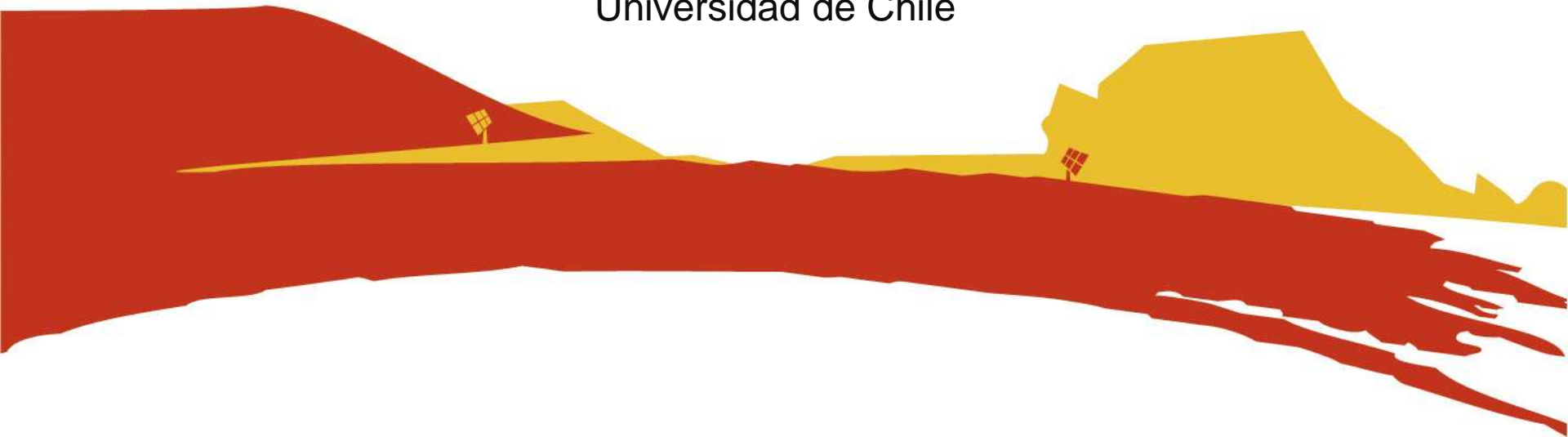




Energía Solar y Chile: Desafíos y Oportunidades

Prof. Roberto Román L.
Universidad de Chile



A modo de Presentación...

- **Roberto Román Latorre:** Profesor Asociado de la FCFM de la Universidad de Chile (más conocida como “la Escuela de Ingeniería”).
- **Ingeniero Civil Mecánico:** especialidad en termofluidos, máquinas térmicas, máquinas hidráulicas. Académico en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la U. de Chile.
- **Especialización en energías renovables:** con especial énfasis en energía solar. Más de 30 años de experiencia en el tema. Actualmente Director de *ISES* (International Solar Energy Society).
- **Formador de EcoMaipo:** como una manera de propender hacia nuevos modelos de desarrollo. En particular en el Cajón del Maipo (donde resido).

Temario:

Módulo 1: Recurso Solar e Introducción a la Conversión Solar.

Geometría Tierra-Sol; Influencia de Atmósfera; Datos de radiación solar; Métodos de conversión de la energía solar.

Módulo 2: Sistemas Solares y Retscreen. Conversión Termosolar; Conversión Directa; Introducción a Retscreen.

Módulo 3: Aplicación de Retscreen. Ejercicios de aplicación de Retscreen a un sistema de colectores solares térmicos; un sistema fotovoltaico fuera de red y un sistema FV conectado a red.

Módulo 1: Recurso Solar e Introducción a la Conversión Solar

Magnitud del recurso: en comparación con otras fuentes de energía.

Geometría Tierra-Sol: Influencia de estaciones y latitud en el recurso. Variación entre valores máximos y mínimos.

Excentricidad de órbita terrestre.

Influencia de la atmósfera: fenómenos de absorción, difusión y dispersión en la atmósfera. Efectos de nubosidad. Concepto de transparencia atmosférica.

Datos de radiación solar: fuentes de datos. Fuentes de mediciones. Fuentes de datos horarios. El año meteorológico típico. Validación de datos.

Métodos de conversión de energía solar: conversión térmica e influencia de radiación y temperatura. Conversión directa, conceptos básicos.

La magnitud del recurso:

La energía solar es de lejos el recurso energético de mayor magnitud del que se dispone en la tierra:

La cantidad de energía solar que absorbe la tierra en un año es muchísimo mayor que cualquier recurso de combustible fósil o el recurso nuclear (como Uranio convertible) disponible.

La energía solar que se absorbe en un par de horas por la tierra es mayor que todo lo que gasta la humanidad en un año.

Tiene, eso sí, algunos inconvenientes:

Es un recurso *difuso*. Es decir de magnitud relativamente baja, algunos centenares de Watts por metro cuadrado.

Además es un recurso *variable*. Esto significa que su magnitud varía según el lugar, hora del día, día del año y condiciones atmosféricas.

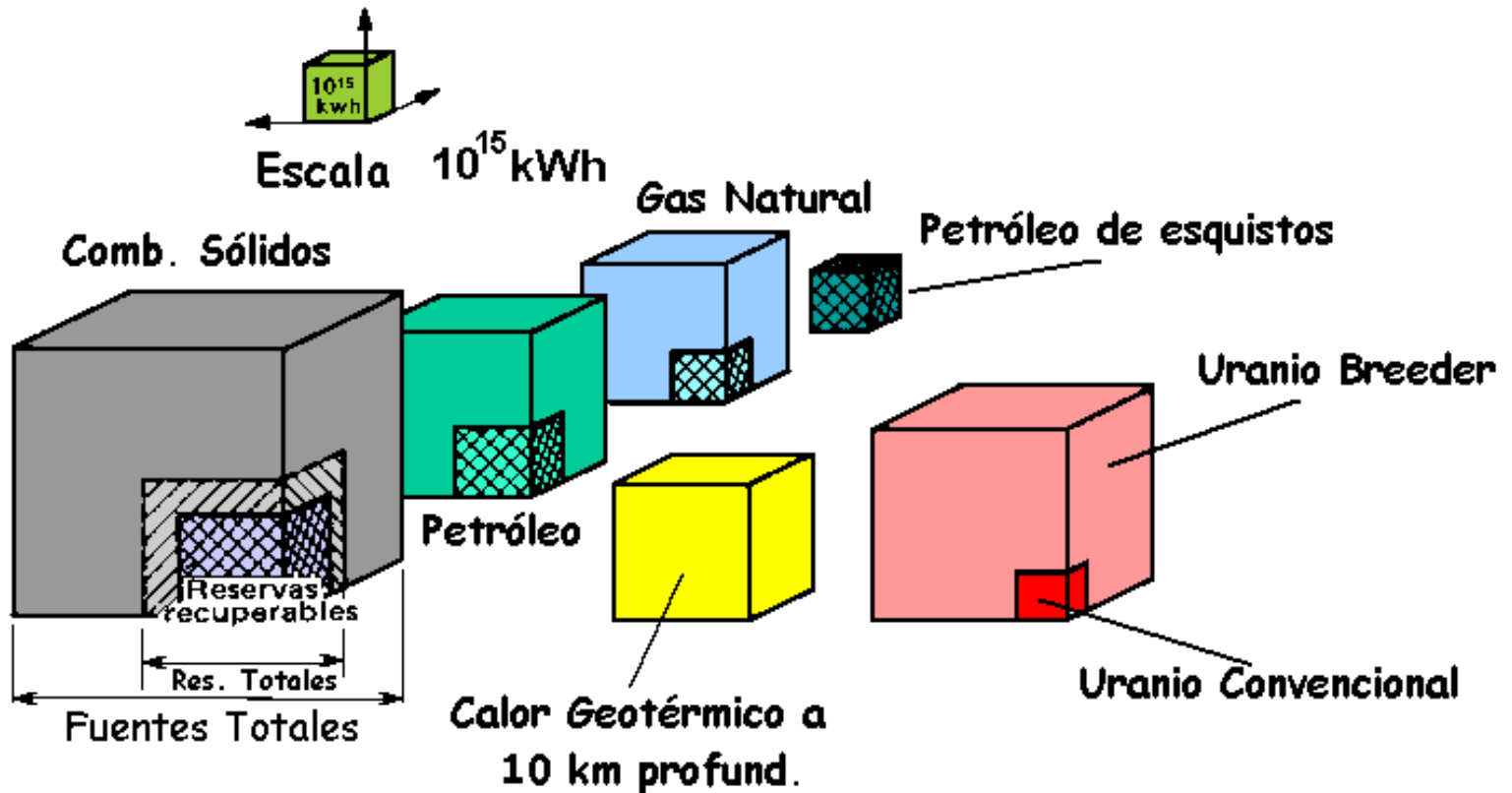
Por lo tanto, para aprovecharlo, es necesario cosecharlo y convertirlo..

Situación de Recursos no Renovables

Hoy día dependemos fundamentalmente de las fuentes no renovables de energía: petróleo, gas natural, energía nuclear.

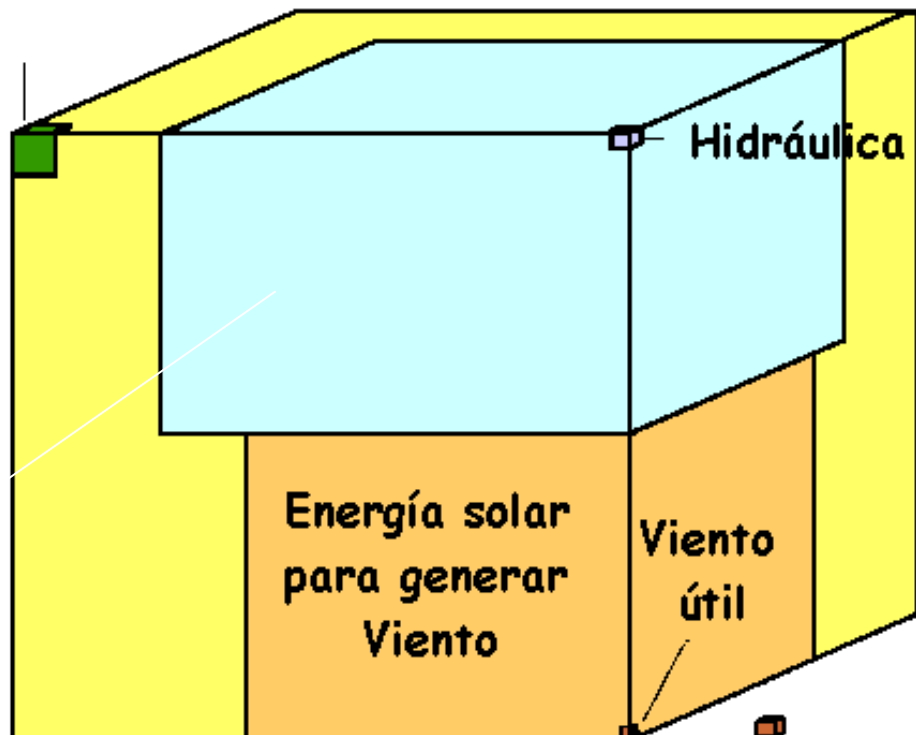
- Veamos órdenes de magnitud relativos de las reservas totales estimadas:
 - Carbón: $8,65 \times 10^{16}$ kWh
 - Petróleo: $2,14 \times 10^{16}$ kWh
 - Gas Natural: $12,3 \times 10^{16}$ kWh
 - Fisión Nuclear (LWR): $5,18 \times 10^{14}$ kWh
 - Fisión (breeder): $3,2 \times 10^{16}$ kWh

Panorama Energético Mundial



Comparación relativa entre fuentes no renovables

Energía Fotosíntesis



Evaporación solar agua

Energía solar para generar Viento

Viento útil

Geotérmica renovable

Consumo Aproximado año 2000

Consumo 1973

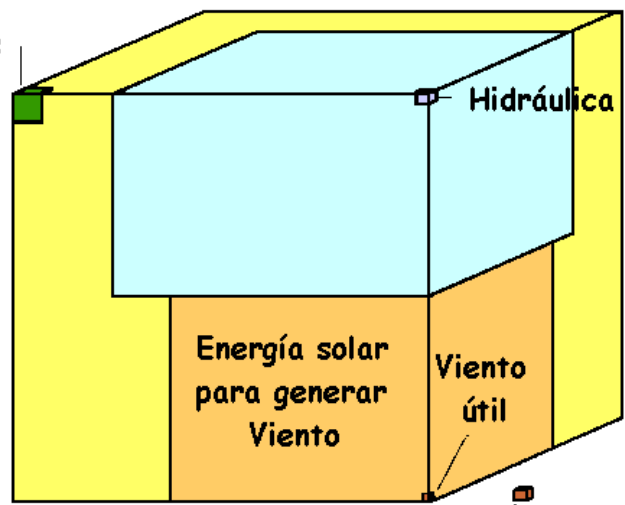
10¹⁵ kWh

Escala 10¹⁵ kWh

Energía Solar absorbida en la Tierra

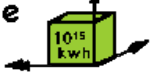
Comparación con fuentes renovables

Energía Fotosíntesis



Consumo Aproximado año 2000

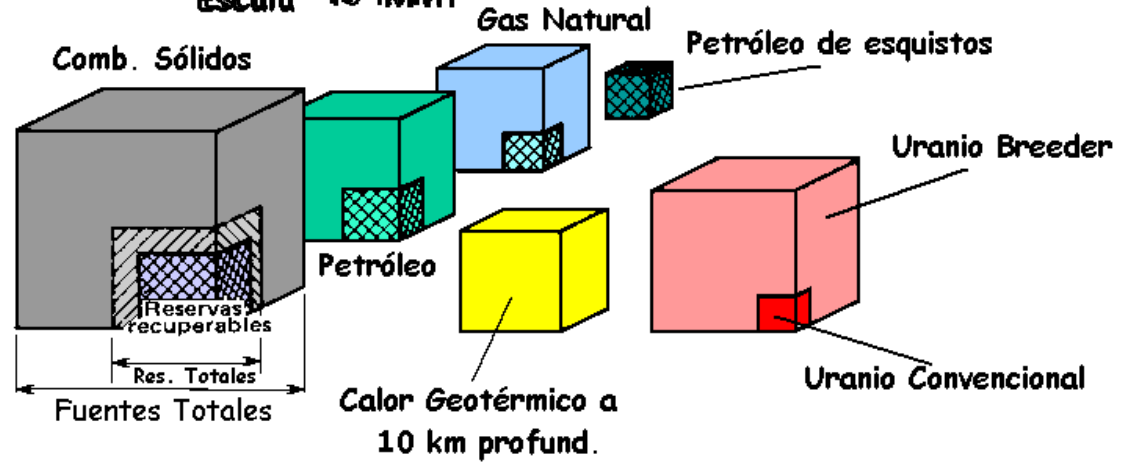
Consumo 1973



Energía Solar absorbida en la Tierra

Geotérmica renovable

Escala 10^{15} kWh



Comb. Sólidos

Gas Natural

Petróleo de esquistos

Uranio Breeder

Petróleo

Calor Geotérmico a 10 km profund.

Uranio Convencional

Reservas recuperables

Res. Totales

Fuentes Totales

Radiación:

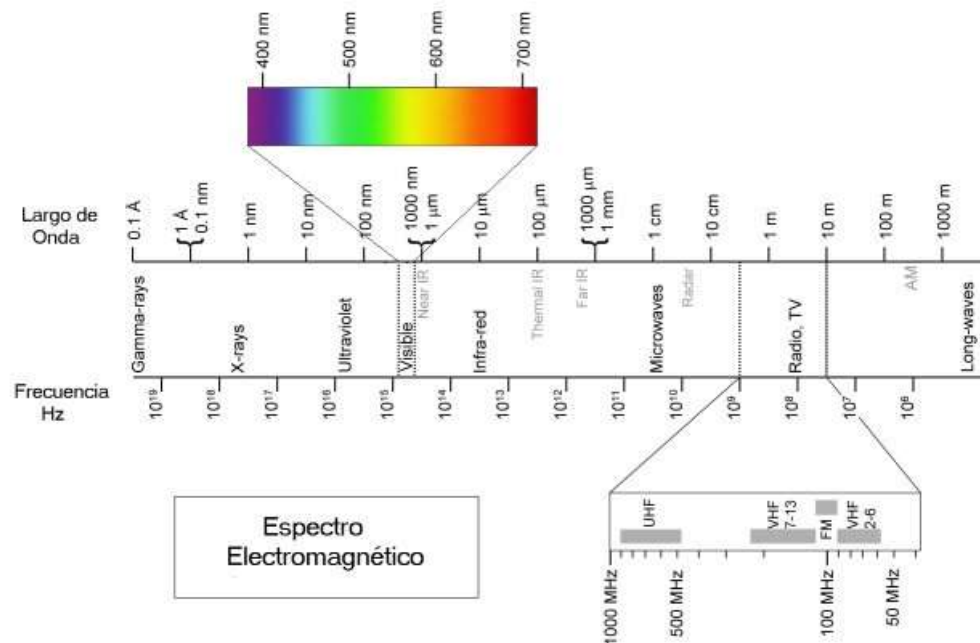
De los fenómenos de transferencia de calor, la radiación es uno de los menos conocidos por el común de las personas. Sin embargo su influencia es sumamente importante. En efecto, un ventanal mal orientado puede producir una ganancia térmica de cerca de 800 a 900 [W/m²], las pérdidas por radiación de sistemas mal aislados pueden ser varias centenas de Watts por metro cuadrado y la pérdida de energía hacia el espacio en el norte de Chile puede exceder los 250 [W/m²]. En este párrafo presentaremos los elementos más básicos relativos a la radiación. Siempre lo haremos en el contexto planteado en este curso.

- Naturaleza de la radiación y su magnitud.
- Cuerpo negro, cuerpo gris y ecuaciones básicas de radiación.
- Radiación solar, radiación térmica y radiación terrestre.

Naturaleza de Radiación:

A diferencia de la conducción y convección, la radiación no necesita un medio material para su transmisión. Su esencia es de *radiación electromagnética*, del todo similar a las ondas de radio o las ondas de luz.

La radiación electromagnética cubre un *espectro* que va de longitudes de onda muy cortas (centésimas de micrón o menos), hasta las longitudes de onda correspondientes a centenares de metros.



Naturaleza de Radiación:

Dentro de las posibles longitudes de onda de la radiación electromagnética, nos va a interesar en especial:

- El rango de la *radiación solar*. Esto por ser la radiación que llega del sol. Cubre longitudes de onda de 0,3 a 2,5 μm (micrones).
- El rango de la *radiación térmica*. Es decir la producida por cuerpos calientes. Esta cubre longitudes de onda típicamente de 2,5 a 80 μm o más.

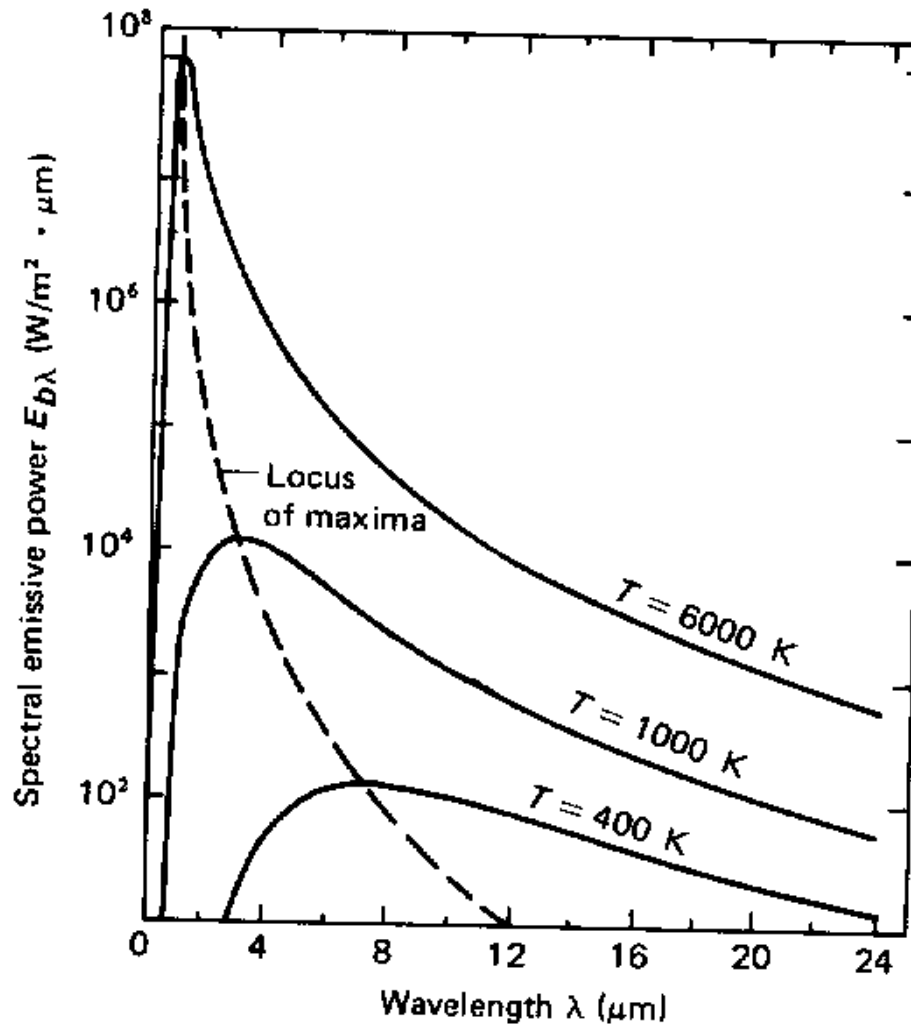
Ecuaciones Básicas de Radiación:

Lo primero que hay que tener presente es que *todo cuerpo que está a una temperatura mayor de 0°K, emite radiación electromagnética.*

La *cantidad* de energía emitida es función de la temperatura del cuerpo, de sus propiedades ópticas y de la llamada *Constante de Stefan Boltzmann.*

La energía emitida no es constante para cualquier longitud de onda. De hecho, la radiación se emite según un cierto *espectro*, cuya forma y magnitud varía de acuerdo a la temperatura del cuerpo.

Ecuaciones Básicas de Radiación:



Ecuaciones Básicas de Radiación:

Existe un cuerpo que es capaz de emitir o absorber el máximo de energía a cualquier longitud de onda. Se le conoce como *Cuerpo Negro*. Tiene la propiedad que:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} = 1$$

para todo λ

Además existe el cuerpo ópticamente *gris*. Este tiene la propiedad que:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} = Cte < 1$$

para todo λ

Ecuaciones Básicas de Radiación:

En realidad no existen ni cuerpos negros ni grises. Si bien la absorptividad varía a distintas longitudes de onda, ocurre que para ciertos *rangos* de longitudes de onda, un cuerpo real se puede asimilar a un cuerpo gris.

En primer lugar el intercambio radiativo entre dos cuerpos:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Con ε la emisividad del cuerpo y σ , la constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m²·K⁴)]

Ecuaciones Básicas de Radiación:

La *forma* y rango espectral que cubre la radiación emitida por un cuerpo gris está dada por las relaciones de *Wien*. Estas dicen que:

$$\lambda_M = \frac{2890}{T} [\mu m]$$

Es decir, la longitud de onda a la cual se produce máxima emisión energética de un cuerpo negro (o gris) es $2890/T$ [μm] de longitud de onda. Además se cumple que más del 95% de la energía emitida está en el rango de longitudes de onda λ_1 y λ_2 , tal que:

Ecuaciones Básicas de Radiación:

$$\lambda_1 = 0,5 \cdot \lambda_M$$

$$\lambda_2 = 8,0 \cdot \lambda_M$$

Estas relaciones nos permiten calcular en forma aproximada la cantidad de energía emitida por un cuerpo radiativo, además de la forma de su espectro de radiación.

Naturaleza de Radiación:

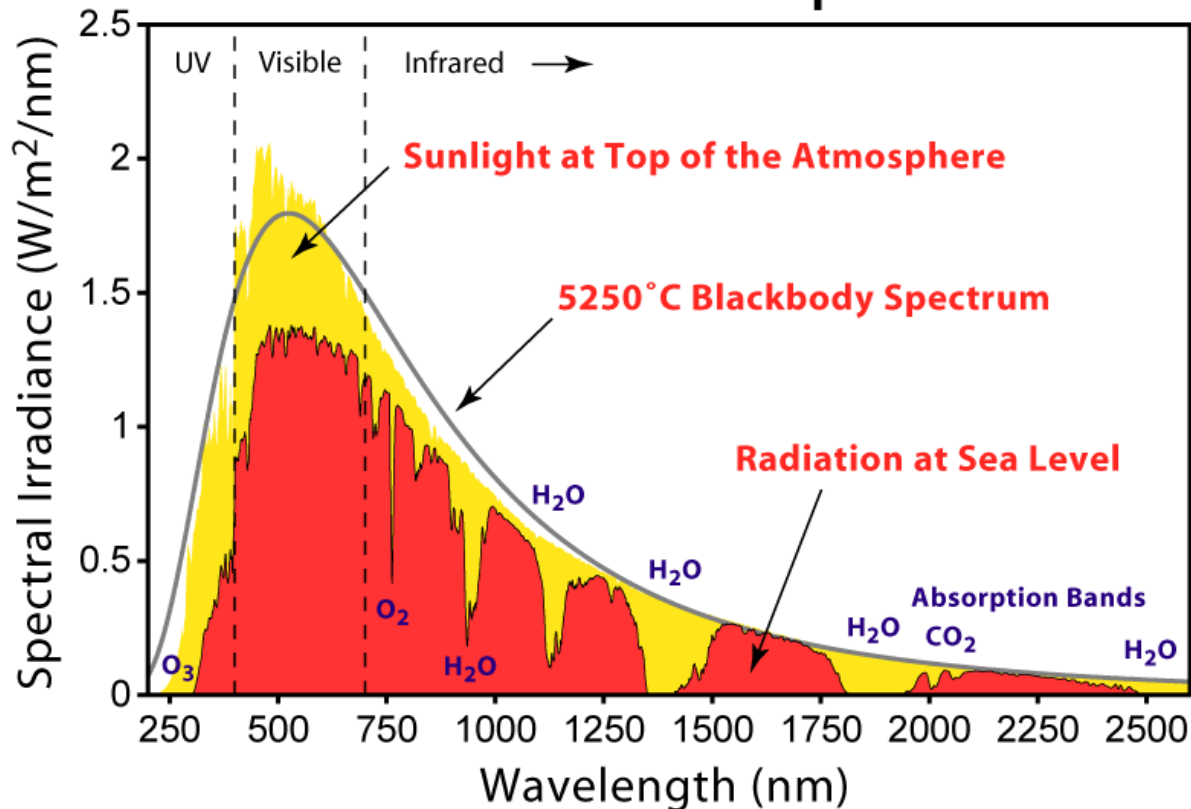
En la siguiente figura se ilustra el espectro solar extraterrestre y el espectro solar a nivel de mar.

De esta figura queda claro que, a nivel de la tierra, el espectro de radiación que llega del sol cubre un rango aproximado de 0,3 a 2,5 [μm] de longitud de onda. Además este espectro tiene fuertes bandas de absorción, producto del Ozono atmosférico, CO_2 y vapor de agua.

Para cuerpos que están a temperaturas en torno a la temperatura ambiente (290°K), su rango de emisión térmica está con un máximo en torno a los 10 [μm] y cubre un rango de 5 a 80 [μm] de longitud de onda.

Espectro Radiación Solar

Solar Radiation Spectrum



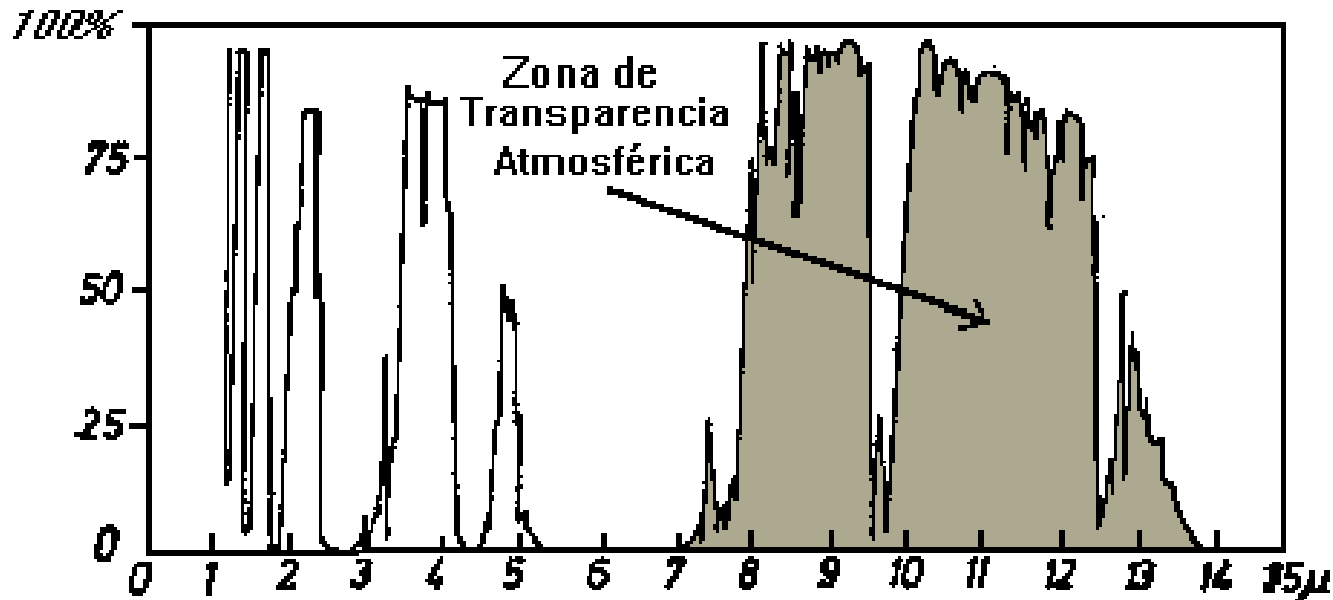
En la figura vemos el espectro de radiación solar fuera de la atmósfera y a nivel del mar. Se observa además el espectro de emisión de un cuerpo negro a 5250°C (5523K) y las bandas de absorción.

Naturaleza de Radiación:

La *potencia* emitida también crece rápidamente con la temperatura. A temperaturas en torno a los 100°C un cuerpo emite del orden de 1 [kW/m²].

Naturalmente la *tierra* también emite radiación hacia el espacio. Una parte significativa de esta radiación se pierde por medio de una *ventana de transparencia atmosférica* que existe entre los 8 y 14 [μm] de longitud de onda. El CO₂ y vapor de agua tienden a cerrar esta ventana, de allí el peligro del efecto invernadero y calentamiento global.

Naturaleza de Radiación:



Esta “ventana” de transparencia atmosférica explica rocío, escarcha y heladas. Es básica para balance térmico de tierra.

Pregunta fundamental:

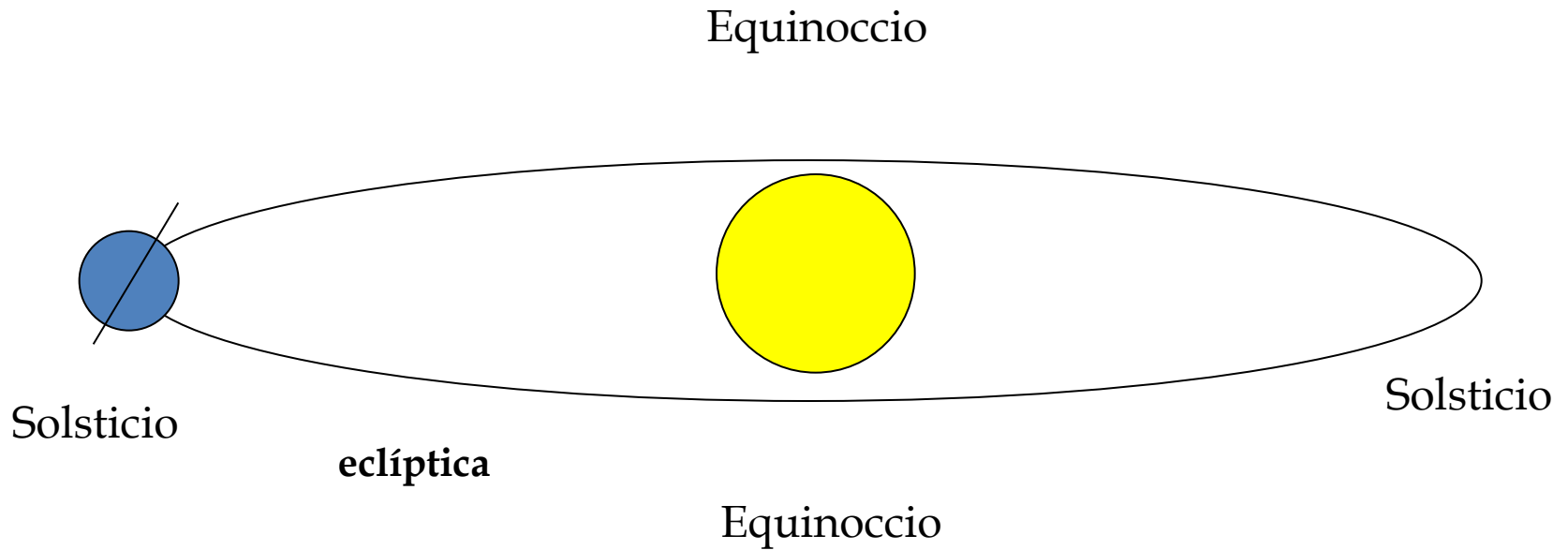
En que influye la geometría tierra-sol con respecto a la performance de sistemas solares:

- **Cantidad de energía captada:** la misma es variable según el lugar, fecha y hora del día.
- **Ubicación captor:** lo que se aprovecha es función de inclinación y azimut del captor. Por supuesto si el mismo es fijo o tiene movimiento.
- **Problema de sombras:** cuando hay varias hileras o un objeto que pueda proyectar sombras, entender bien la geometría ayuda a resolver este problema.
- **Las ventanas:** las mismas son en verdad captores. Entender la geometría ayuda a definir ubicación de ventanas y aleros.

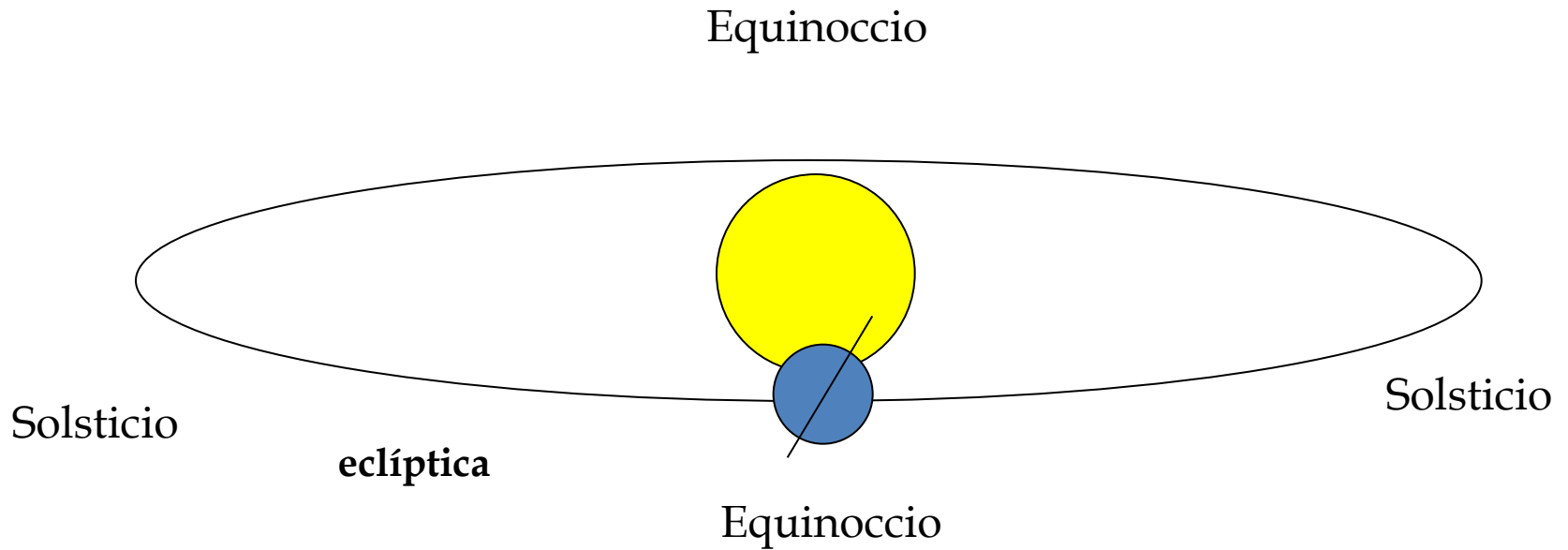
Radiación Solar y Ganancias Térmicas

Vamos a realizar un rápido repaso de los movimientos de la tierra en torno al sol y como esto afecta la ganancia solar.

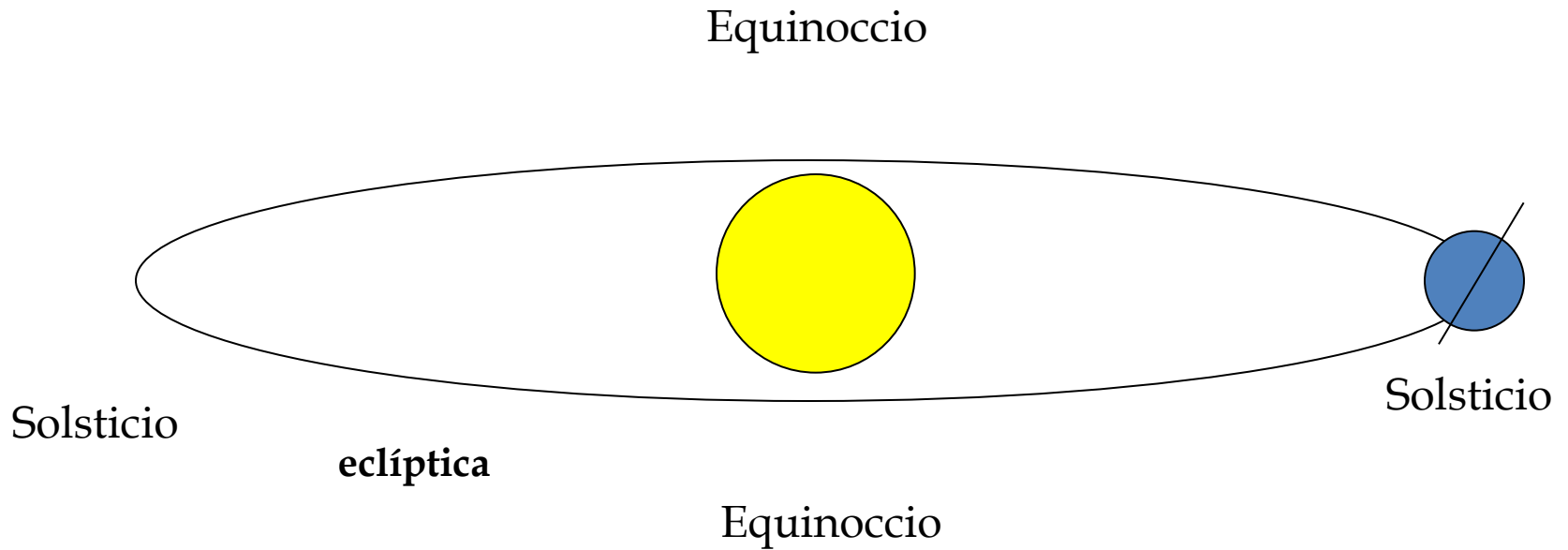
Trayectoria Tierra en torno al sol



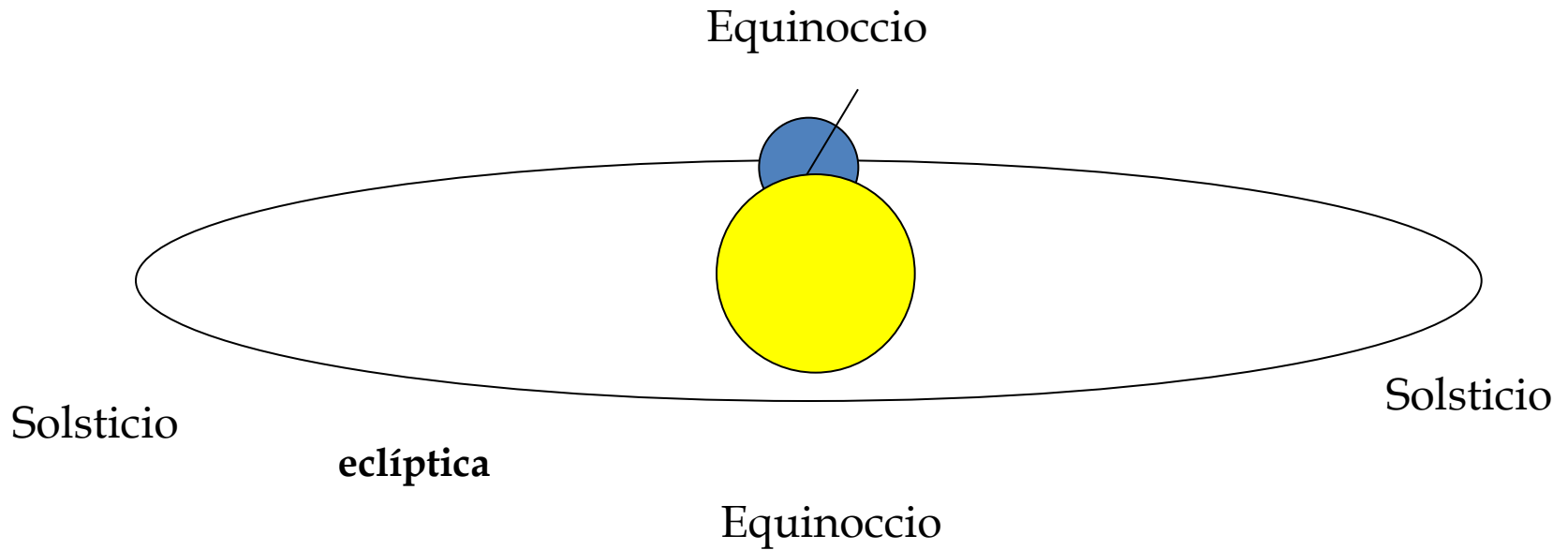
Trayectoria Tierra



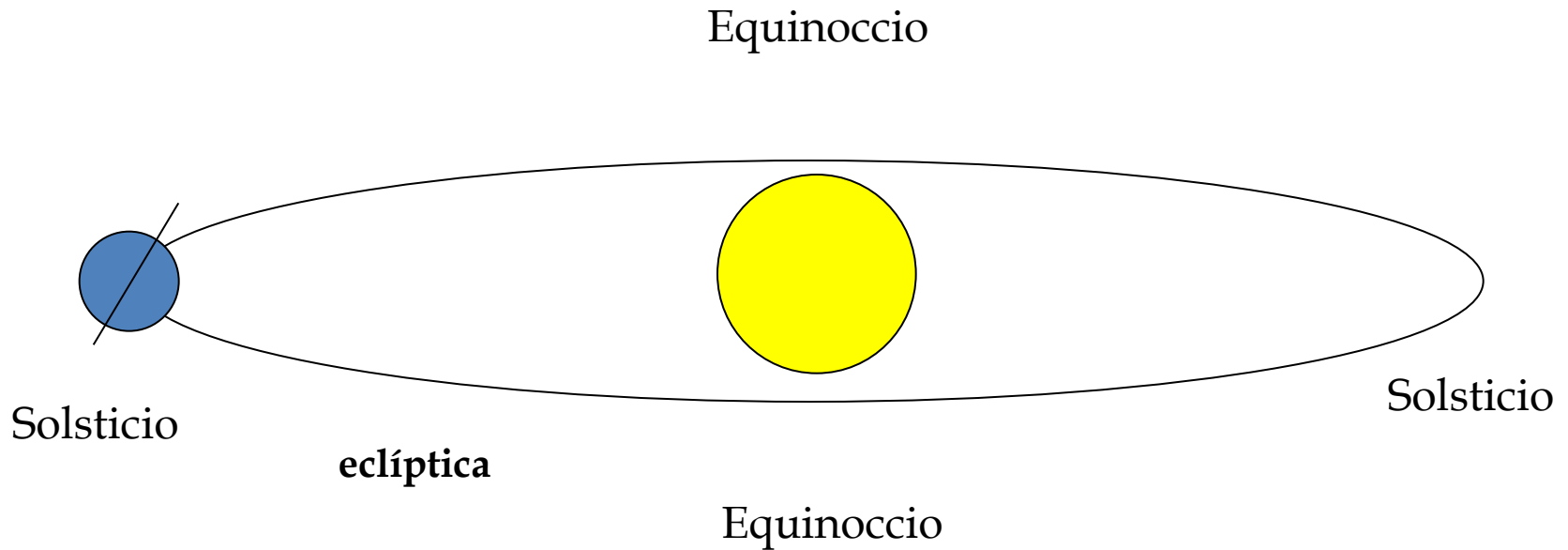
Trayectoria Tierra



Trayectoria Tierra

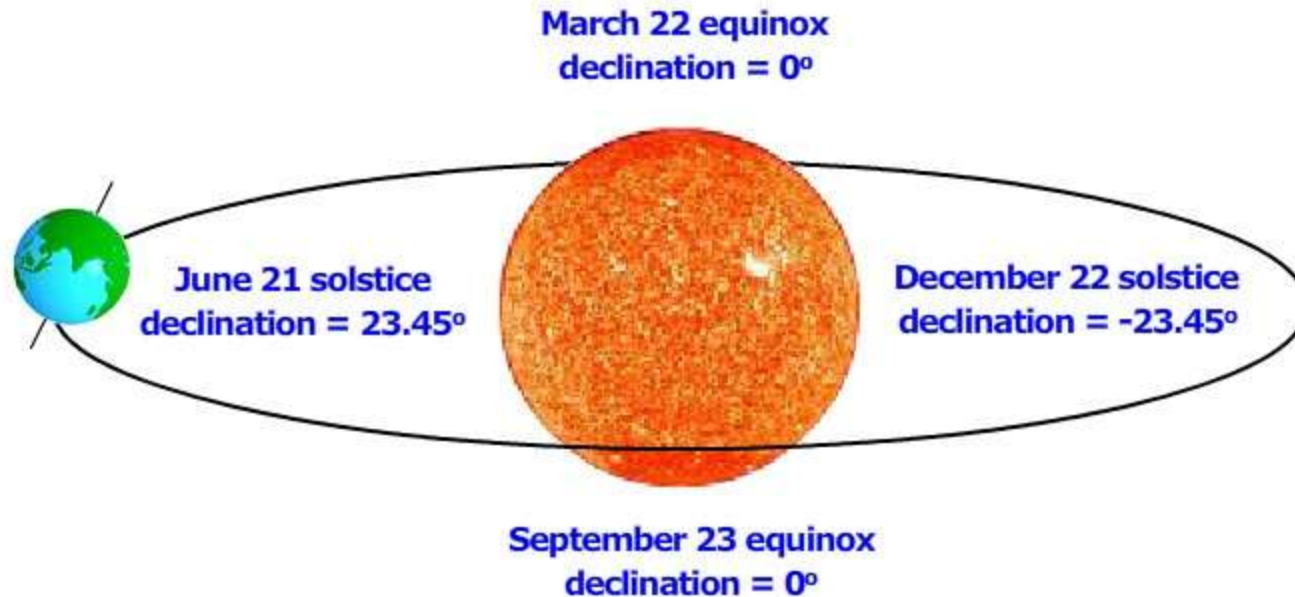


Trayectoria Tierra



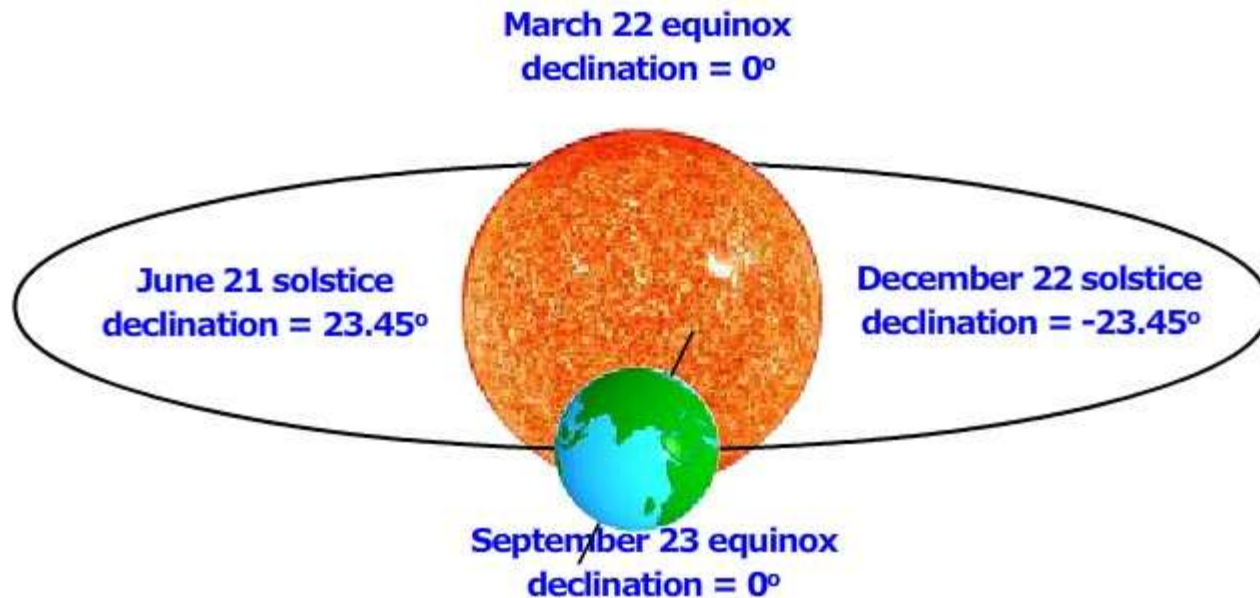
La órbita terrestre en torno al sol demora
365,24 días aproximadamente.

Trayectoria Tierra



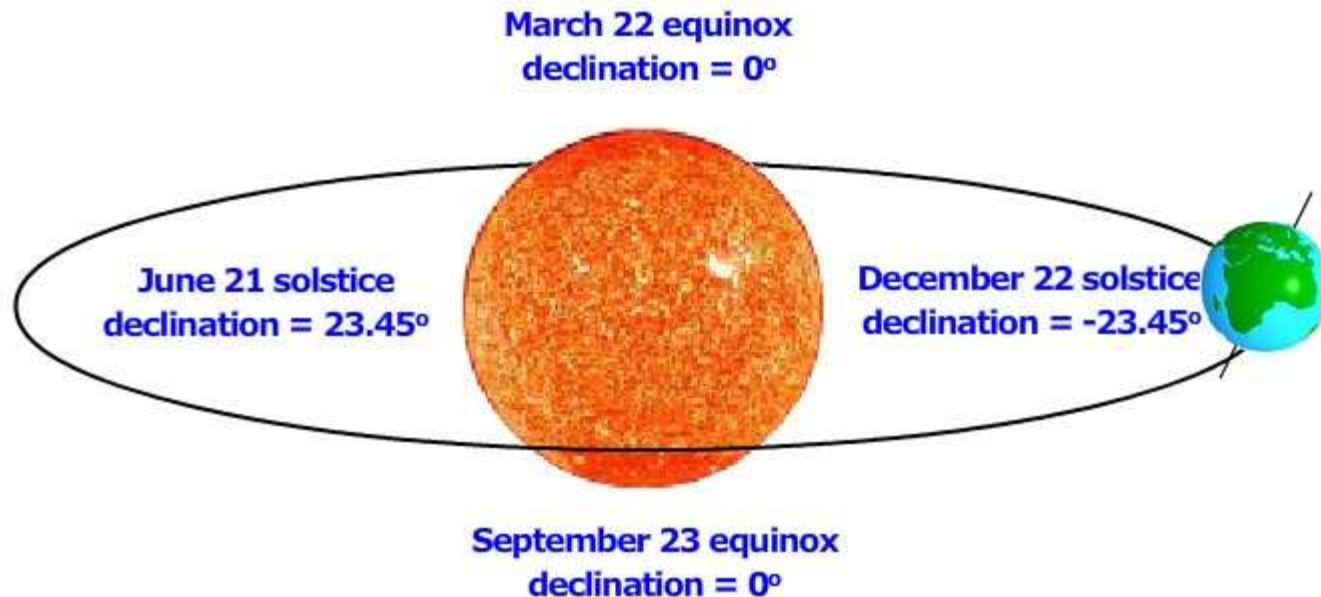
En el solsticio, el eje terrestre apunta al sol. Es el instante de los días más largos o cortos para una localidad. La **declinación** solar es máxima.

Trayectoria Tierra



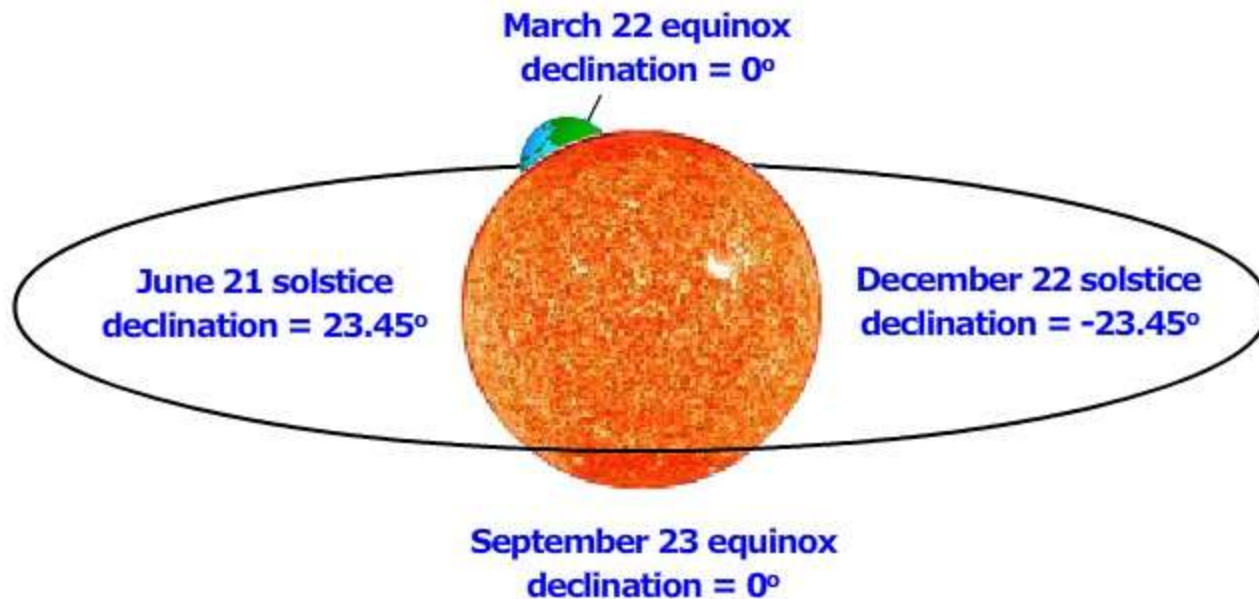
En el **equinoccio** el eje terrestre está en el plano de luz y sombra. El día dura lo mismo que la noche en toda la tierra. La **declinación** solar es de 0°

Trayectoria Tierra



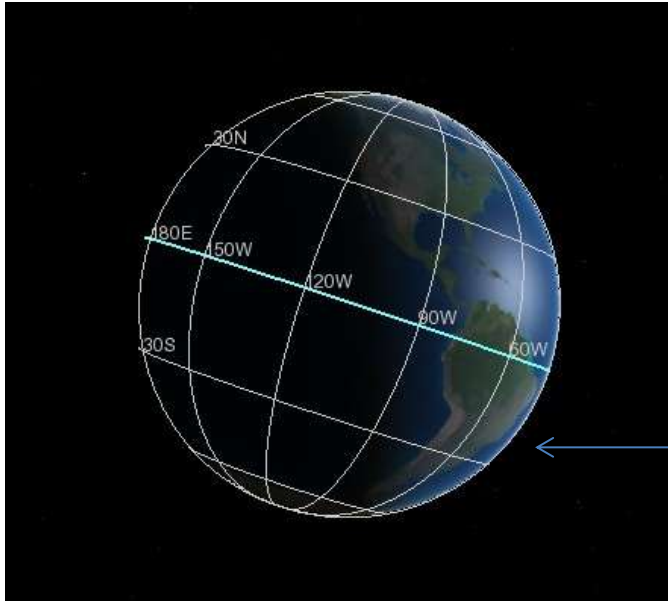
Para el **solsticio** del 22 de diciembre ocurre el día más largo en el hemisferio sur y el más corto en el norte. La **declinación** del sol es $-23,45^\circ$

Trayectoria Tierra



Los **equinoccios** definen el tránsito de verano a otoño o de invierno a primavera.

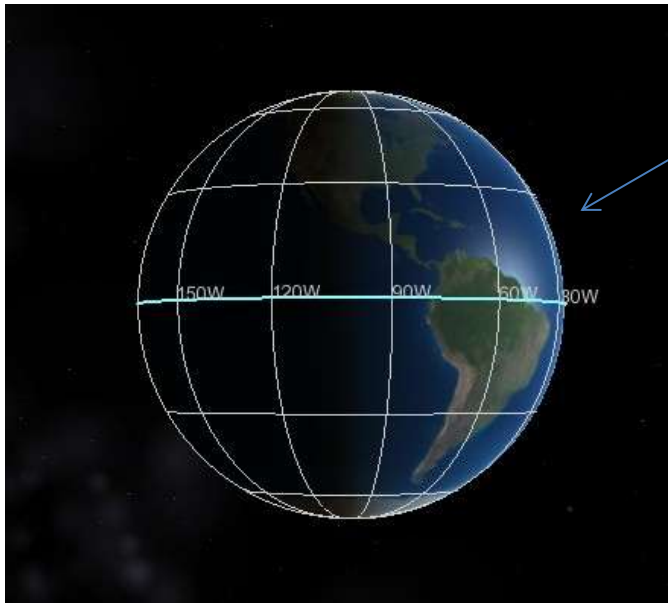
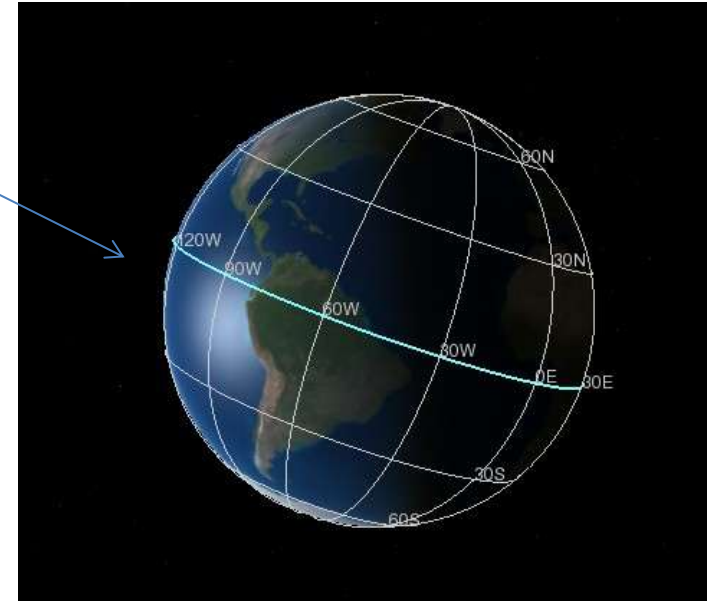
Vistas de la Tierra renderizadas con Celestia



21 Dic



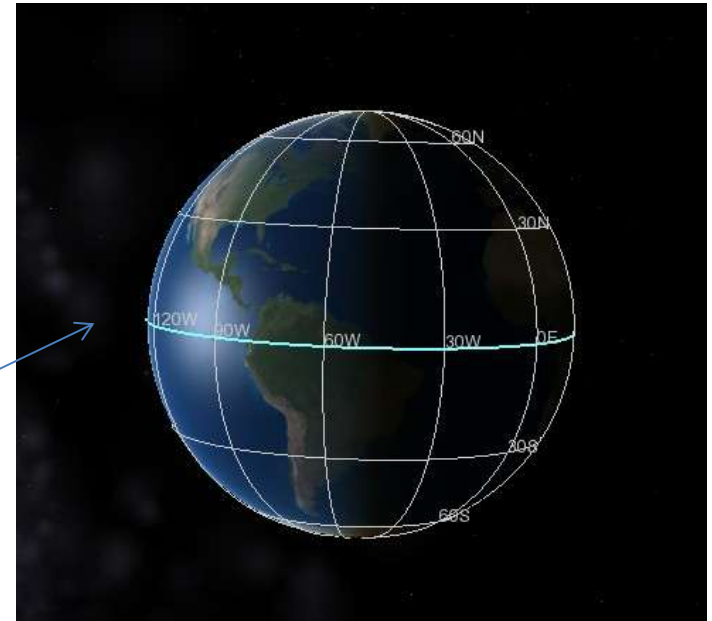
21 Jun



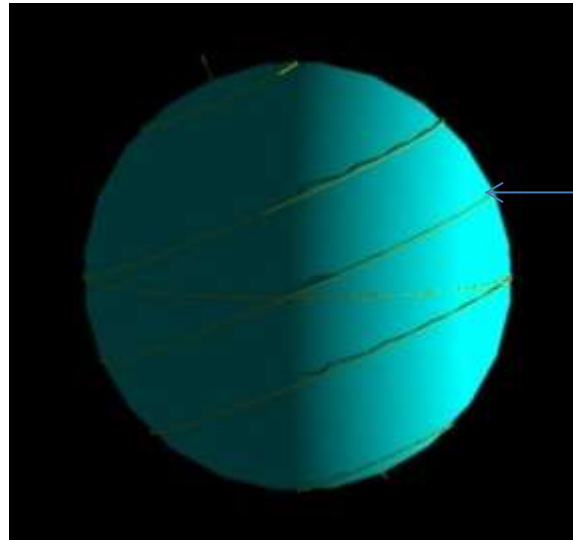
21 Sep



21 Sep



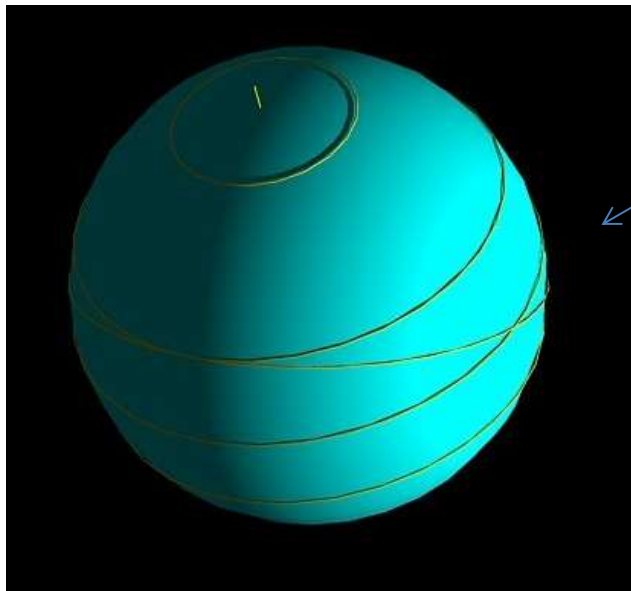
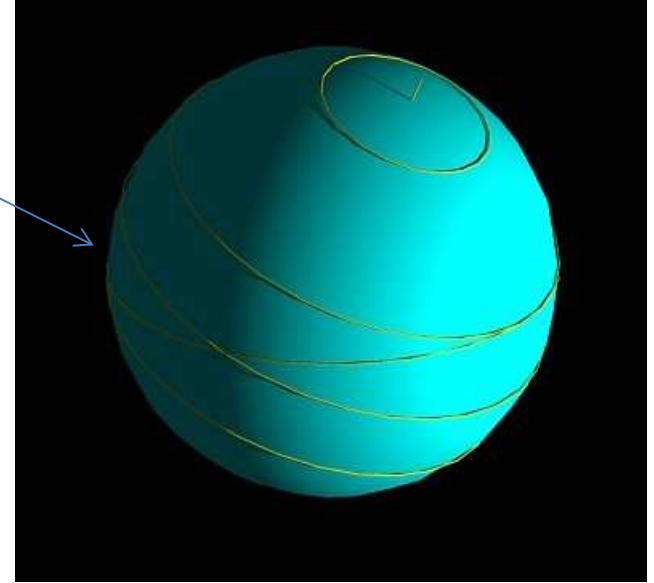
Vistas de la Tierra renderizadas con ACAD



21 Jun
Ecuador

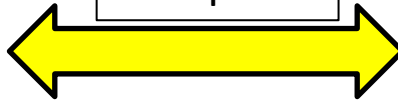


21 Dic

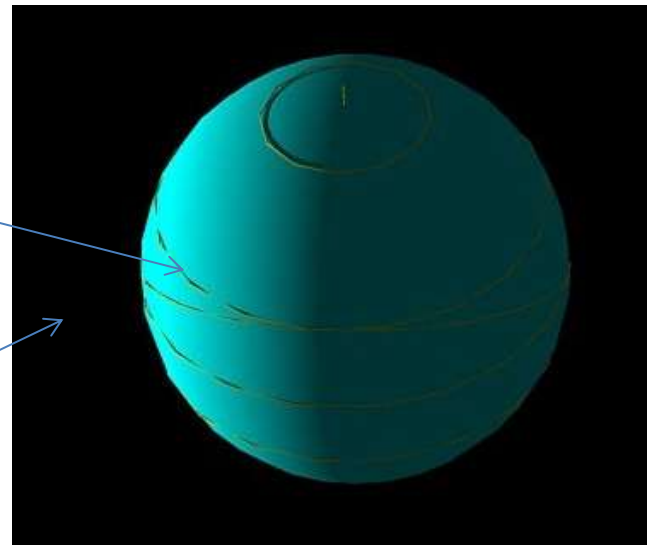


21 Mar

Trópico



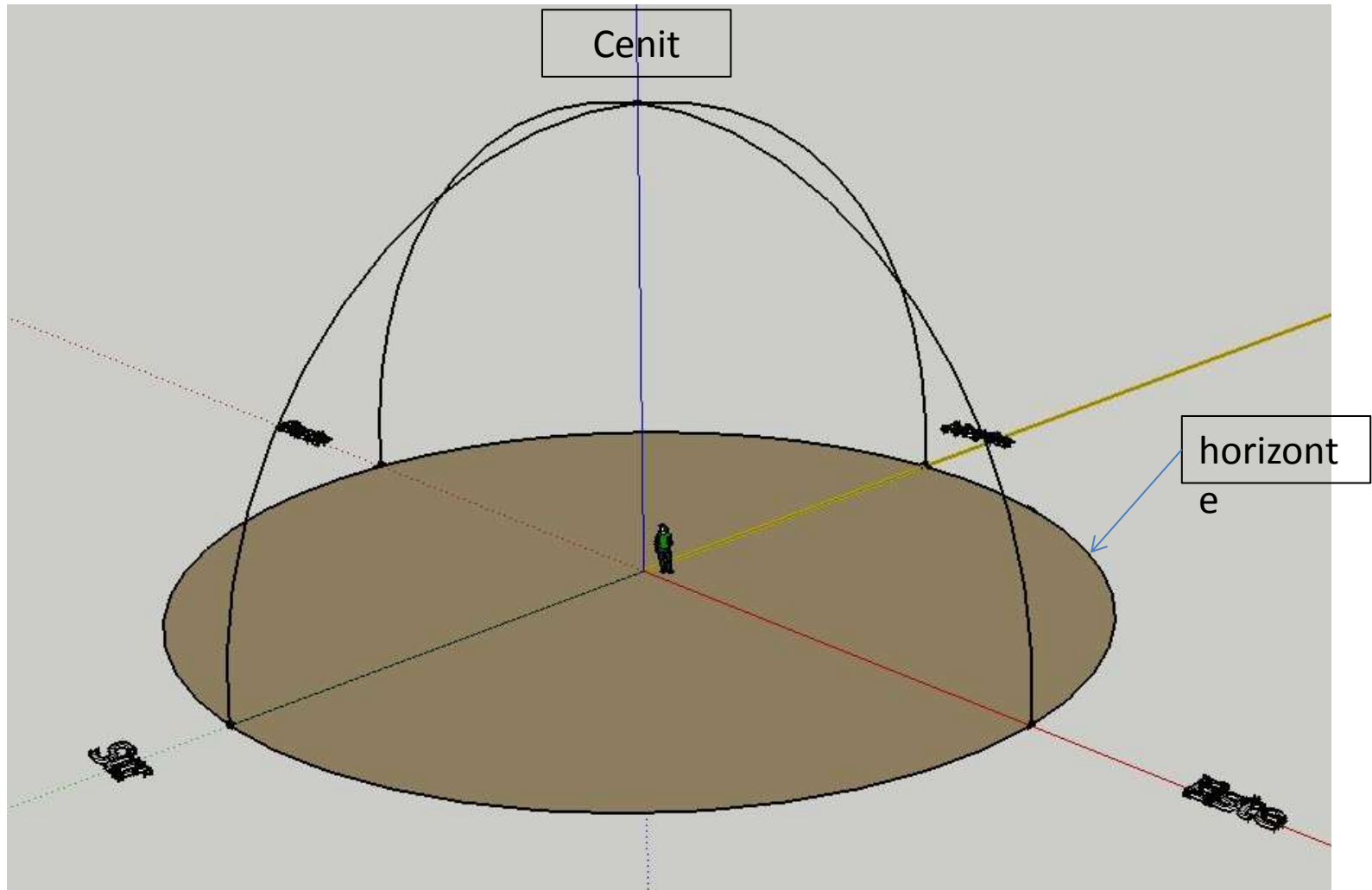
21 Sep



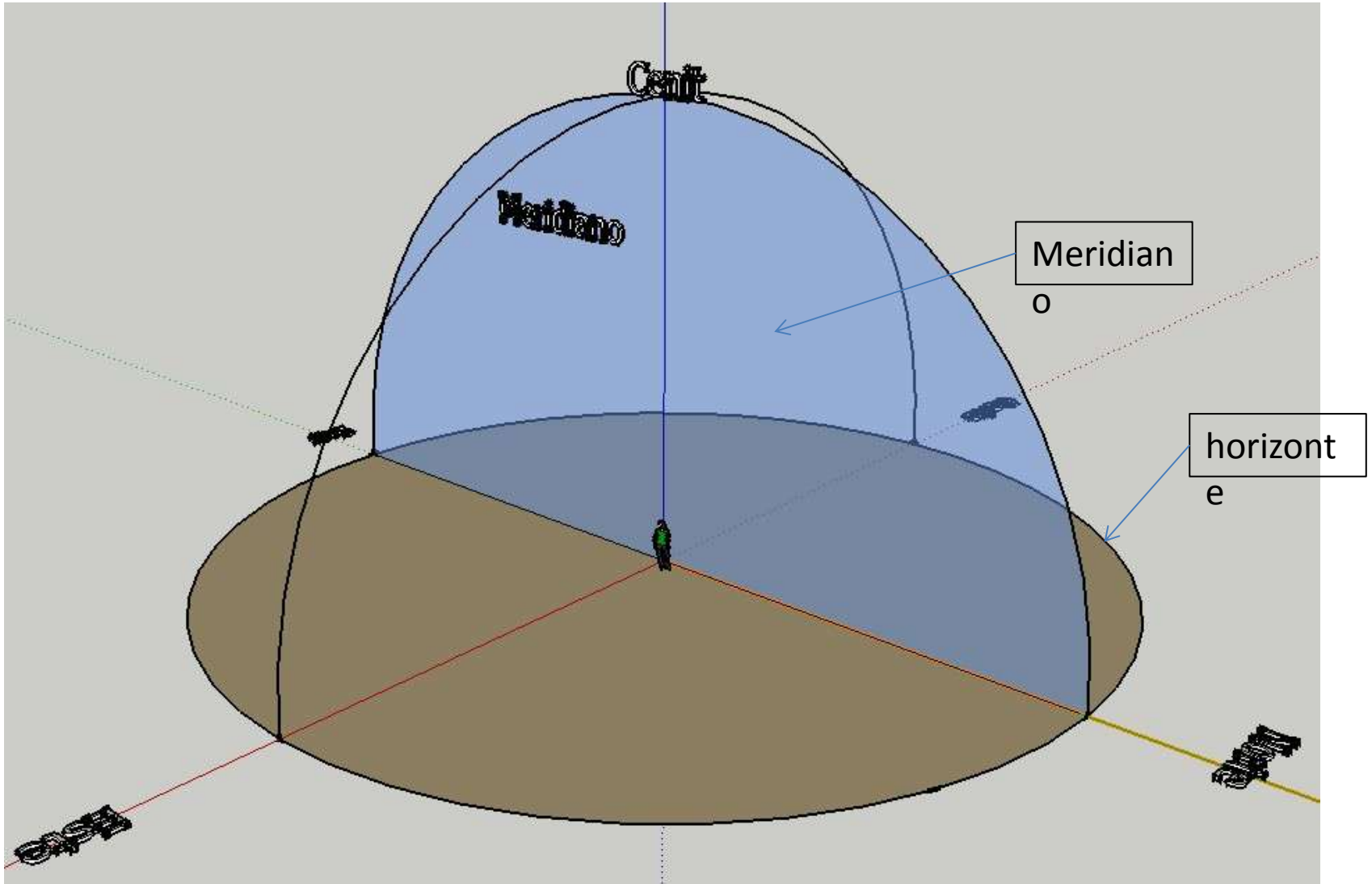
Definiciones Básicas

- La **bóveda celeste** es una esfera imaginaria de diámetro infinito cuyo centro se ubica donde está el observador. El plano horizontal está limitado por el **horizonte**. En este plano quedan definidas las direcciones cardinales: norte, sur, este y oeste.
- El **meridiano** del lugar es un plano ficticio que es perpendicular a la horizontal y que una la dirección norte-sur.
- El **ecuador celeste** es la proyección del ecuador terrestre sobre la bóveda celeste. Si llamamos ϕ la latitud, el ángulo entre el ecuador celeste y la horizontal es $90^\circ - \phi$. Además intersecta la horizontal justo en la dirección este-oeste.
- Se llama **declinación solar** la distancia angular que tiene el sol por sobre o debajo del **ecuador celeste**. Varía desde un máximo de $+23,45^\circ$ en Junio a $-23,45^\circ$ en Diciembre. Es igual a 0° en los equinoccios. Se designa con la letra griega δ .

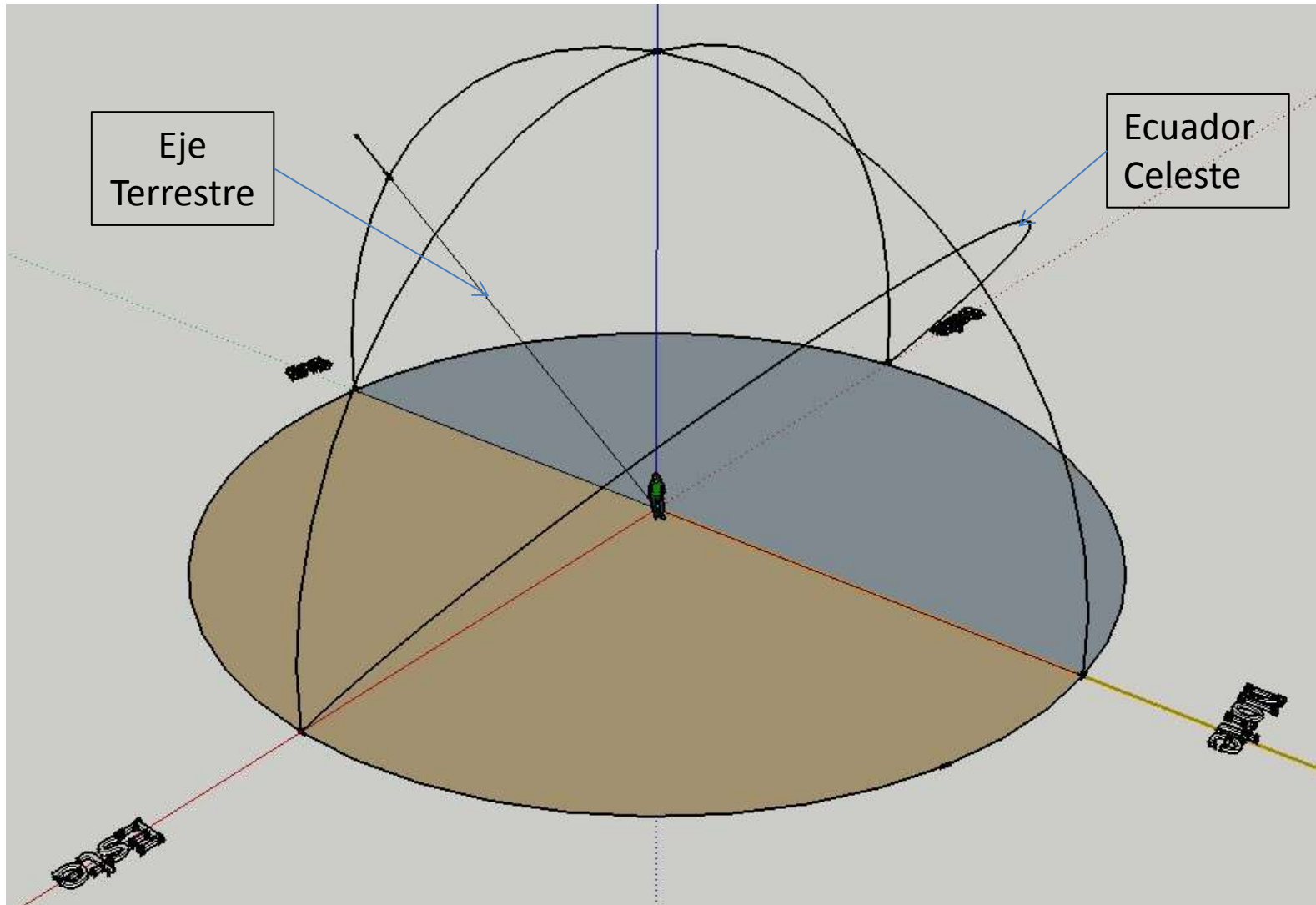
Bóveda Celeste:



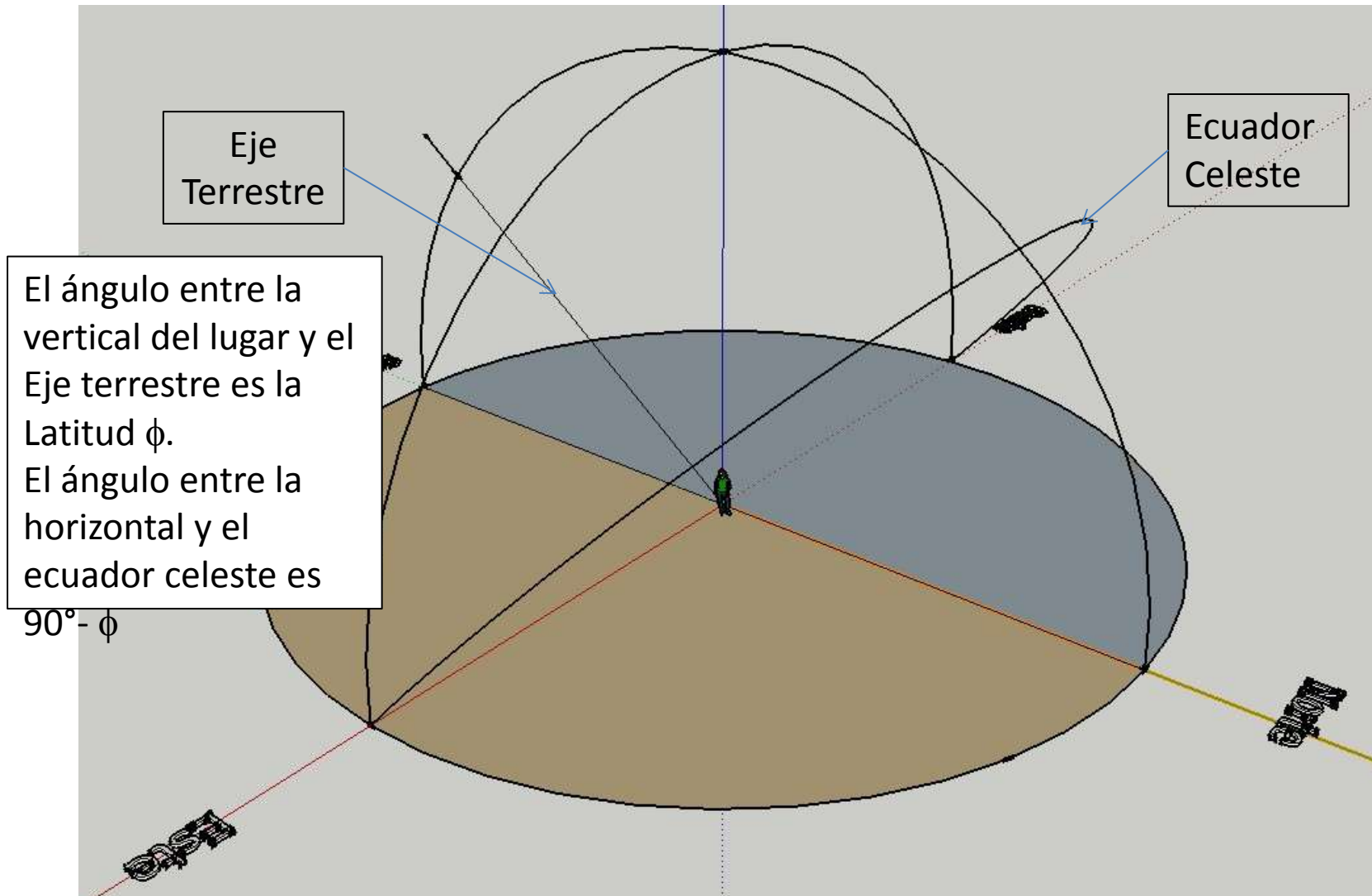
Meridiano del lugar:



Ecuador Celeste:



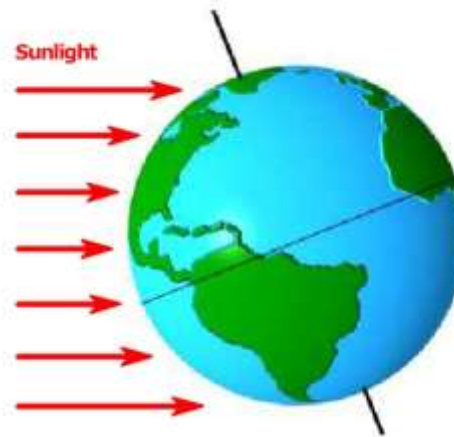
Ecuador Celeste:



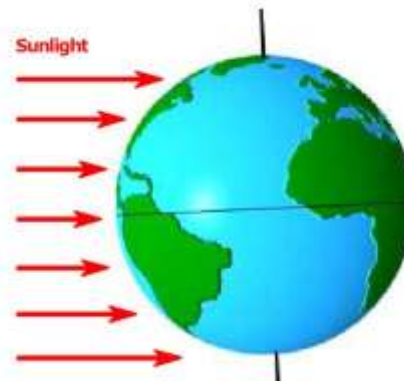
Declinación solar:

El sol se ve más alto o bajo sobre el horizonte según la época del año. Esto se debe al movimiento de la tierra en torno al sol.

En la siguiente secuencia de figuras vemos la posición relativa de rayos solares y la superficie terrestre para distintas épocas del año.



Posición relativa de la tierra y rayos solares el Solsticio de verano en el norte y de invierno en el sur

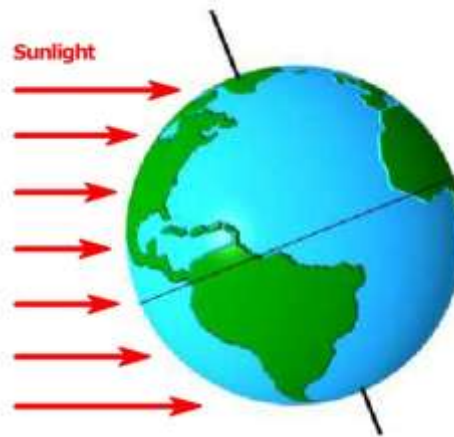


Posición relativa de la tierra y rayos solares en los Equinoccios

Declinación solar:

Mientras más nos acercamos a los Polos, los rayos solares forman mayor ángulo con respecto a la vertical local y por lo tanto la energía incidente es menor.

En cambio cerca del ecuador la variación angular es menor.

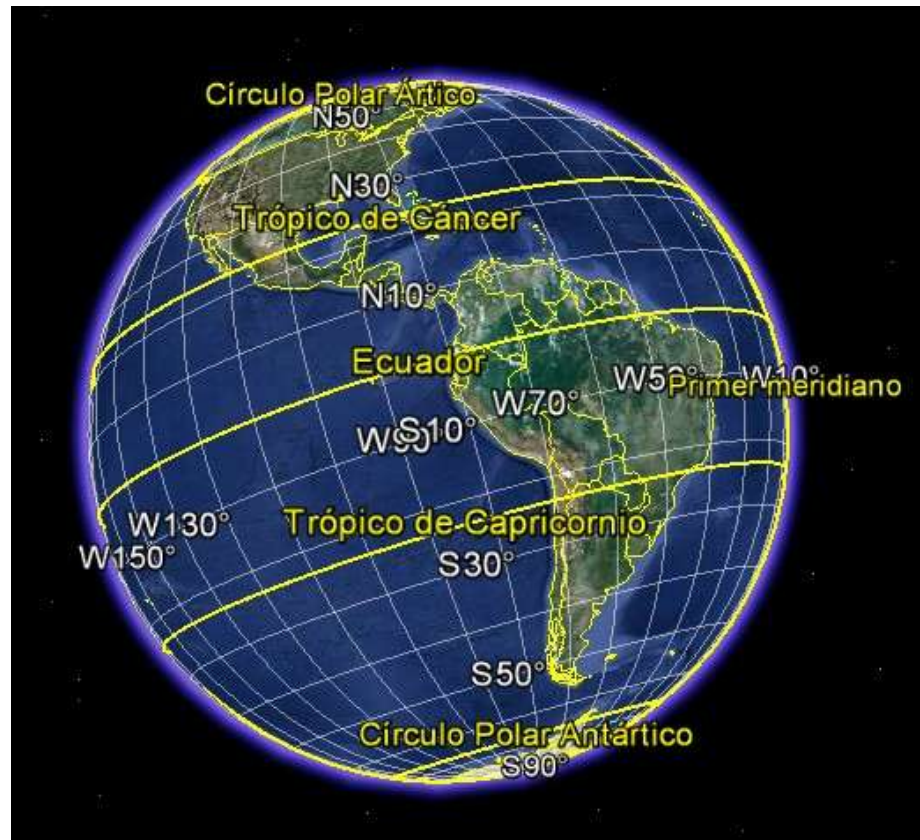


Posición relativa de la tierra y rayos solares el Solsticio de verano en el norte y de invierno en el sur



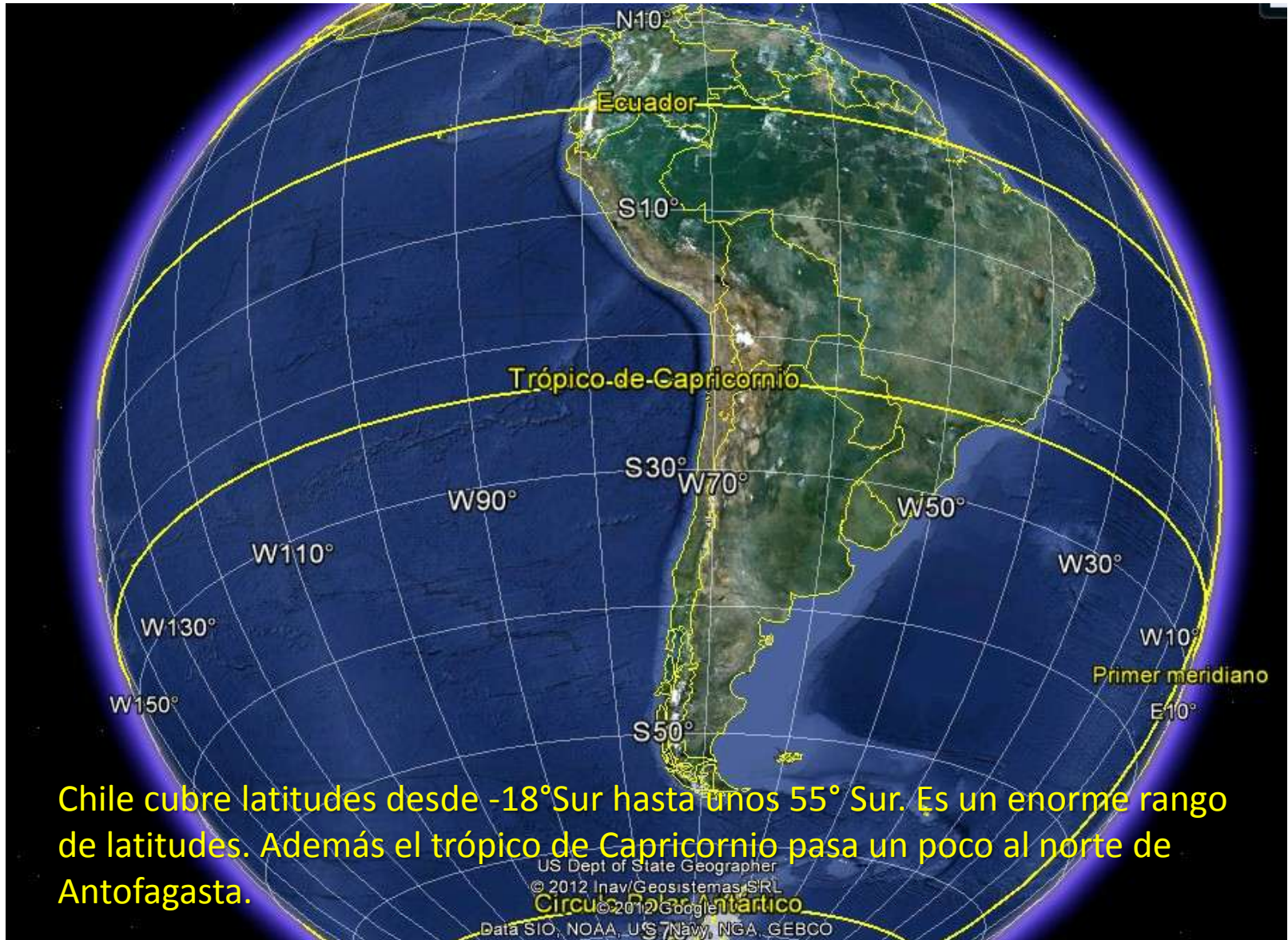
Posición relativa de la tierra y rayos solares el Solsticio de verano en el sur y de invierno en el norte

Puntos notables en la tierra:



Además del Ecuador están definidos los dos **Trópicos** (Cáncer y Capricornio). Entre los **trópicos** el sol pasa por la vertical en algún momento. Además en la zona sur están los **círculos polares**. A latitudes mayores que las del círculo polar, se tiene al menos 1 día en que no se pone el sol o 1 día en que no aparece. La mayor parte de la energía solar cae sobre la tierra a latitudes de $\pm 30^\circ$

Caso de Chile:

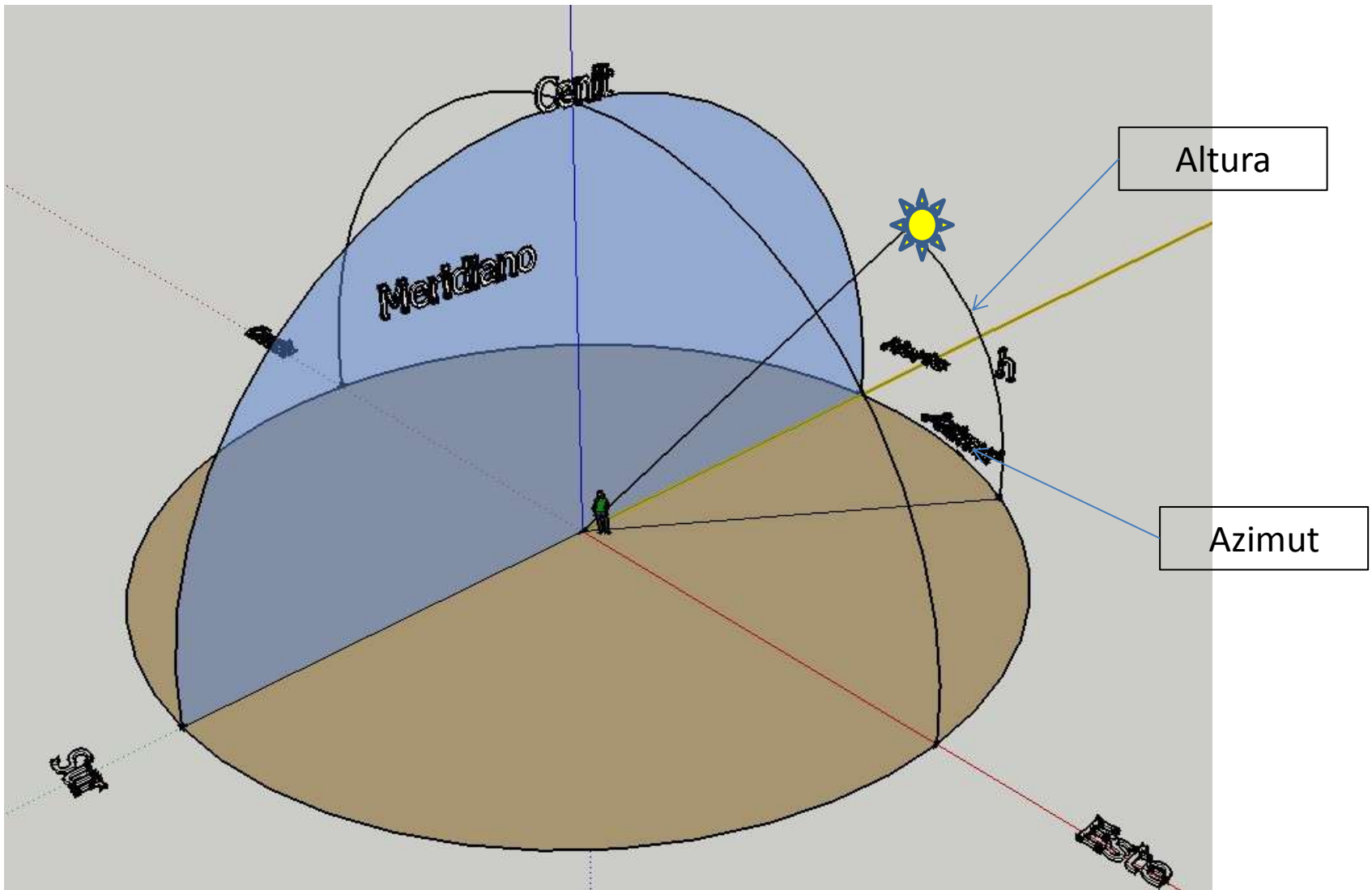


Coordenadas horizontales y ecuatoriales:

Para describir la posición del sol sobre la bóveda celeste se utilizan **dos** sistemas de coordenadas:

- Las coordenadas **horizontales**, que son locales (dependen del lugar. La posición del sol se describe con la **altura** (h) y el **Azimut** (Az).
- Las coordenadas **ecuatoriales**, que son independientes de la latitud y describen la posición del sol con la **declinación** (δ) y el **ángulo horario** (AH).
- Por supuesto las mismas coordenadas se pueden usar para describir la posición de un punto *cualquiera* sobre la bóveda celeste.

Coordenadas horizontales:

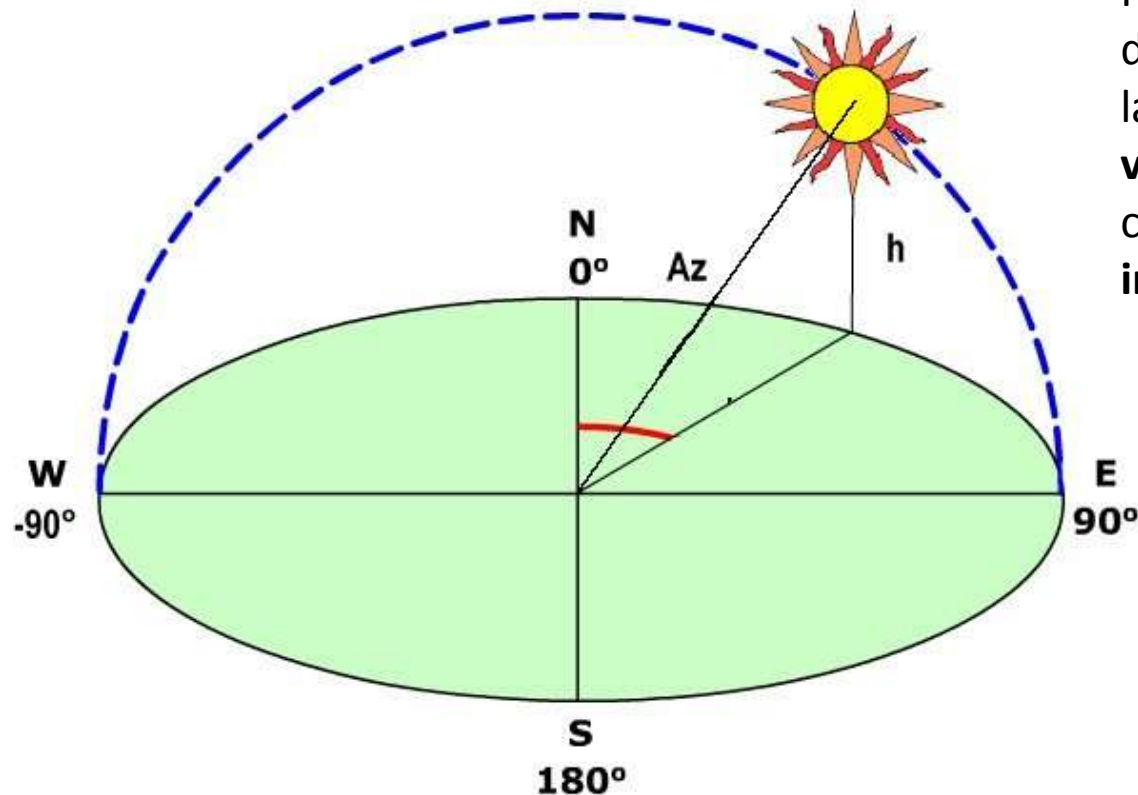


Coordenadas horizontales:

La altura y azimut varían a lo largo del día. Usaremos la siguiente convención:

- La altura (h) varía de 0 a 90° . Cuando el objeto está en el horizonte, la altura es 0° y cuando está en la vertical la altura es de 90°
- El Azimut (Az) varía en $\pm 180^\circ$. Azimut 0° significa que uno apunta hacia el Ecuador (depende del hemisferio donde se está), Azimut 180° es hacia el Polo. Azimut -90° hacia el Este y Azimut $+90^\circ$ hacia el Oeste.
- En otra literatura uno puede ver otras convenciones.

Coordenadas horizontales



Por ello los días son más largos en **verano** y más cortos en **invierno**.

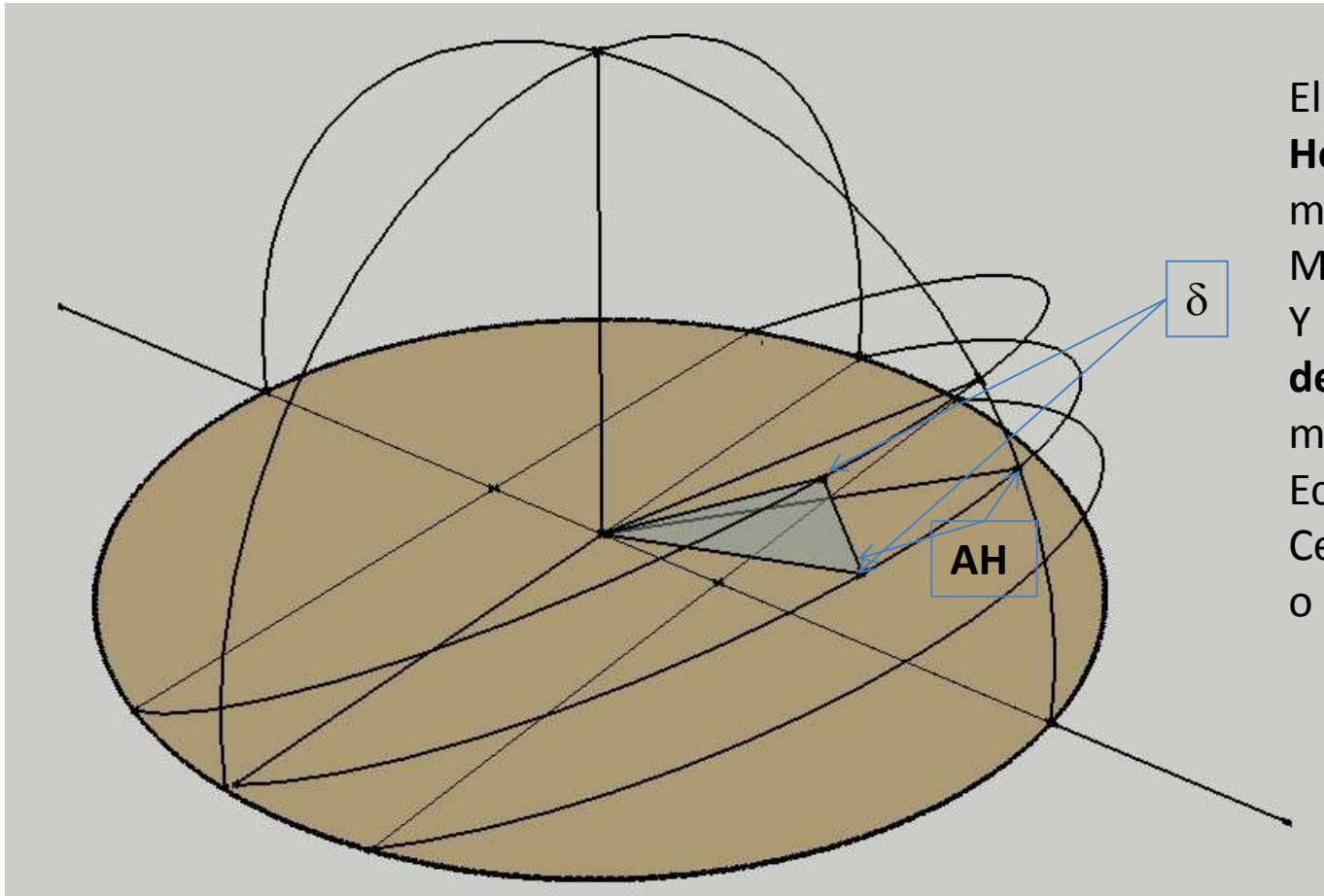
En el **verano** el sol sale al **sur** de la dirección Este y se pone al **sur** de la dirección Oeste. En **invierno** el sol sale al **norte** de la dirección este y se pone al **norte** de la dirección oeste.

Coordenadas Ecuatoriales:

En este caso se usan las siguientes coordenadas:

- La *declinación* (δ) (del sol) varía entre $\pm 23,45^\circ$. Cuando el objeto está sobre el ecuador celeste, la *declinación* es 0° . En los *solsticios* se alcanza la máxima declinación del sol; de $+23,45^\circ$ en Junio y de $-23,45^\circ$ en Diciembre.
- La segunda coordenada es el *Ángulo Horario* (*AH*) varía en $\pm 180^\circ$. Ángulo Horario 0° significa que el sol está sobre el *Meridiano*. Ángulo Horario de -90° significa que son 6 horas antes del mediodía solar. Como el sol aparentemente gira en torno a la tierra una vez cada 24 horas, esto implica que varía 15° por hora.
- Obviamente se pueden usar las mismas coordenadas para describir la posición de otro objeto que no sea el sol.

Coordenadas Ecuatoriales



El **Ángulo Horario** se mide desde el Meridiano. Y la **declinación** se mide desde el Ecuador Celeste sobre o bajo él.

Recordar que al **mediodía solar** el **Ángulo Horario** es 0° . A la medianoche solar el **Ángulo horario** es 180° . El **Ángulo Horario** varía 15° /hora.

Relación entre coordenadas:

Se cumplen las siguientes relaciones entre coordenadas:

$$\sin(h) = \sin(\phi) \times \sin(\delta) - \cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \cos(AH)$$

A la salida y puesta de sol, la altura solar es 0, por lo tanto:

$$AH_s = \arccos[-\tan(\phi) \times \tan(\delta)]$$

De esto se calcula la duración teórica del día como:

$$T_{dia} = 2 \times \left[\frac{AH_s}{2} \right]$$

Cálculo de la declinación solar:

Lo usual es utilizar la relación de *Cooper*:

$$\delta = \arcsin \left[23,45 \times \sin \left(\frac{365}{360} \times (d - 81) \right) \right]$$

Esta es suficientemente precisa para la mayor parte de las aplicaciones. El *Azimut* se puede calcular como:

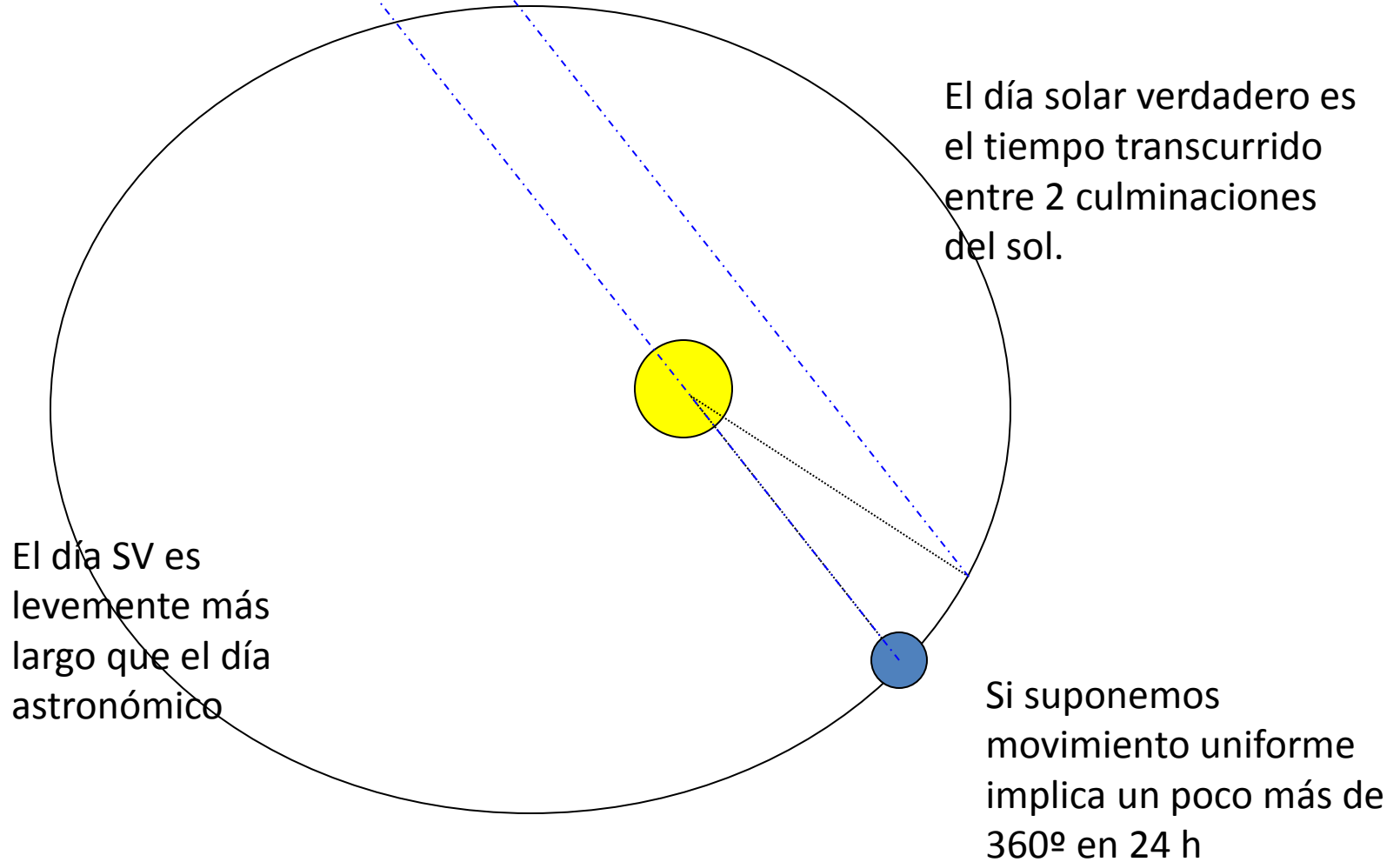
$$\cos(Az) = \text{SIGNO}(\phi) \cdot \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(AH) - \text{sen}(h) \cdot \cos(\phi)}{\cos(h) \cdot \text{sen}(\phi)}$$

Tiempo y Hora

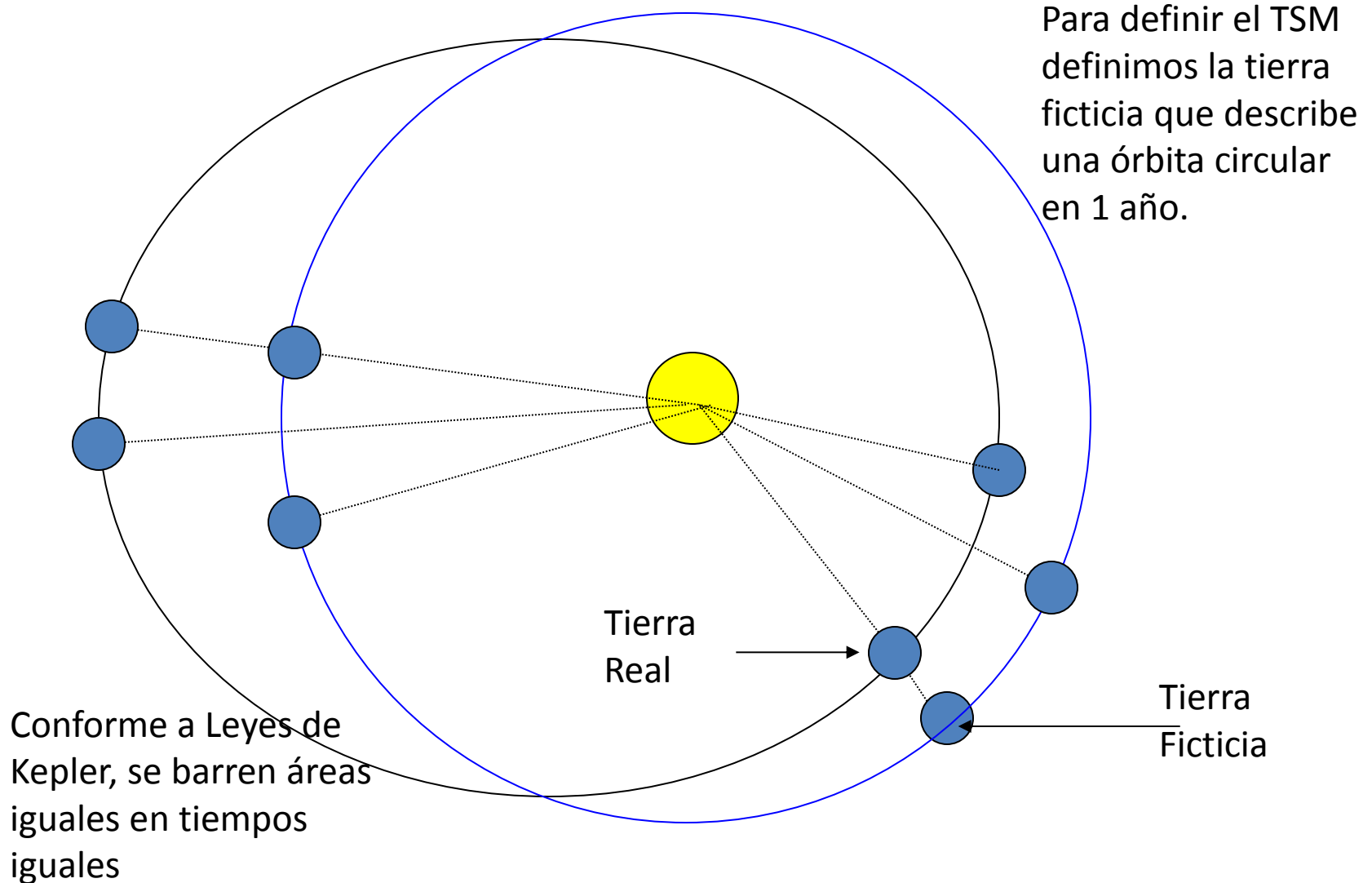
Podemos hablar de los siguientes tiempos:

- **Tiempo Solar Verdadero:** aquel que marcan los relojes de sol. Un día solar es el tiempo que transcurre entre 2 culminaciones sucesivas del sol sobre el meridiano del lugar.
- **Día Astronómico:** es análogo al anterior, salvo que es el tiempo transcurrido entre 2 culminaciones del punto vernal.
- **Año Solar:** es el tiempo solar real en describir una órbita completa en torno al sol.
- **Tiempo Solar medio:** es el tiempo medido para una tierra ficticia que circula en una órbita perfectamente circular.
- **Ecuación del tiempo:** diferencia de tiempo entre tiempo solar verdadero y tiempo solar medio.

Definición TSV

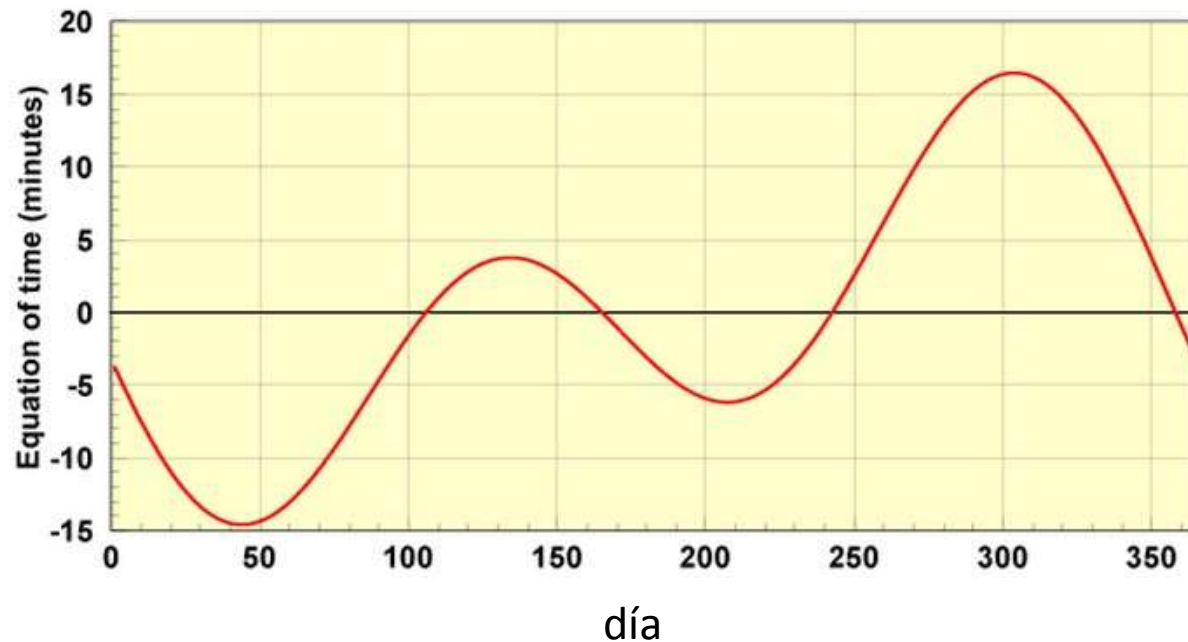


Definición TSM



La diferencia entre TSV y TSM es la Ecuación del Tiempo

A continuación vemos la ecuación del tiempo de manera gráfica:



$$ET = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \sin(B) - 1,5 \sin(B)$$

con

$$B = \frac{360}{365} \times (d - 81)$$

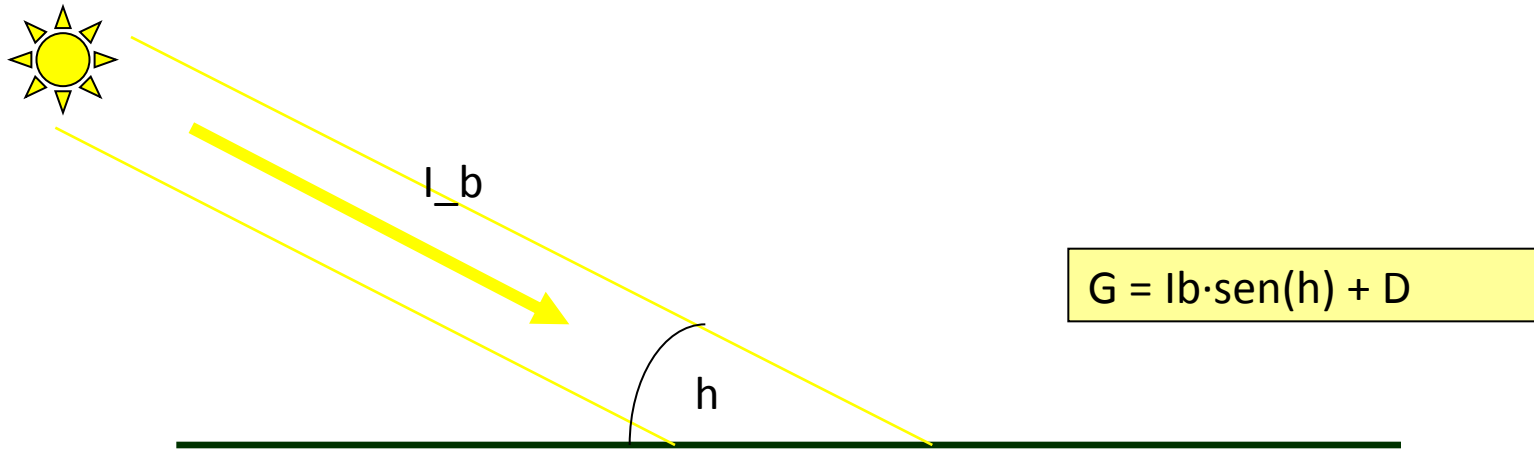
Relación entre Tiempos

- $TSM = TSV + Ec. \text{ Tiempo}$
- $TU = \text{Tiempo Universal} = \text{TSM de Meridiano Greenwich}$
- $HL = \text{Hora Legal} = TU \pm \Delta N \text{ según longitud}$
- En el caso de Santiago, estamos a 70° Longitud Oeste. Implica un Δ de 4,7 horas. Realmente tenemos una diferencia de 4 horas en invierno y 3 horas en verano.

Cosas importantes a retener

- La distancia tierra – sol media es de unos 150 millones de kilómetros.
- La tierra describe una órbita completa en torno al sol en un **año solar**, lo que equivale a 365,24 días.
- La órbita de la tierra en torno al sol es levemente elíptica. Esto hace que estemos más cerca del sol en diciembre y más lejos en julio.
- Los relojes de sol dan el **TSV**: tiempo solar verdadero.
- La hora se fija de acuerdo al **TSM**: tiempo solar medio.
- La diferencia entre el **TSV** y el **TSM** se llama *ecuación del tiempo*.
- En el caso de Santiago, tenemos una diferencia de 4 horas en invierno y 3 horas en verano con el **TU**. Aquí es **más temprano**.

Radiación solar a nivel de la Tierra



En una superficie de 1 m^2 a la distancia media tierra – sol y perpendicular a los rayos del sol, la intensidad es de $1.353 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

- Al atravesar la atmósfera la radiación se atenúa, difunde y dispersa.
- Se llama **radiación directa** a aquella que proyecta sombra.
- La **radiación difusa** es la que viene de las otras direcciones de la bóveda celeste.
- Al atravesar la atmósfera, la intensidad de esta radiación se atenúa por efecto de la atmósfera. Así es que a nivel del suelo, la intensidad de la radiación **directa** es del orden de los 800 a $1.000 \text{ [W/m}^2\text{]}$.
- La **radiación global** es la suma de la intensidad de la directa más la difusa.

Modelo de Perrin de Brichambaut

Se puede estimar bastante bien la intensidad de radiación solar para cuando el disco solar no está interceptado por nubes. Es lo que se llaman: “modelos de día claro”. Uno sencillo de aplicar es el de *Perrin de Brichambaut*, investigador francés de energía solar:

$$I = A \cdot \text{EXP}[-1/(B \cdot \text{sen}(h+C))] \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Con los valores de A, B y C datos empíricos conforme a la siguiente Tabla:

	C. Claro	C. Normal	C. Contam.
A	1210	1230	1260
B	6	3,8	2,3
C	1	1,6	3
K	0,75	1	1,33

En esta relación, la altura solar, h está expresada en grados

Modelo de Perrin de Brichambaut

El mismo investigador propone un modelo sencillo para la radiación difusa:

$$D = 125 * K * [\text{sen}(h)]^{0,4} \quad [\text{W/m}^2]$$

Conociendo la radiación directa y difusa, es muy sencillo calcular la radiación global sobre plano horizontal:

$$G = I * \text{sen}(h) + D$$

Con lo cual podemos estimar radiación en días despejados. Veamos que ocurre en un plano inclinado orientado hacia el Ecuador:

En esta relación, la altura solar, también h se expresa en grados. El modelo de Perrin no es el más exacto, pero su error es 5 a 10% para días claros, lo cual es suficiente para gran cantidad de aplicaciones.

Desplazamiento del sol

Recordemos las ecuaciones básicas que describen el movimiento aparente del sol.
Primero la que describe la altura solar:

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(AH)$$

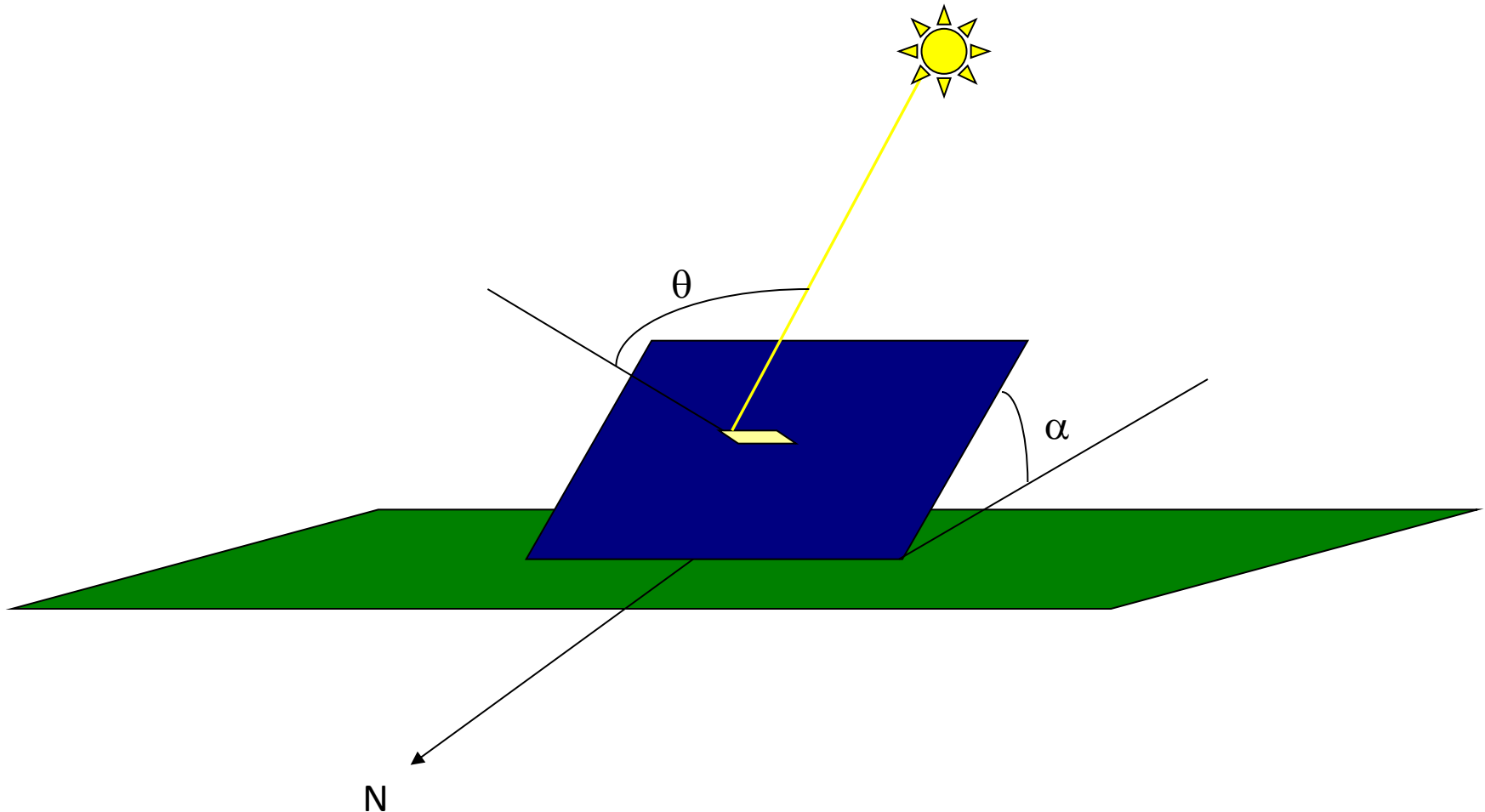
A continuación la que describe el Azimut solar:

$$\cos(Az) = \text{SIGNO}(\phi) \cdot \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(AH) - \text{sen}(h) \cdot \cos(\phi)}{\cos(h) \cdot \text{sen}(\phi)}$$

Para un plano que mira al Ecuador se da la siguiente situación:

Plano inclinado hacia el Ecuador

- En este caso la situación es algo más compleja: el plano forma un ángulo α con respecto a la horizontal. El Azimut es cero.
- Además el rayo solar forma un ángulo θ con respecto a la normal al plano.



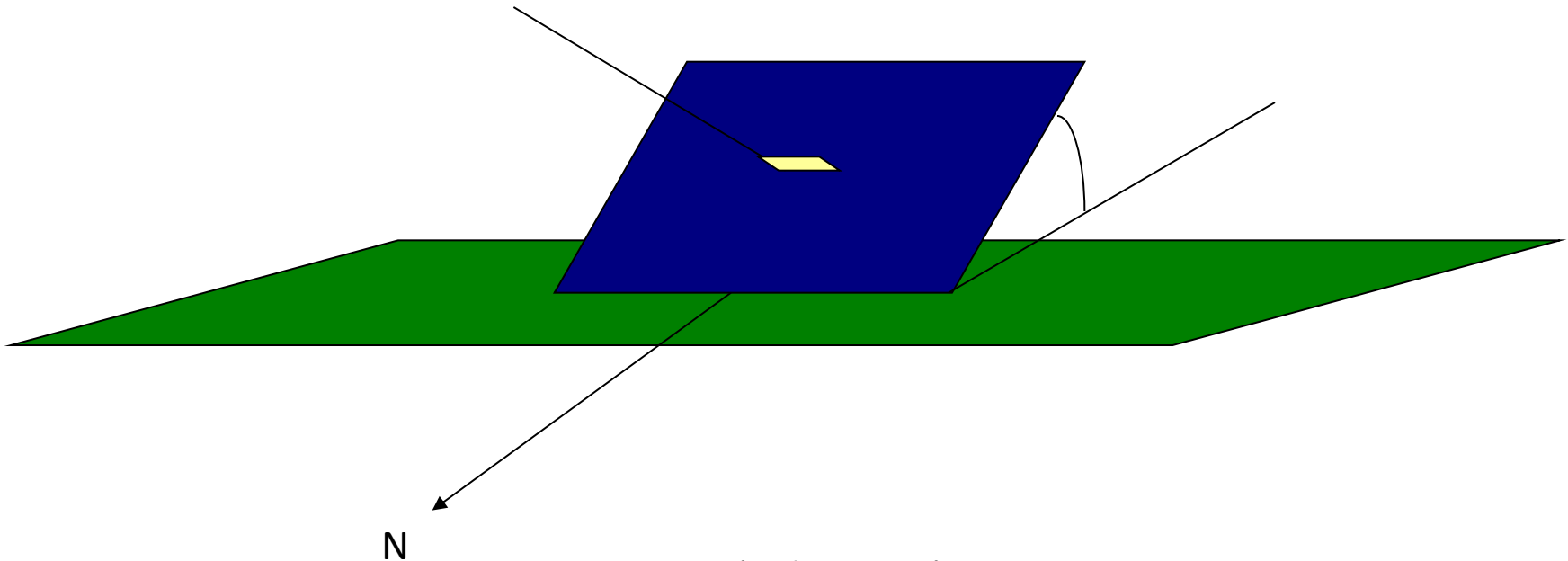
Plano inclinado hacia el Ecuador

- Se cumple que:

$$\cos(\theta) = \text{sen}(\phi \pm \alpha) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi \pm \alpha) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(AH)$$

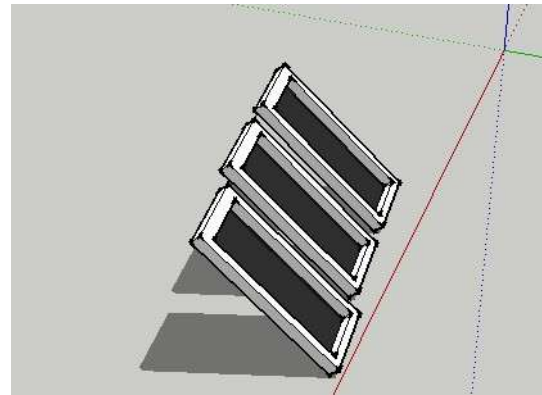
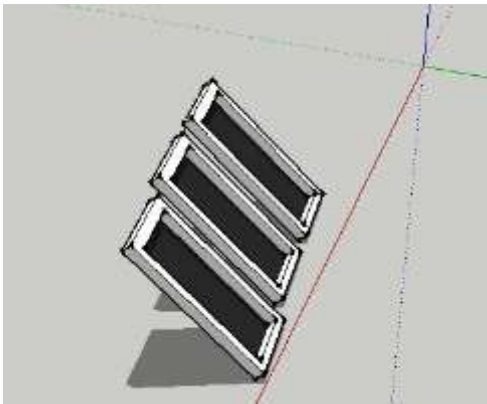
Al aplicar la ecuación, hay que tener cuidado de discriminar cuando el sol está por detrás del plano captor.

En el caso de un plano con Azimut distinto de cero, la ecuación es más compleja.



Efecto de sombras según estación

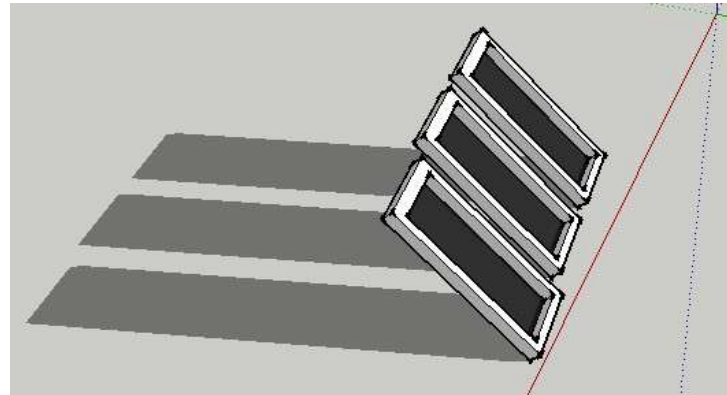
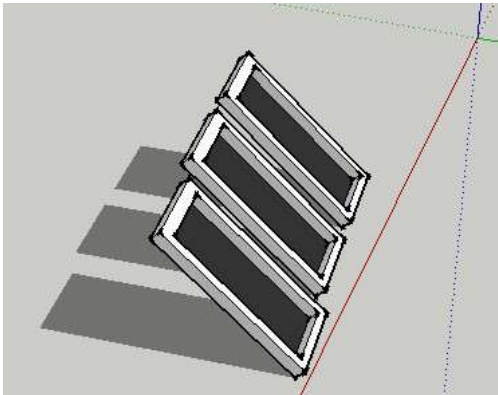
- Hay veces que el sol puede estar **por detrás** del plano receptor, por lo cual hay horas en que solo incide radiación difusa. En las siguientes dos figuras se ve la situación de sombras el 21 de Diciembre para el mediodía solar en Arica y en Puerto Montt:



Esto obviamente afecta tanto la cantidad de energía que incide sobre los colectores, como el espaciamiento que uno debe dejar entre filas sucesivas.

Efecto de sombras según estación

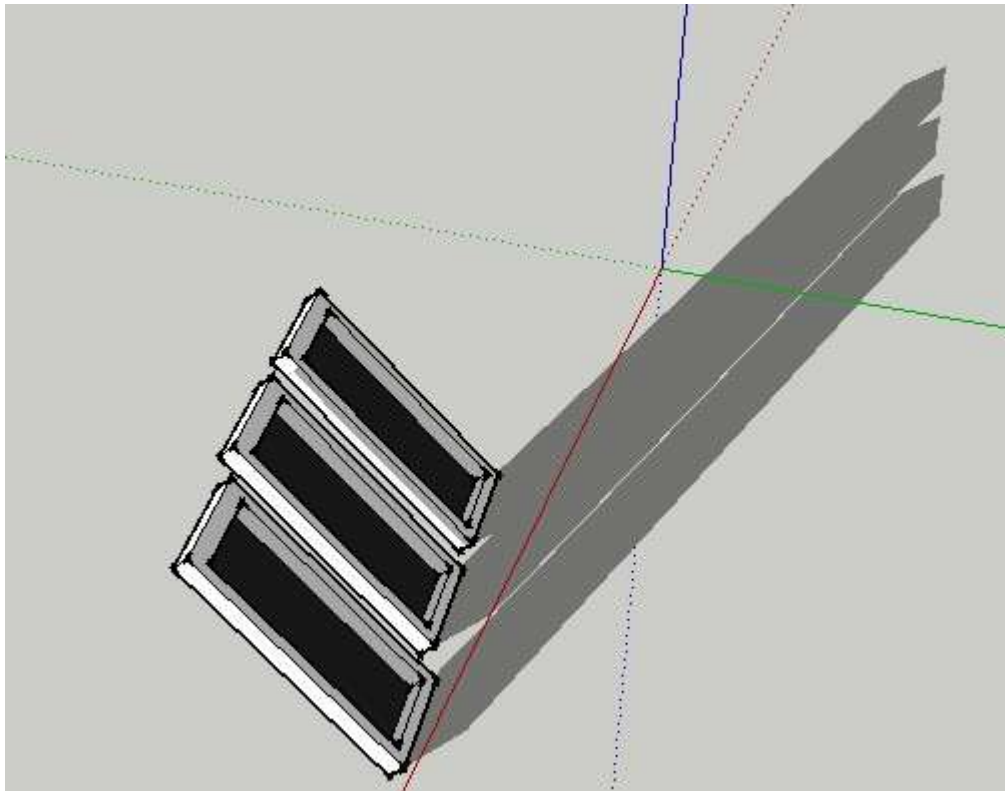
- Ahora vemos la situación de sombras el 21 de Junio para el mediodía solar en Arica y en Puerto Montt:



En la próxima imagen vemos lo que ocurre temprano en la mañana en Arica

Efecto de sombras según estación

- Esto sucede en Arica a las 05:45 AM en diciembre. El sol está **por detrás** de los colectores y solo se capta difusa.



Radiación Extraterrestre y K_T

Es sencillo calcular la **máxima** cantidad de radiación solar que puede llegar a un plano horizontal, esta está dada por:

$$H_0 = \frac{T}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{365,24}\right) \right] \cdot (\cos \delta \cdot \cos \phi) (\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)$$

En esta ecuación los ángulos están expresados en radianes, T es la duración del día (86.400 segundos) y ω_s el ángulo horario de salida y puesta de sol (en radianes).

Para un lugar dado podemos definir el *índice de transparencia atmosférica* como:

$$K_T = \frac{H_H}{H_0}$$

Este es un número adimensional que permite caracterizar muy bien las propiedades de radiación solar de un lugar.

Índice de Transparencia Atmosférica K_T

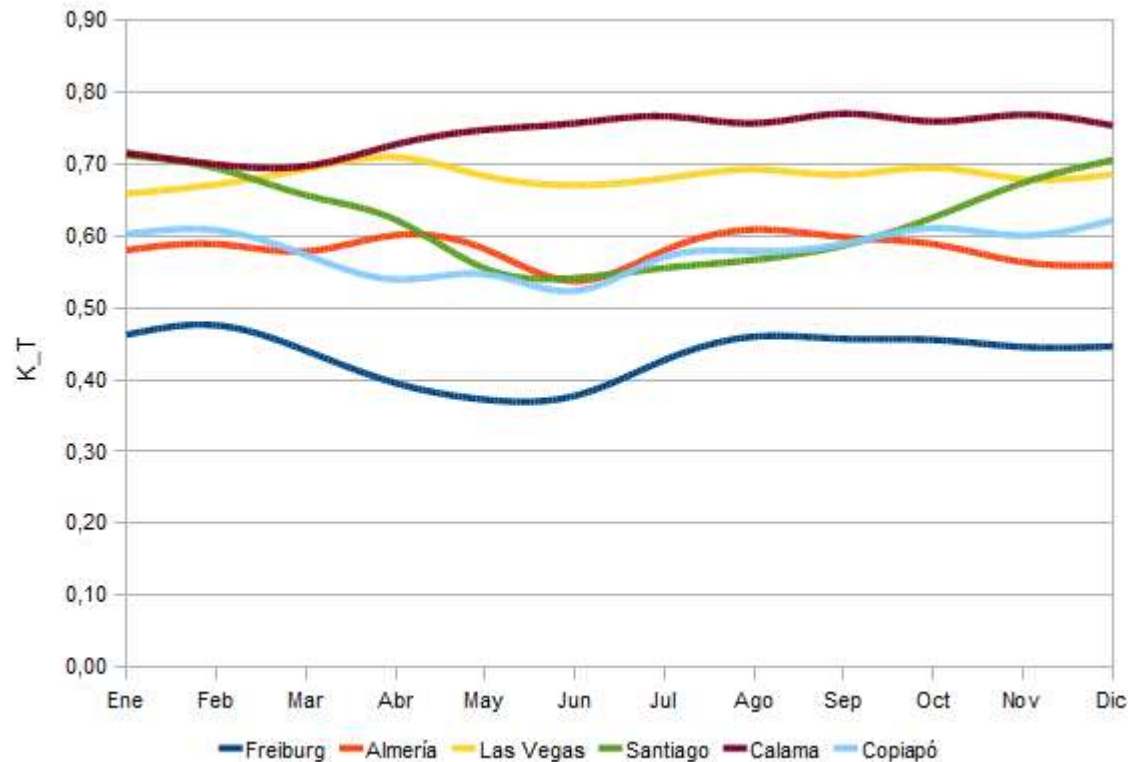
Si bien la **cantidad total** de insolación que llega a un plano horizontal varía en función de la época del año. La **fracción** que llega en función del máximo extraterrestre es función del clima del lugar.

Los valores diarios de K_T pueden variar desde 0,80 hasta 0,15; pero los promedios mensuales son característicos de un lugar.

Así lugares con K_T mayores a 0,65 implican cielos muy despejados. Valores promedio entre 0,4 y 0,65 implican cielos con cierta fracción de nubosidad. Valores promedio de K_T inferiores a 0,40 se dan solo en latitudes muy altas y en condiciones de invierno.

Esto se ilustra claramente en la siguiente figura:

Transparencias comparadas de seis lugares...



Desde el punto de vista de *transparencia*, Santiago es similar a Copiapó. Y Santiago es superior a Almería. Claramente Calama (y todo el Norte Interior) tiene condiciones excepcionales.

Duración Día y Ecc. Angström

Podemos establecer fácilmente la duración teórica del día como:

$$S_0 = \frac{2 \cdot \arccos[-\tan \phi \cdot \tan \delta]}{15}$$

• Si llamamos S la cantidad de horas de sol reales en un lugar, entonces la *fracción de asoleamiento será:*

$$\overline{K}_s = \frac{\overline{S}}{S_0}$$

• Angstrom demostró que para valores medios mensuales existe una buena correlación lineal entre la fracción de horas de sol y la radiación solar sobre plano horizontal. Esta viene dada por:

$$\overline{K}_T = a + b \cdot \overline{K}_s$$

o

$$\overline{H}_H = \overline{H}_0 \left(a + b \cdot \overline{K}_s \right)$$

Duración Día y Ecc. Angström

Por lo tanto si conocemos la fracción de horas de sol en un lugar, será relativamente sencillo estimar la radiación solar sobre plano horizontal.

Trabajos posteriores a Angstrom establecieron que:

$$a + b \approx 0,75$$

- En la siguiente Tabla se presentan algunos valores típicos de a y b para lugares típicos de Chile. Además se indica de donde se obtuvieron las referencias.

Lugar Observación	Aplicable en Chile	a	b
Albuquerque NM (USA)	Pampa desértica	0,41	0,37
La Serena (Chile)	Costa Central y Norte	0,30	0,38
Ayacucho (Perú)	Altiplano	0,41	0,40

Instrumentos para Medir Radiación Solar

Los instrumentos para medir datos solares se clasifican en:

Pirheliómetros: miden la radiación **directa**, es decir que viene directamente del disco solar. Típicamente son los *patrones*.

Piranómetros: miden la radiación **global** es decir la directa y la difusa. Operan según varios principios.

Heliógrafos: sirven para registrar las **horas** de sol en un lugar.

A la vez se clasifican según la **precisión** y estabilidad de los mismos en:

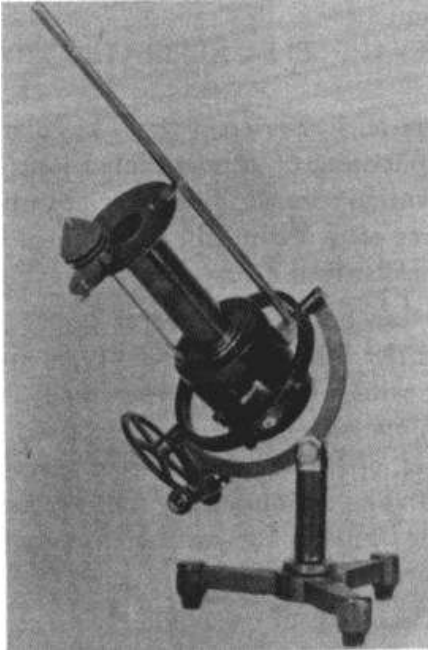
Patrones: error inferior al 0,5%, estabilidad mejor que 1% anual.

Primera Clase: error inferior al 1%, estabilidad mejor que 1 a 2% anual.

Segunda Clase: error inferior al 2%, estabilidad mejor que 2% anual.

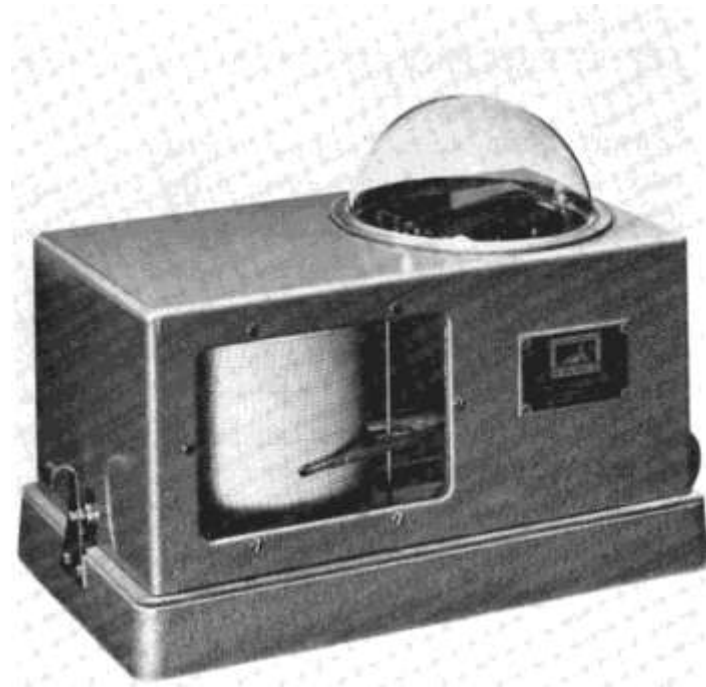
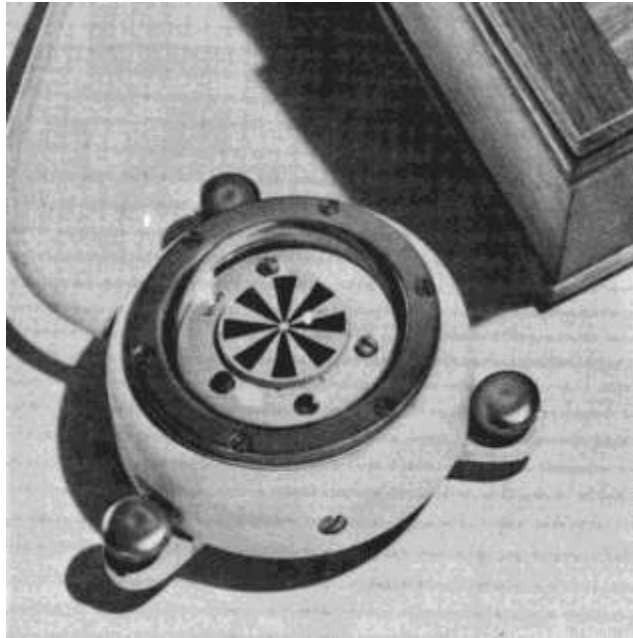
Veamos rápidamente algunos ejemplos:

Instrumentos para Medir Radiación Solar



Pirheliómetros: de Abbot (disco de plata) y Angstrom

Instrumentos para Medir Radiación Solar



Piranómetros: Eppley (termocupla) y Robitsch (bimetálico)

Recurso Solar

Energía solar: es radiación electromagnética que llega a la superficie terrestre desde el sol. Se caracteriza por ser:

- Un fenómeno cuántico. Es decir la energía llega en *cuantas*, que llamamos *fotones*.
- A nivel de la tierra llega en longitudes de onda que van de los **0,3 a 2,5** μm (micrones) de longitud de onda.

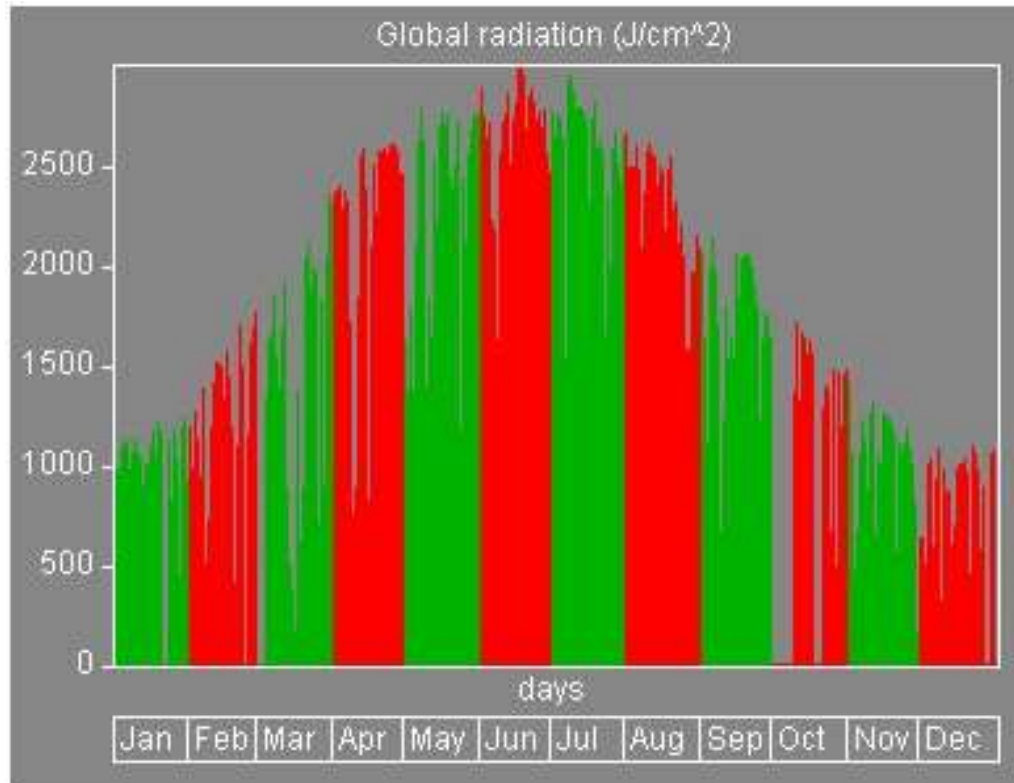
A nivel de la tierra, podemos distinguir tres *componentes* de la radiación solar:

- **La directa** (que es la que viene del disco solar). Es la que proyecta sombra.
- **La difusa** (es la que viene de las otras direcciones de la bóveda celeste). No tiene una dirección preferencial. Es mucho menor en magnitud.
- **La reflejada** . Es la radiación solar que se refleja de objetos cercanos al observador (por ejemplo edificios, cerros e incluso nubes cercanas al sol).

Recurso Solar en Bruto

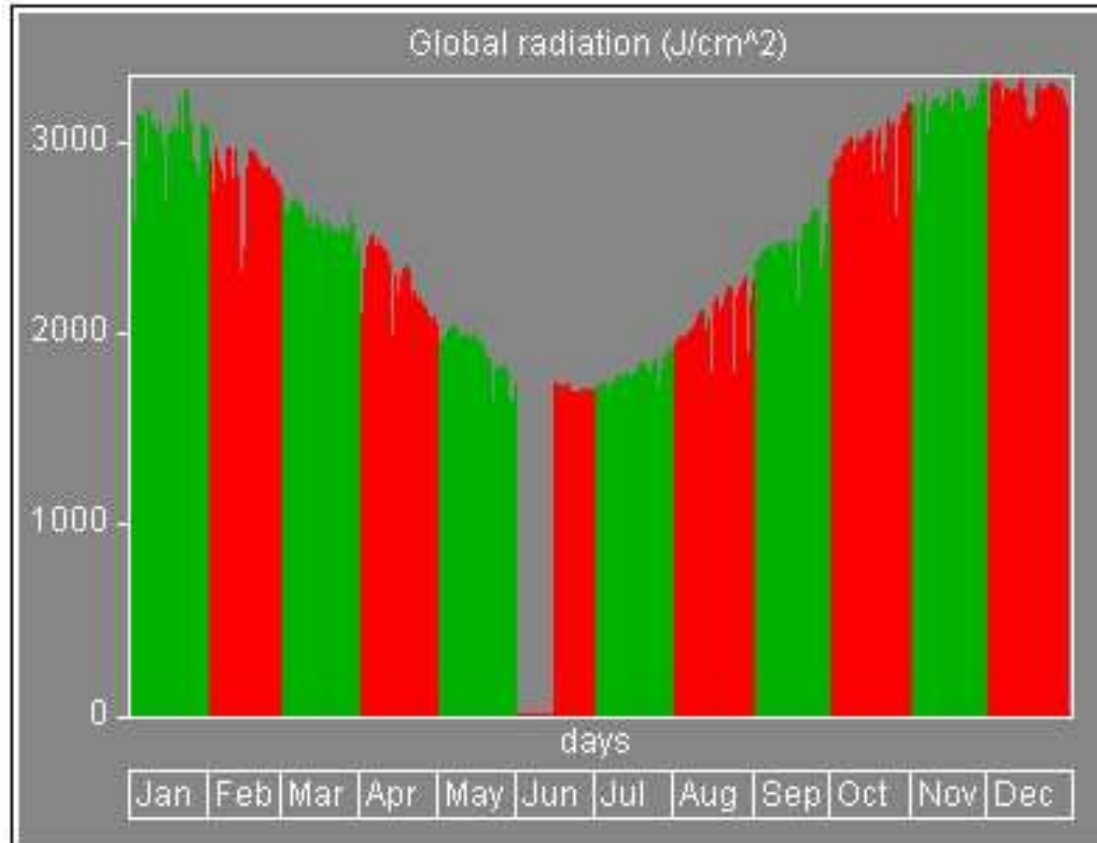
- Hoy día existe abundante información sobre radiación solar en plano horizontal. Por lo menos los valores medios mensuales. Las fuentes que existen son:
 - World Radiation Data Center que depende de la WMO (**World Meteorological Organization**).
 - Datos de mediciones satelitales, las que se corrigen a nivel del suelo con algoritmos. Disponibles en **NASA**.
 - Diversos programas que traen bases de datos. Por ejemplo **RetScreen, SAM, TRNSYS, Meteonorm, etc.**
- Siempre uno debe preguntarse sobre la calidad de los datos.
- En efecto, para sistemas térmicos, un error de datos de un 10% puede inducir a un error de dimensionamiento de 20% o más.
- A continuación veamos los datos “en bruto” de seis ciudades obtenidos de *Retscreen* y del *WRDC*.

Recurso Solar en Bruto



Estos son los valores diarios “en bruto” de Almería para el año 2004...

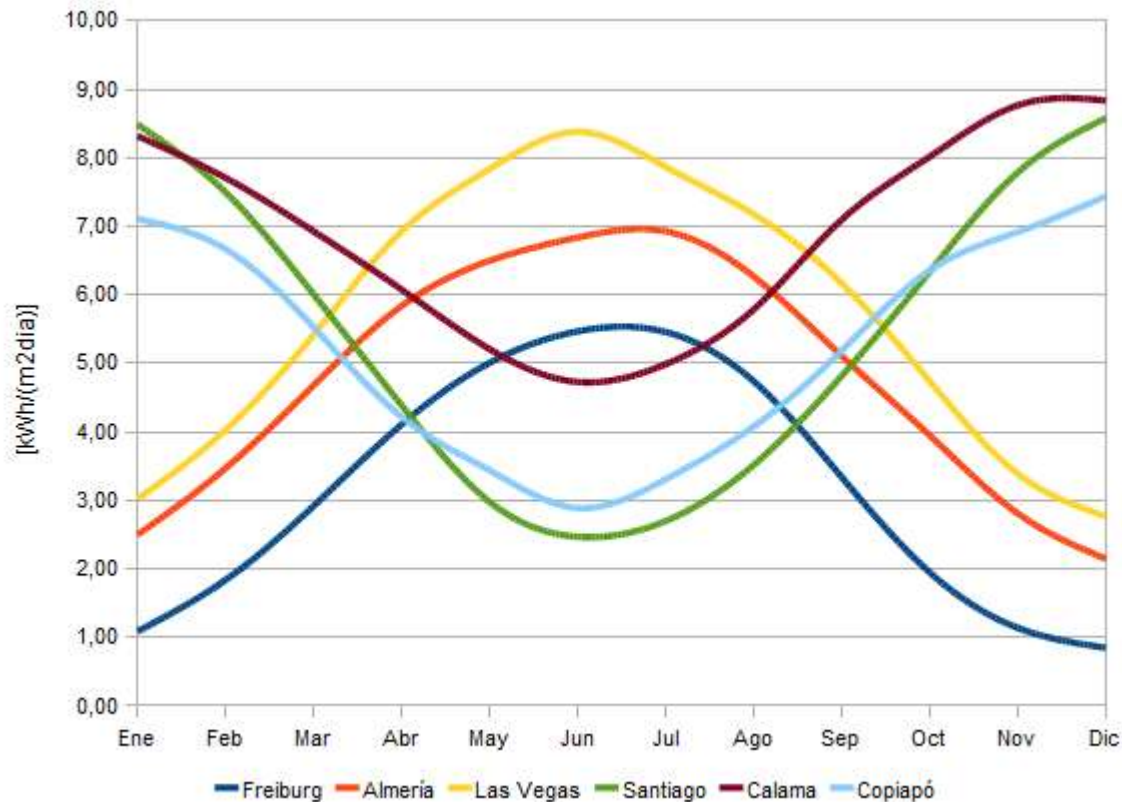
Recurso Solar en Bruto



Y estos los de Calama para el año 2006. De esta figura es evidente la ventaja de Calama vs. Almería (que es el mejor lugar de España). Calama es más de un 40% superior.

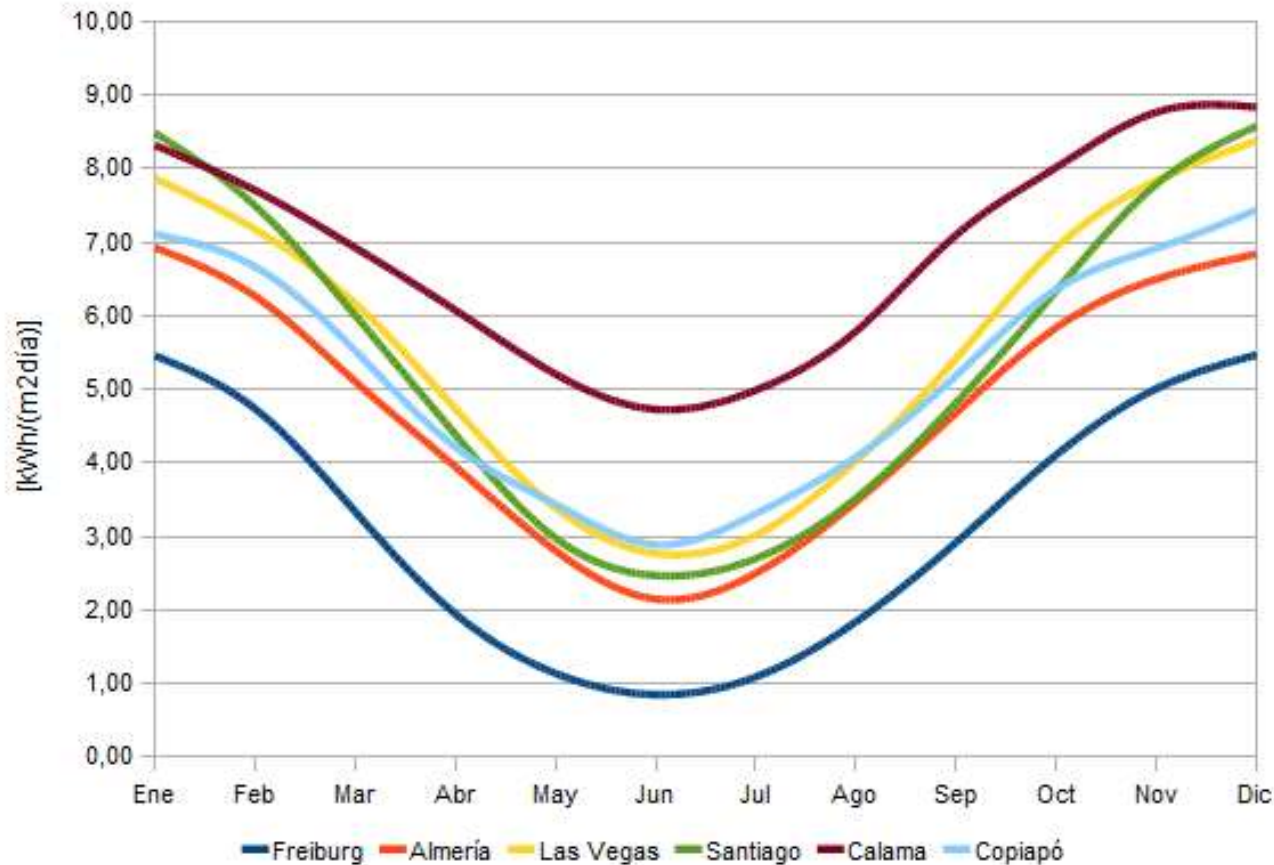
Fuente de datos: WRDC

Recurso Solar en Bruto



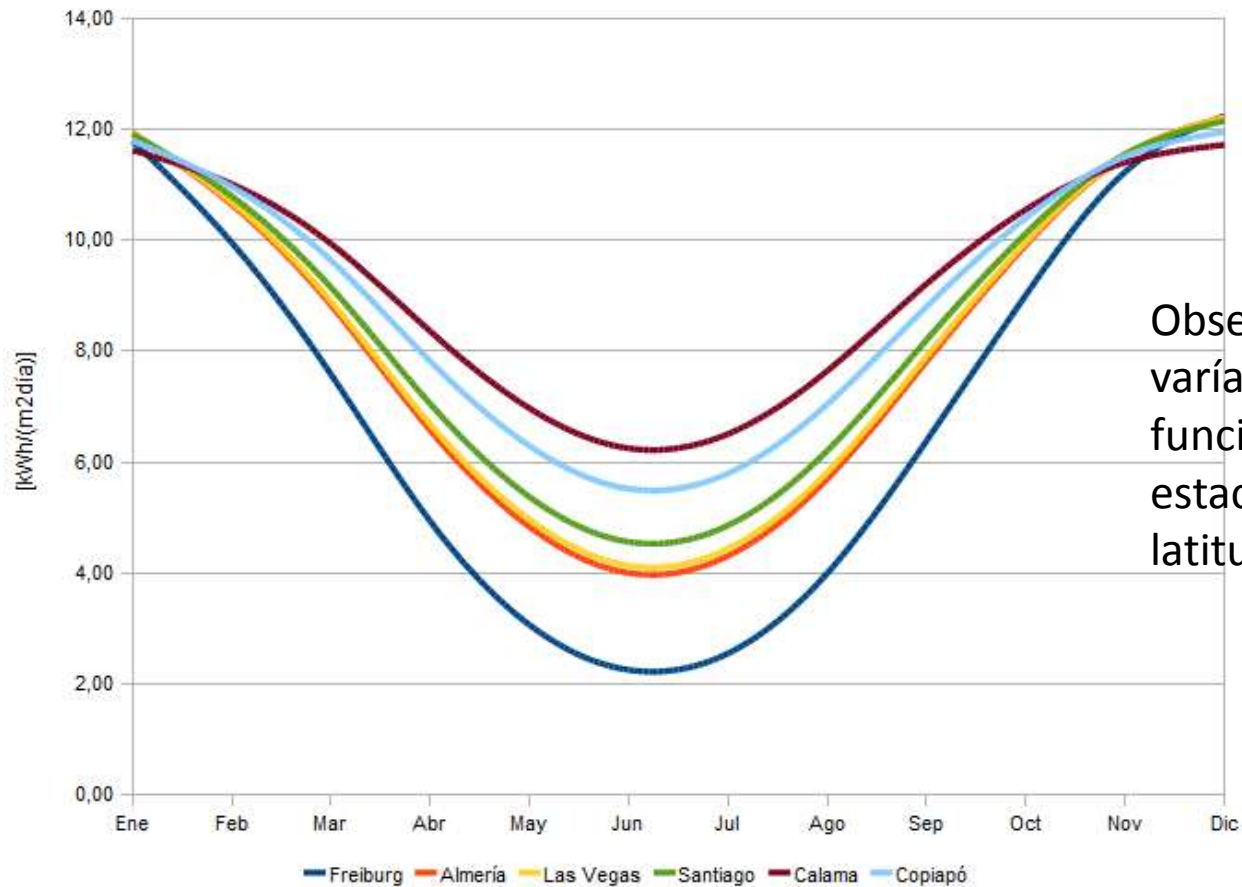
Tenemos tres ciudades del Hemisferio Norte y Tres del Hemisferios Sur. Es difícil comparar por las diferencias estacionales. Esto se arregla...

Recurso Solar corregido:



Aquí simplemente ponemos en fase las estaciones. Verano con verano, otoño con otoño. Las comparaciones son más sencillas. De la figura es clara la ventaja de Chile. Santiago es mejor que Almería en España...

Valores de H_0 promedio para diversas localidades...



Observen como varía H_0 en función de la estación y latitud.

Recurso Solar: recapitulando

Energía solar: fuera de la atmósfera, la intensidad de la radiación solar es de 1353 [W/m²] en un plano perpendicular a los rayos del sol y a la distancia media tierra-sol.

A nivel de la tierra, la intensidad depende de varios factores:

- En primer lugar los *Astronómicos*. Es decir la *Latitud, el día del año y la hora*.
 - En segundo lugar del estado del cielo, en particular la nubosidad (tipo, espesor, ubicación).
 - En tercer lugar de otros fenómenos tales como *altura, turbiedad* de la atmósfera, *columna de agua precipitable* y otros factores menores.
-
- Para días despejados, es muy predecible la intensidad de la radiación directa, difusa y global.
 - A nivel terrestre, la mayor cantidad de energía cae en la banda de $\pm 30^\circ$ de Latitud.

Recurso Solar:

Hoy día existe abundante información sobre radiación solar en plano horizontal. Por lo menos los valores medios mensuales. Las fuentes que existen son:

- Datos de estaciones terrestres. Se sistematizan en el World Radiation Data Center que depende de la WMO (World Meteorological Organization).
- Datos de mediciones satelitales, las que se corrigen a nivel del suelo con algoritmos. Disponibles en *NASA*.
- Diversos programas que traen bases de datos. Por ejemplo *RetScreen, SAM, TRNSYS, Meteonorm, etc.*

Siempre uno debe preguntarse sobre la calidad de los datos.

En efecto, para sistemas térmicos, un error de datos de un 10% puede inducir a un error de dimensionamiento de 20% o más.

Métodos de Conversión de la Energía Solar

La energía solar, para ser utilizable primero se *convierte*. Existen tres grandes métodos de conversión de la energía solar:

- **La conversión *biológica*.** Es lo que está en la base de los procesos fotosintéticos. Desde el punto de vista de física fundamental es similar a la conversión fotovoltaica. Es decir intervienen fenómenos *cuánticos*.
- **La conversión *térmica*.** Esto significa que la radiación solar es absorbida por un elemento y se convierte en calor. Está detrás de ciclos naturales como el ciclo hidrológico, los vientos y otros fenómenos similares.
- **La conversión *directa*.** es convertir directamente la radiación solar en electricidad. Es la base del fenómeno fotovoltaico. La explicación le valió el premio Nobel a Albert Einstein en 1905.

Métodos de Conversión de la Energía Solar

A su vez, ese distingue entre:

- **Conversión natural:** lo que ocurre en fenómenos naturales.
- **Conversión técnica:** la que se hace por medios tecnológicos.

Algunos comentarios al final de este módulo

Primera Oportunidad: la excelencia del recurso

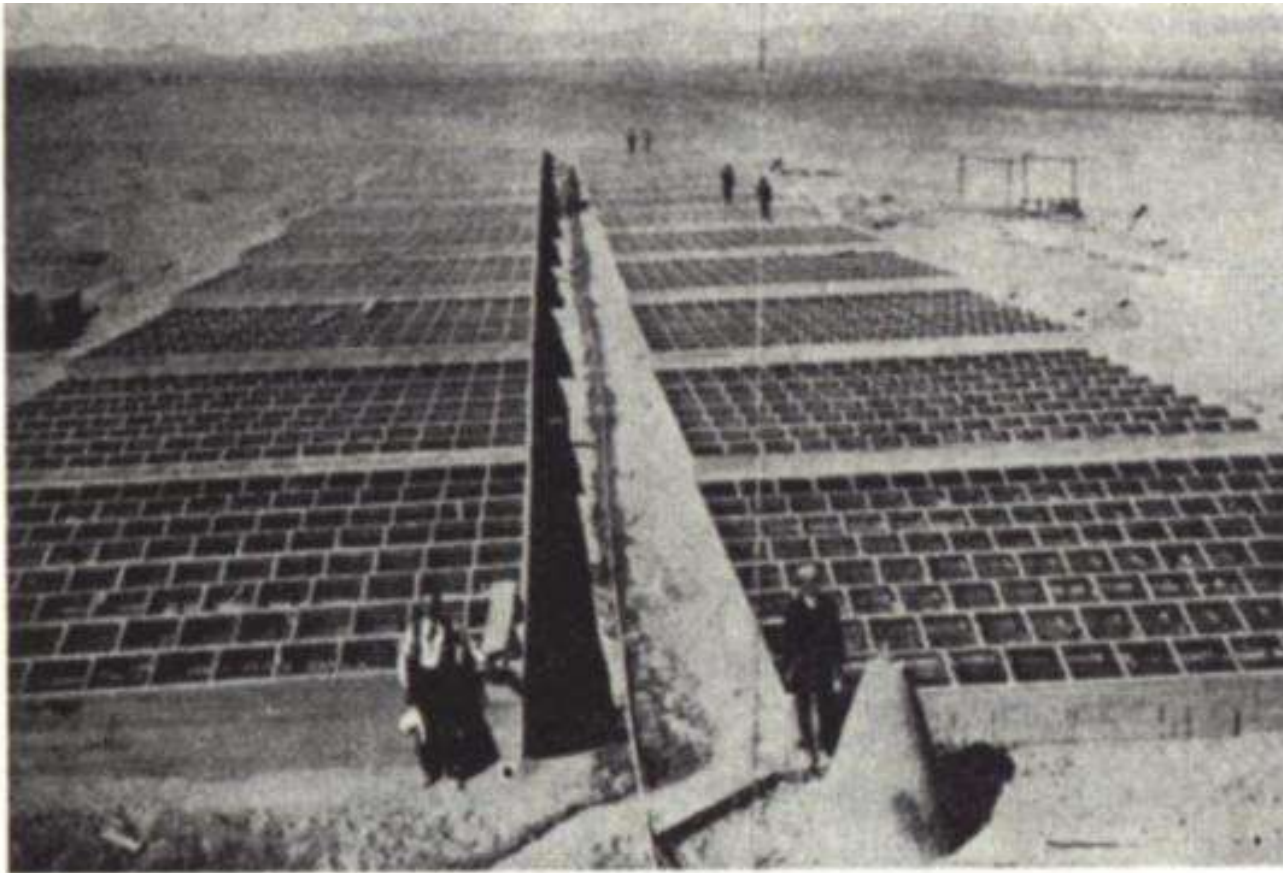


Figure 5. Photographie du distillateur solaire « Las Salinas », prise en 1908 et publiée par María Telkes

Primera Oportunidad: la excelencia del recurso



Foto general del Observatorio de Montezuma en 1930

Primera Oportunidad: la excelencia del recurso



Midiendo la constante y el espectro solar hacia 1930

Primera Oportunidad: la excelencia del recurso



Midiendo la constante solar en 1979



Cancha Solar El Salvador (1980, UTFSM) producía 40.000 lts agua caliente por día

Primera Oportunidad: la excelencia del recurso



Casa Solar La Ola (sistema pasivo con muro Trombe) en operación desde 1982

Segunda oportunidad: los grandes proyectos

Nuevos desafíos del Siglo XXI:

En el mundo se ha reconocido que es **indispensable** disminuir la huella de carbono por actividades humanas. Esto ha llevado a un acelerado desarrollo de las energías renovables, en particular la energía solar.

España, que tuvo un trabajo constante desde inicios de los años 1980 se ha convertido en un actor relevante a nivel científico y tecnológico. Lo han hecho con trabajo, investigación, constancia y mucho trabajo en redes con otros países...

Los grandes proyectos en Chile:

El reconocimiento a nivel internacional de la excelencia del recurso, como de la necesidad de energía ha llevado a que estén apareciendo grandes proyectos en Chile.

Segunda Oportunidad: los grandes proyectos



Planta Termosolar El Tesoro: 55% aporte solar, del orden de 10 MW térmico

Segunda Oportunidad: los grandes proyectos



**Planta Termosolar Minera Gaby: 35.000 m² de colectores y acumulador de 4300 m³
Factor solar anual de 80%**

Segunda oportunidad: los grandes proyectos

Otros grandes proyectos:

- **Proyecto Pedro de Valdivia:** planta CSP de 360 MW con cilindro parabólico. Estudio avanzado.
- **Proyecto María Elena:** planta CSP de 400 MW de torre central, Estudio avanzado.
- **Proyectos FV:** más de 50 MW en construcción u operación. Varios miles de MW en proyecto.

Las oportunidades:

- Con la desaceleración económica en Europa, aparece gran interés en desarrollar proyectos en Chile.
- Además hay excelentes relaciones académicas entre el proyecto SERC y grupos de investigación en Chile.
- Se está formando capital humano avanzado.

El gran desafío:

Energía, agua y medio ambiente:

- **Necesidad:** necesitamos energía más limpia y económica, en especial para procesos mineros.
- **Oportunidad:** las empresas mineras necesitan energía, agua y aumentar eficiencia de los procesos.
- **Tecnología:** existe enorme oportunidad en desarrollo de procesos más eficientes y con menor impacto ambiental.

Las oportunidades:

- Tal como ocurrió en España, hay espacio para innovación y desarrollo tecnológico.
- Se pueden establecer relaciones de trabajo horizontales y sumamente positivas.
- Hay grandes oportunidades de avanzar.

¿Seremos capaces de asumir los desafíos?

¿Pasar de ser un país que explota y exporta materias con poca elaboración a un país capaz de desarrollar, crear y mejorar tecnologías?

