.5	67	1014	338	3.2
Nov.	12.6	5.3	61	1014	338	3.2
D□c.	7.9	-0.9	53	1014	338	3.2
Ann□e	15.6	8.7	63	1014	324	3.4

Legende:
Gh: Irradiance moy. du ray. global horiz.
Bn: Irradiance du rayonnement direct normal
Dh: Irradiance du rayonnement diffus horizontal
N: Nebulosite
Lg: Luminance globale
Ta: Temp. de l'air RH: Humidite relative
Td: Point de rosee DD: Direction du vent
FF: Vitesse du vent p: Pr. atmos.

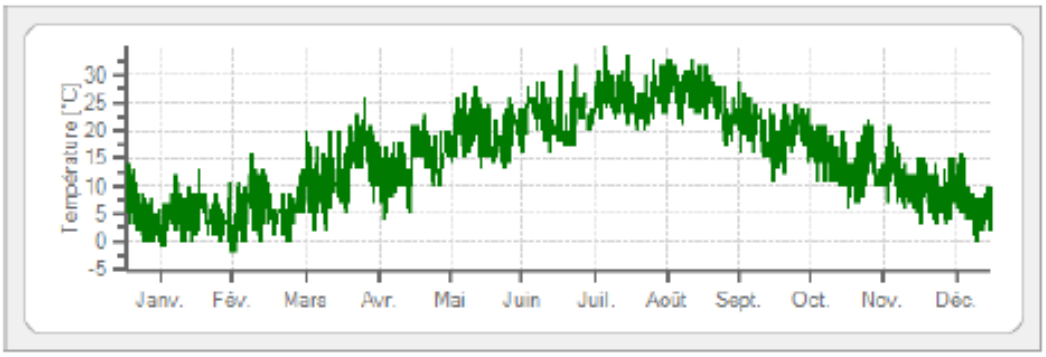
Page 1 of 2



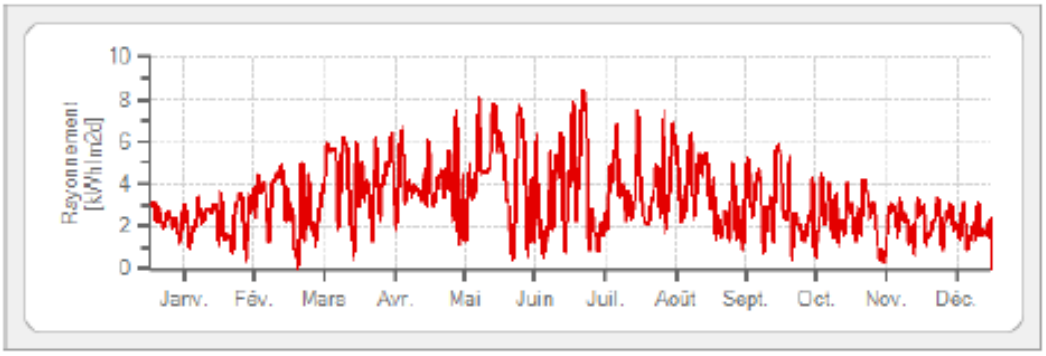
C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\Fig_ghdh3.png



C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\fig_tamima3.png



C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\fig_tadaily3.png



C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\fig_ghdaily3.png

Nom du site = Kyoto

Latitude [°] = 35,017, Longitude [°] = 135,733, Altitude [m] = 41, Zone climatique = IV, 7

Modèle rayonnement = Standard (heure); Modèle température = Standard (heure)

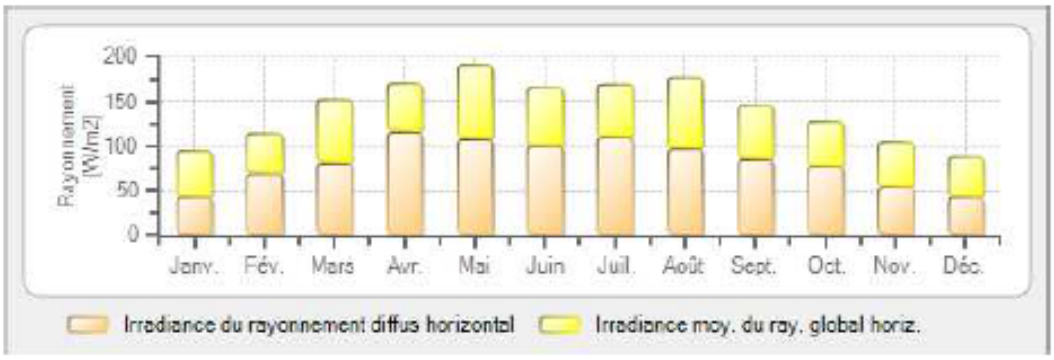
Température: Période vieille = 1961-1990

Rayonnement: Période vieille = 1961-1973

Paramètres mesurés (WMO nr: 477590) = Gh, Ta, FF, DD, RR, Td, Sd, Rd

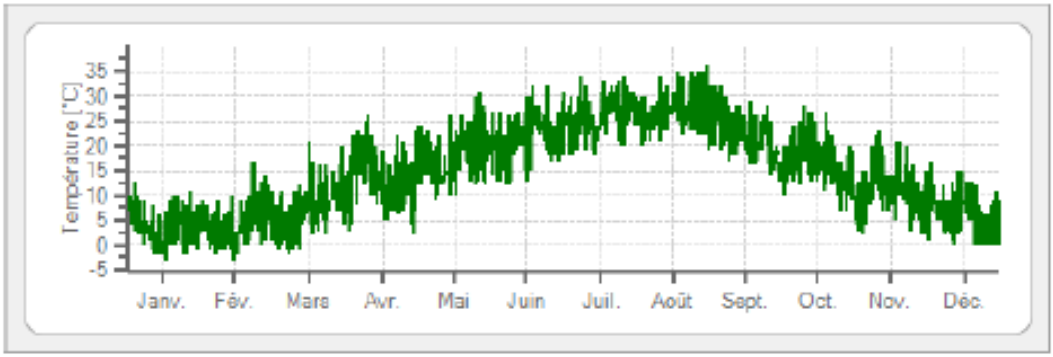
Mois	G_Gh	G_Bn	G_Dh	Lg	Ld	N
	[W/m2]	[W/m2]	[W/m2]	[W/m2]	[W/m2]	[octas]
Janv.	95	120	43	10215	5468	4
F□v.	115	93	69	12366	8191	5
Mars	152	119	81	16350	9756	5
Avr.	171	84	116	18755	13525	6
Mai	192	120	108	21220	13125	6
Juin	167	95	100	18707	12376	6
Juil.	170	87	110	19146	13960	6
Ao□t	177	119	97	20014	12219	6
Sept.	146	101	85	16408	10675	6
Oct.	129	96	77	14275	9589	5
Nov.	105	111	54	11502	6788	5
D□c.	88	109	43	9534	5420	5
Ann□e	142	105	82	15708	10091	5
Mois	Ta	Td	RH	p	DD	FF
Mois	[C]	[C]	[%]	[hPa]	[deg]	[m/s]
Janv.	4.0	-1.5	67	1010	293	1.4
F□v.	4.5	-1.0	67	1010	315	1.6
Mars	7.6	1.1	63	1010	338	1.7
Avr.	13.9	7.0	63	1010	360	1.8
Mai	18.7	11.7	64	1010	23	1.8
Juin	22.4	16.5	69	1010	360	1.7
Juil.	26.5	20.9	71	1010	23	1.7
Ao□t	27.7	21.5	69	1010	23	1.8
Sept.	23.4	17.7	71	1010	360	1.5
Oct.	17.1	11.5	69	1010	360	1.4
Nov.	11.5	6.2	70	1010	360	1.3
D□c.	6.5	1.3	69	1009	293	1.2
Ann□e	15.3	9.4	68	1010	352	1.6

Legende:
Gh: Irradiance moy. du ray. global horiz.
Bn: Irradiance du rayonnement direct normal
Dh: Irradiance du rayonnement diffus horizontal
N: Nebulosite
Lg: Luminance globale
Ta: Temp. de l'air RH: Humidite relative
Td: Point de rosee DD: Direction du vent
FF: Vitesse du vent p: Pr. atmos.

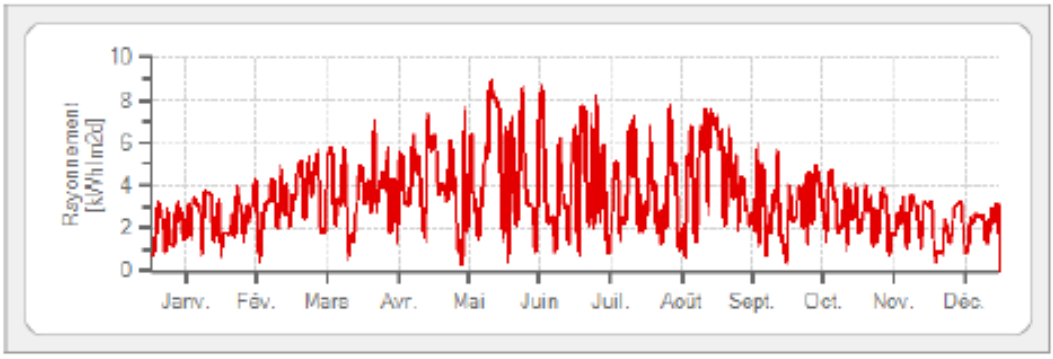


C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\Fig_ghdh4.png

C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\fig_tamima4.png



C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\fig_tadaily4.png



C:\Program Files (x86)\Common Files\mn61\output\fig_ghdaily4.png