



“Modelado de Radiación UV en fotorreactores”

Solar Safe Water 2005, Iguazú.

***Navntoft Christian, Blesa Miguel A., Dawidowski Laura E.
Comisión Nacional de Energía Atómica***





Objetivos

- ***Explicar la atenuación de la radiación UV a través de su paso por la atmósfera***
- ***Mostrar métodos sencillos de estimación de la radiación UV a nivel de la superficie terrestre***
- ***Descripción de software existente***
- ***Estimación sencilla de la radiación UV que llega a los fotorreactores del tipo SOLWATER.***





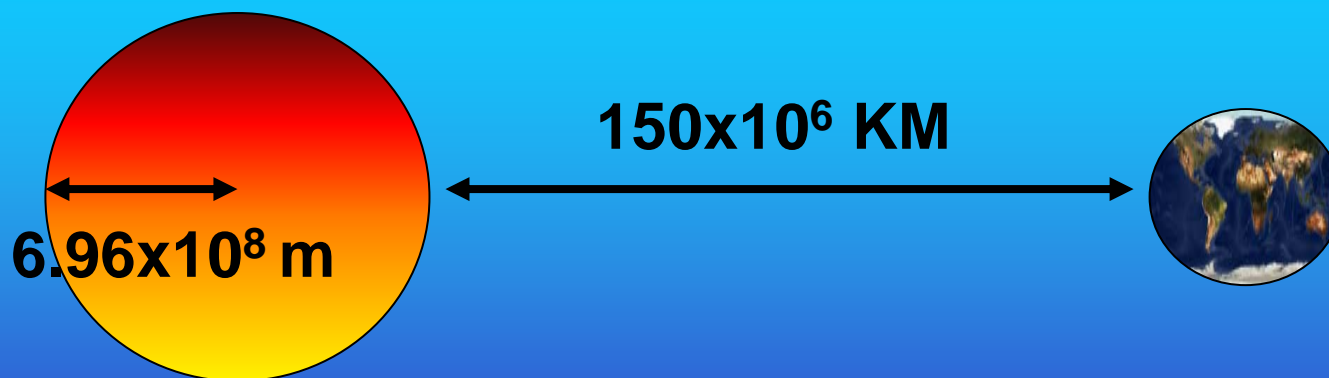
Radio del Sol: 696.000 KM

Radio de la Tierra: 6382 KM

Distancia Media Sol Tierra: 150.000.000 KM

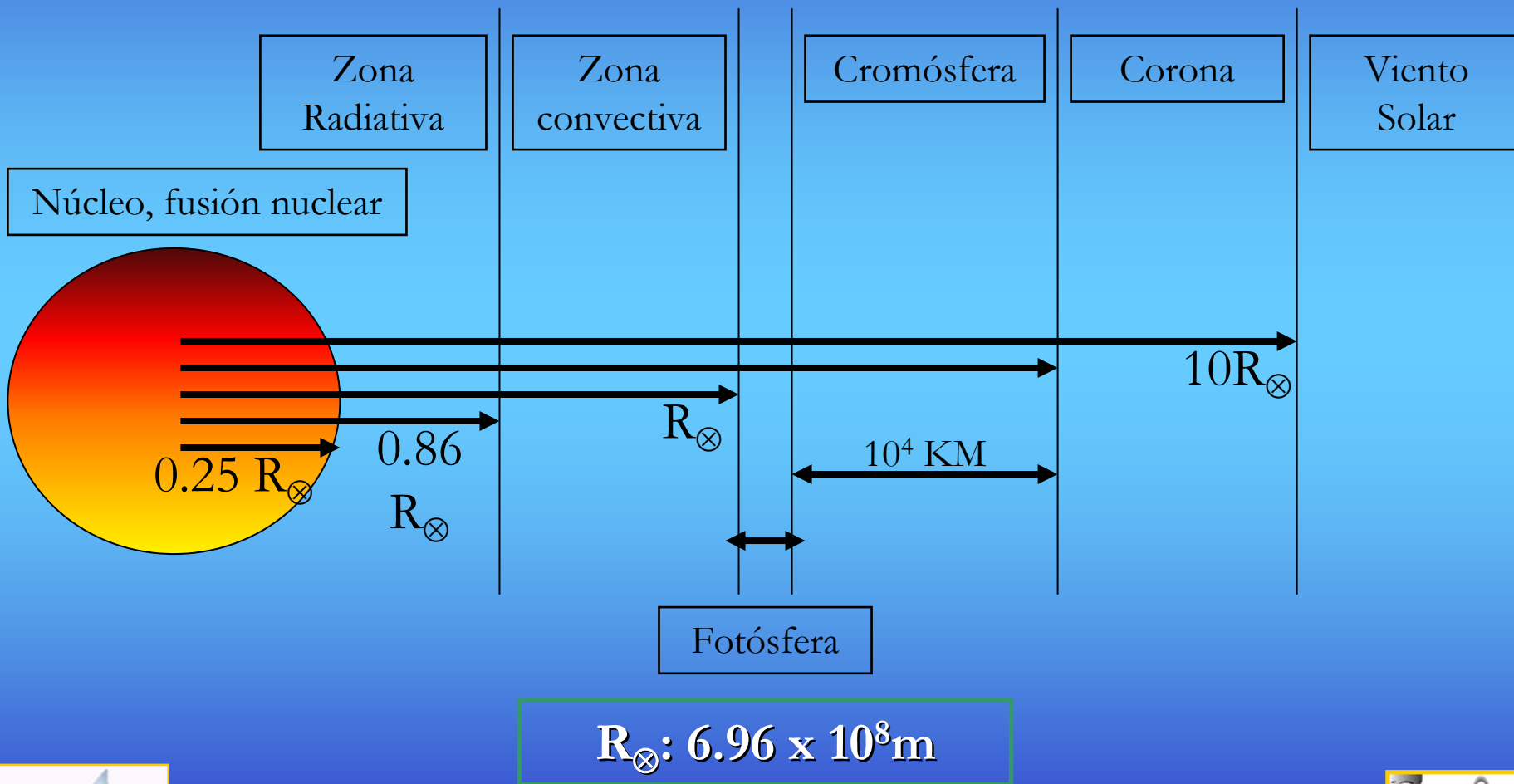
Radiación en la superficie del Sol: 60.000 Kw/m²

Constante Solar: 1367±7 W/m²





Radiación Solar





Órbita terrestre





Inverno

Primavera y Otoño

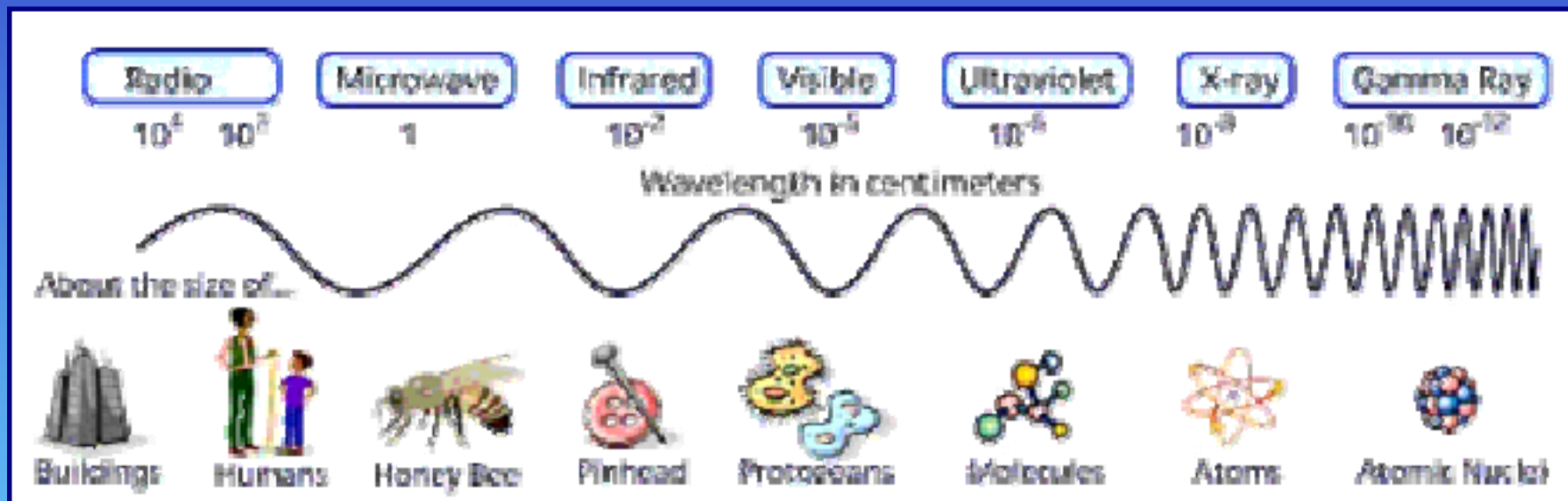


Verano





Espectro Electromagnético



•El 98% de ella en la zona ubicada entre los $0,3 \mu\text{m}$ y los $4 \mu\text{m}$ de acuerdo a la siguiente composición aproximada:

Ultravioleta $<0,4 \mu\text{m}$	8%
Visible $>0,4\mu\text{m}$ y $<0,7\mu\text{m}$	41%
Infrarojo $>0,7\mu\text{m}$	51%





Radiación Solar UV

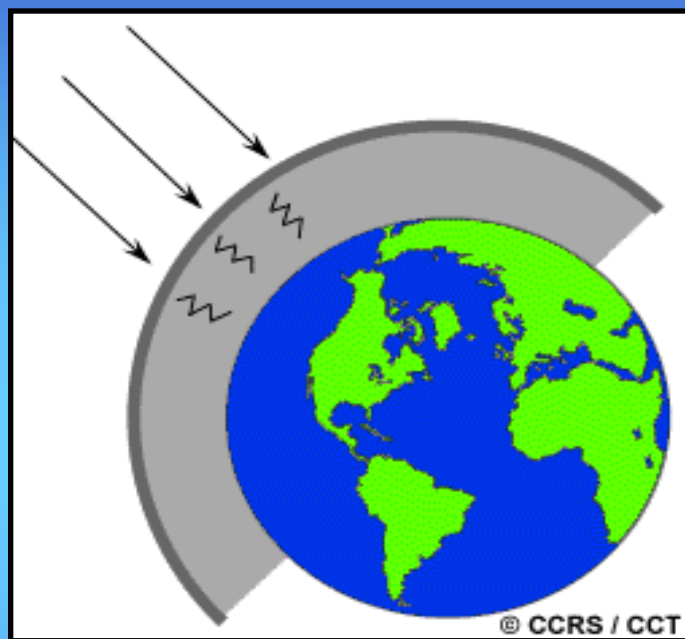
Para su estudio, la radación UV se divide arbitrariamente en tres rangos:

- **UV-A (320-400nm)**
- **UV-B(280-320nm)**
- **UV-C(100-280nm)**

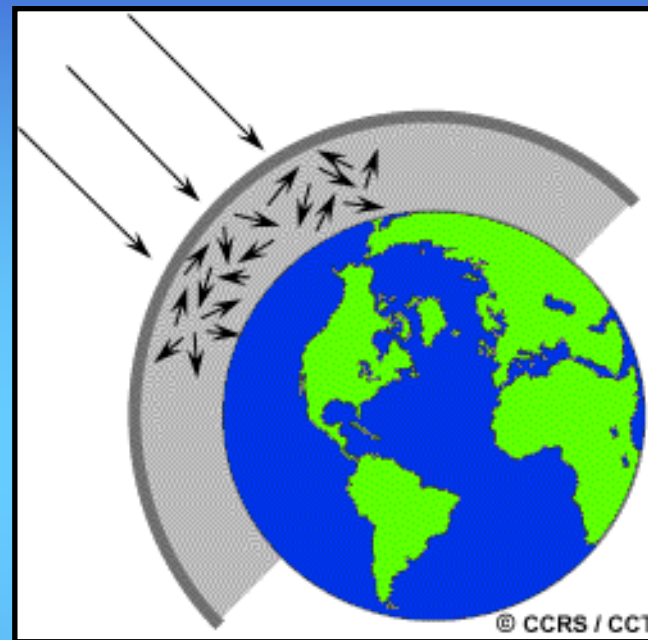
Las longitudes de onda de interés para fotocátalisis son las que comprenden el UV-A y el UV-B. Las últimas son de gran interés de estudio por sus efectos sobre los seres vivos y los contaminantes atmosféricos. Los rangos de las mismas pueden diferir en ± 5 nm, dependiendo del autor.



Atenuación en la atmósfera



Absorción: Los fotones son transformados en energía química o calor. Choque inelástico.



Dispersión: Los fotones son redistribuidos sin pérdida de energía. Choque elástico.



Fenómenos de interés para el UV

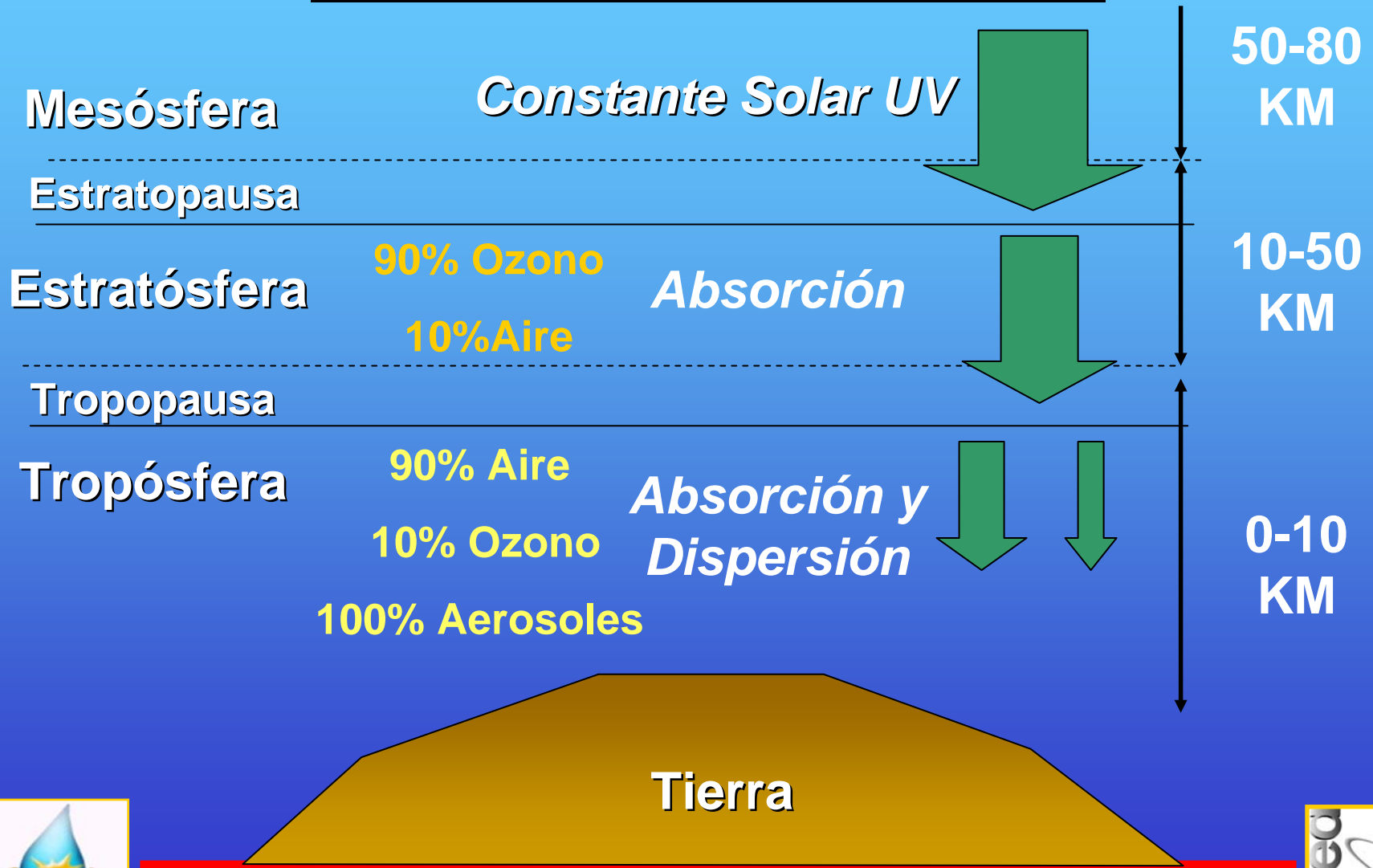
- *Absorción por el ozono estratosférico*
- *Dispersión por las moléculas de aire*
- *Absorción y dispersión por los aerosoles*
- *Dispersión por nubes*

Para describirlos es necesario saber su distribución atmosférica y las interacciones entre ellos.





Distribución Atmosférica





Absorción por el ozono

Reacción química:



¿Porqué el 90% del Ozono está en la estratósfera?

La absorción por el ozono sigue la ley de Beer-Lambert:

$$\frac{I}{I^0} = e^{\frac{-\tau(\lambda, z)}{\cos\theta}}$$

$$\tau(\lambda, z) = \sigma(\lambda) \cdot n \cdot z$$

$\sigma(\lambda)$, es la sección eficaz de absorción, particular de cada gas(cm^2).

n , la densidad numérica del gas (molec/cm^3)

z , es el espesor de la capa del gas (cm)





Absorción por el ozono

Cuando la densidad numérica del gas varía con la altura, la profundidad óptica se define como:

$$\tau(\lambda, z) = \sigma(\lambda) \cdot n \cdot Z$$

Y Z (molec/m²) se define como: $Z = \int n \cdot dz$

Para el ozono, la equivalencia entre Unidades Dobson y densidad numérica es:

$$1 \text{ UD} = 2.69 \times 10^{20} \text{ molec/m}^2$$





$\lambda(\text{nm})$	$\theta=15^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$	$\theta=90^\circ$
280	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
290	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.06	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00
310	0.49	0.45	0.38	0.25	0.07	0.00
320	0.80	0.78	0.73	0.65	0.43	0.00
330	0.97	0.96	0.95	0.94	0.88	0.00
340	0.99	0.98	0.98	0.97	0.95	0.00
350	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.00

Como muestra la tabla, el ozono modula básicamente el UV-B, mientras que en el UV-A pesan más los aerosoles.





Dispersión por el aire (Rayleigh)

➤ Puede modelarse también a través de Beer-Lambert utilizando una sección eficaz de dispersión:

$$\longrightarrow \frac{I}{I^o} = e^{\frac{-\tau(\lambda, z)}{\cos\theta}}$$

➤ Para el caso del aire, esta sección eficaz (cm²) puede calcularse mediante:

$$\longrightarrow \sigma_{aire} = \frac{3,90 \times 10^{-28}}{\lambda^x}$$

➤ Donde λ se expresa en μm y x tiene la expresión:

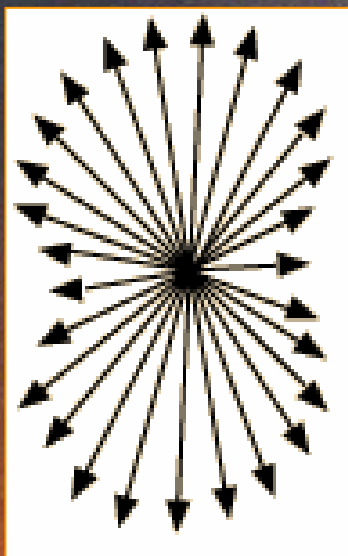
$$\longrightarrow x = 3,916 + 0,074 \cdot \lambda + \frac{0,050}{\lambda}$$

De 0 metros a tope de atmosfera hay 2.15×10^{29} moleculas de aire por m².





Dispersión por el aire (Rayleigh)



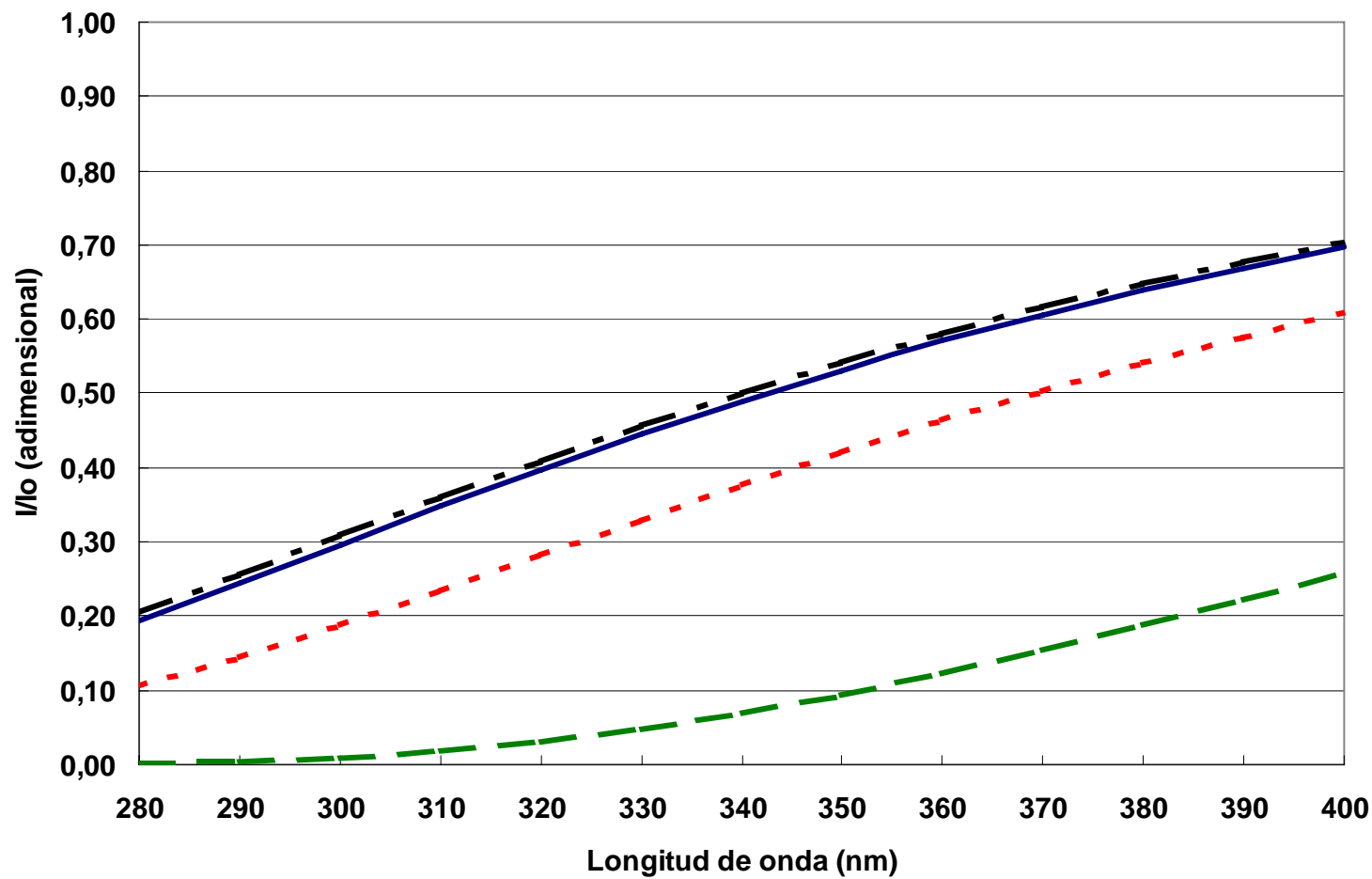
Aproximadamente, la radiación es redistribuída de tal manera que un 50% sigue en la dirección del haz incidente y el otro 50% es redireccionada hacia atrás.





Ángulo cenital

— -0° — 15° - - 45° - - 75°





Aerosoles (Mie)

Sigue siendo aplicable la ley Beer-Lambert.

La profundidad óptica para los aerosoles está dada por a ley de Angstrom:

$$\tau = \beta(\lambda)^{-\alpha}$$

- β , se denomina coeficiente de turbidez y toma valores entre 0 y 0,5. Siendo el mas frecuente 0,15. Está relacionado con la cantidad de aerosoles que hay en la atmósfera.
- α , denota el tamaño y el origen de los aerosoles, toma valores entre 0 y 4; siendo el más frecuente 1,3.





Aerosoles (Mie)

De la irradiancia que es interceptada por los aerosoles, una fracción es absorbida y otra dispersada. El albedo de dispersión simple(ω) es el que caracteriza la importancia relativa de cada proceso:

$$\omega_o = \frac{\sigma_d}{(\sigma_d + \sigma_a)}$$

Toma valores de 0 para absorcion pura y 1 para dispersion pura.





Aerosoles (Mie)

El patrón de redireccionamiento de la radiación está dado por el factor de asimetría g . El mismo describe la direccionalidad de la radiación dispersada

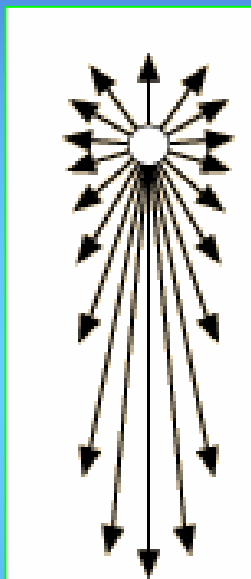
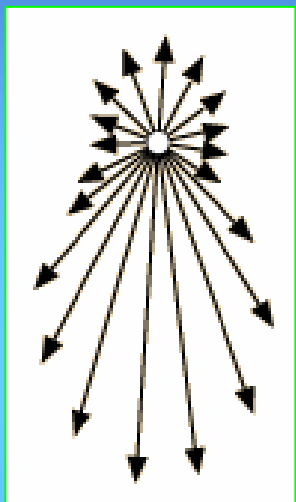
$$g = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} P(\Theta) \cos\Theta d(\cos\Theta)$$

Los valores que toma g son: -1 para dispersión total hacia atrás y +1 para dispersión total hacia adelante.

Valores típicos de aerosoles están entre 0.6 y 0.8



Aerosoles (Mie)



Funciones de fase (g)

<i>Atmósfera</i>	β	α	<i>Visibilidad(km)</i>
Limpia	0,0	1,30	340
Clara	0,10	1,30	28
Turbia	0,20	1,30	11
Muy turbia	0,40	1,30	<5

Valores de los parametros de Angstrom.



Albedo superficial

- Se define el albedo superficial como la razón de la radiación reflejada sobre la radiación incidente

Tipo de Superficie	Albedo (%)
<i>Agua Líquida</i>	5-10
<i>Nieve Limpia</i>	30-100
<i>Nieve Sucia</i>	20-95
<i>Hielo</i>	7-75
<i>Arena desértica</i>	4
<i>Asfalto</i>	4-11





Expresión final para la irradiancia

$$F_{(\lambda)} = F_{ET(\lambda)} \cdot (\lambda, \theta, T_{O_3}, T_{AIRE}, T_{AEROSOLES}, A)$$

$F_{ET(\lambda)}$ = Irradiancia solar extraterrestre en W/m²

T_{O_3} = Transmitancia del ozono

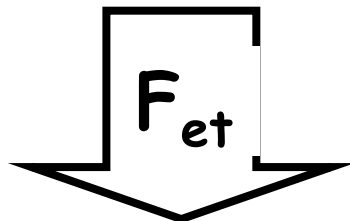
T_{AIRE} = Transmitancia del aire

$T_{AEROSOLES}$ = Transmitancia de los aerosoles

A = Albedo superficial



Expresión final para la irradiancia

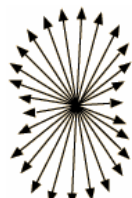


O3



$$T_{O3} = \frac{I}{I_0} = e^{-\left(\frac{\tau_{(O3,\lambda)}}{\cos \theta}\right)}$$

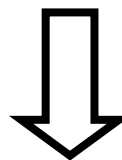
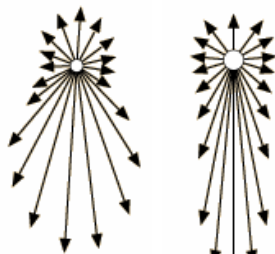
Aire



$$T_{aire} = \frac{I}{I_0} = e^{-\left(\frac{\tau_{(aire,\lambda)}}{\cos \theta}\right)}$$

$$F_{dif(\lambda)}(aire) = F_{ET(\lambda)} \cdot \cos \theta \cdot T_{O3(\lambda)} \cdot (1 - T_{aire(\lambda)}) \cdot 0.5 \cdot T_{aerosoles(\lambda)}$$

Aerosoles



$$T_{aerosoles} = \frac{I}{I_0} = e^{-\left(\frac{\tau_{(aerosoles,\lambda)}}{\cos \theta}\right)}$$

$$F_{dif(\lambda)}(aerosoles) = F_{ET(\lambda)} \cdot \cos \theta \cdot T_{O3(\lambda)} \cdot (1 - T_{aerosoles(\lambda)}) \cdot T_{aire(\lambda)} \cdot \omega_o \cdot g$$

Superficie Terrestre





Ecuación de transferencia radiativa

$$\cos\theta \frac{dI(\tau, \theta, \phi)}{d\tau} = -I(\tau, \theta, \phi) + \frac{\omega_0}{4\pi} F_\infty e^{-\tau/\cos\theta_0} P(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0) +$$

$$\frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} I(\tau, \theta', \phi) P(\theta, \phi, \theta', \phi') d(\cos\theta') d\phi'$$

Atenuación por absorción y dispersión

Dispersión de la radiación difusa

Dispersión de la radiación solar directa





Transferencia radiativa

Para un superficie plana como un fotorreactor de placa plana, la ecuacion se reduce a:

$$F = F_{dir} + \int_0^{2\pi} \int_0^1 I(\theta, \phi) \cos\theta d(\cos\theta) d\phi$$



Radiacion
directa



Radiacion
difusa





Modelo TUV 4.1

Varios modelos que estan en internet brindan soluciones empaquetadas a la ecuacion de transferencia radiativa.

De entre ellos uno de los mas evaluados es el que aqui se presenta. Fue evaluado mundialmente y el mismo presenta un certeza del 95% al mediodia solar, siempre y cuando los parametros ingresados sean correctos.





Modelo TUV 4.1

Datos de entrada:

- **Latitud y longitud**
- **Fecha, día**
- **Altura sobre el nivel del mar**
- **Espesor optico (0-1), coeficiente alfa (1.3) y albedo de dispersion simple de aerosoles(0,98)**
- **Columna total de ozono (200-300 DU)**
- **El valor de g viene predeterminado en 0.7**





Radiación en fotorreactores

Obstáculos a sortear antes de llegar al fotocatalizador o fotosensibilizador:

- Sombras
- Reflexiones en espejos
- Tubos de vidrio
- Compuestos orgánicos en solución
- Compuestos orgánicos adsorbidos

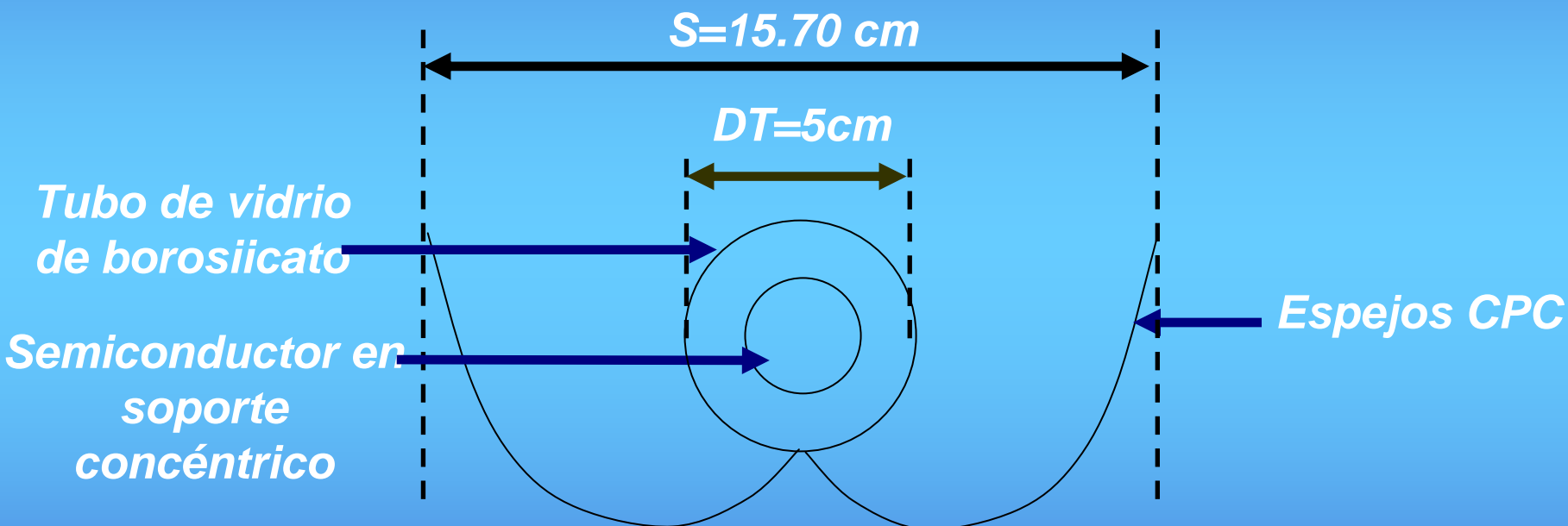




Radiación en fotorreactores



Radiación en fotorreactores





Radiación en fotorreactores

<i>Transmitancia tubos de vidrio</i>	<i>UV-B=45%</i>	<i>UV-A=86%</i>
<i>Reflectancia CPC aluminio</i>	86%	86%
<i>Longitud total de tubos</i>	1.20 m	1.20 m
<i>Longitud expuesta al sol</i>	0.975 m	0.975 m
<i>Diámetro del tubo</i>	0.05 m	0.05 m
<i>Diámetro del soporte</i>	0.032 m	0.032 m





Radiación en fotorreactores

Cálculo área equivalente

$$A_e = LT \cdot TV \cdot [DT + (S - DT) \cdot R]$$

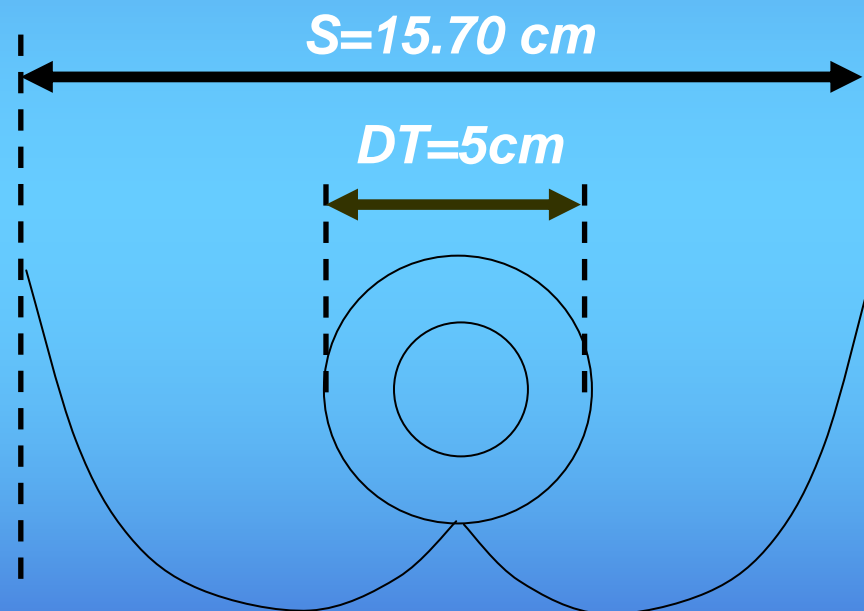
LT = Longitud del tubo

TV = Transmitancia del vidrio

DT = Diametro del tubo

S = Area del CPC

R = Reflectancia de los espejos





Radiación en fotorreactores

Area equivalente UV-A:

$$Ae(UVA) = 4 \cdot 0.975 \cdot 0.864 \cdot [0.05 + (0.157 - 0.05) \cdot 0.86] = 0.4784$$

Area equivalente UV-B:

$$Ae(UVB) = 4 \cdot 0.975 \cdot 0.428 \cdot [0.05 + (0.157 - 0.05) \cdot 0.86] = 0.2370$$

$$Ae(UVA)/\text{Area Total} = 0.4784/0.6094 = 0.7850$$

$$Ae(UVB)/\text{Area Total} = 0.2370/0.6094 = 0.3889$$

El 78% de la radiación UVA y el 39% de la radiación UVB llegan al semiconductor, siempre que los compuestos en solución no absorban radiación en estas longitudes.



FIN