

Procesamiento de Imágenes Satelitales Segunda Clase

Problemas Atmosféricos
Temporales, Geométricos
Correcciones a estos problemas

Índices calculados a partir de ND

$$IVN = (IRC - R) / (IRC + R),$$

$$\text{albedo} = 0.356 B_1 + 0.130 B_3 + 0.373 B_4 + 0.085 B_5 + 0.072 B_7 - 0.0018,$$

Sin negar la existencia y uso de índices que se calculan a partir de los ND valores digitales que entregan los satélites para diferentes bandas, Dejaremos su explicación para más adelante.

Comenzaremos dando una explicación un poco más detallada para obtener la reflectividad presentada en la clase anterior

Reflectividad de una cubierta terrestre sin considerar interacción con la atmósfera

$$L_{sen,k} = a_{0,k} + a_{1,k} * ND_k$$

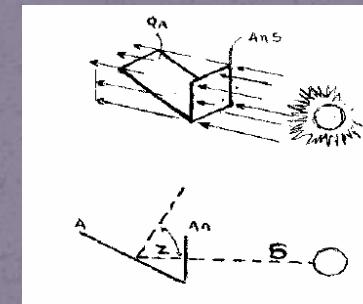
$$L_{sen,k} = \frac{E_{0,k} (\cos \theta_i) \rho_k^*}{\pi * K}$$

$$K = (1 + 0.0167 * (\operatorname{sen}(2\pi \frac{(D - 93.5)}{365})))^2$$

$$k \approx (1 + 0.033 \cos \frac{360 * n}{365})$$

$$\rho_k^* = \frac{\pi * K * L_{sen,k}}{E_{0,k} (\cos \theta_i)}$$

La relación entre las áreas normal (A_n) e inclinada (A_i) está dada por:
 $A_n/A_i = \cos Z$



$$A_n/A_i = \cos Z$$

$$A_n/A_i = Q_A / S \Rightarrow Q_A = (A_n/A_i) * S$$

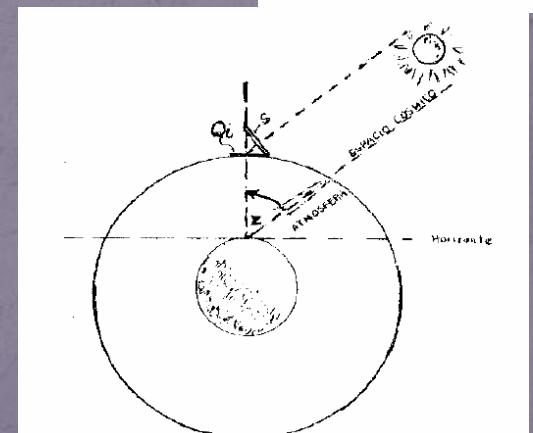
$$\text{si } A_n/A_i = \cos Z$$

$$\text{luego } Q_A = \cos Z * S$$

Sabiendo que al tope de la atmósfera:

$$S \cong 2 \text{ cal/min. cm}^2 \text{ luego}$$

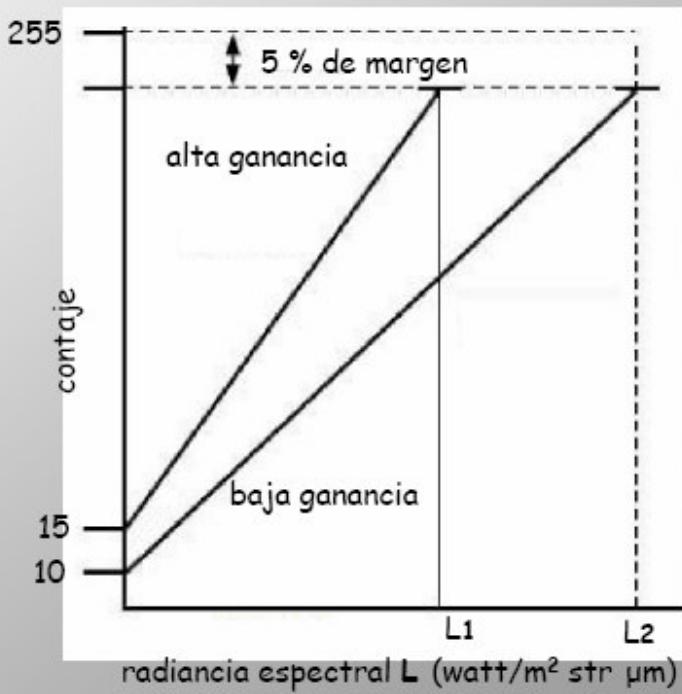
$$Q_A \cong \cos Z * 2 \text{ cal/min. cm}^2$$



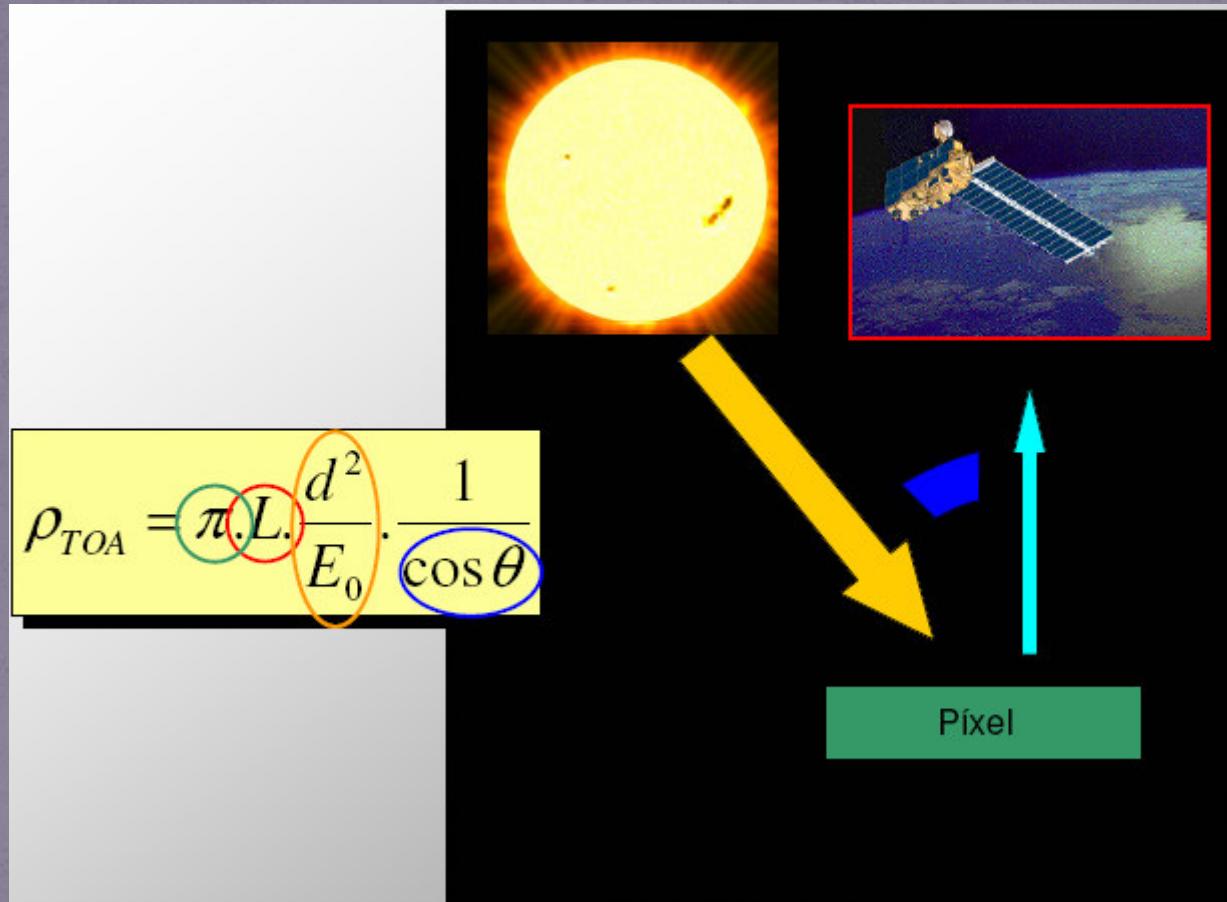
Ajuste de la calibración del sensor a los valores máximo y mínimo de la radiación que recibe

Obtención de las radiancias medidas por el sensor

La figura muestra las curvas de calibración del sensor ETM+. El mismo trabaja en dos modos de ganancia seleccionadas en forma automática de acuerdo a la época del año y a la ubicación de la escena. L1 y L2 son los valores de saturación en alta y baja ganancia respectivamente.



Detalle de la fórmula expresada la clase anterior, se reemplaza K por d²



Relación entre la magnitud ρ y la energía recibida por el sensor remoto: L

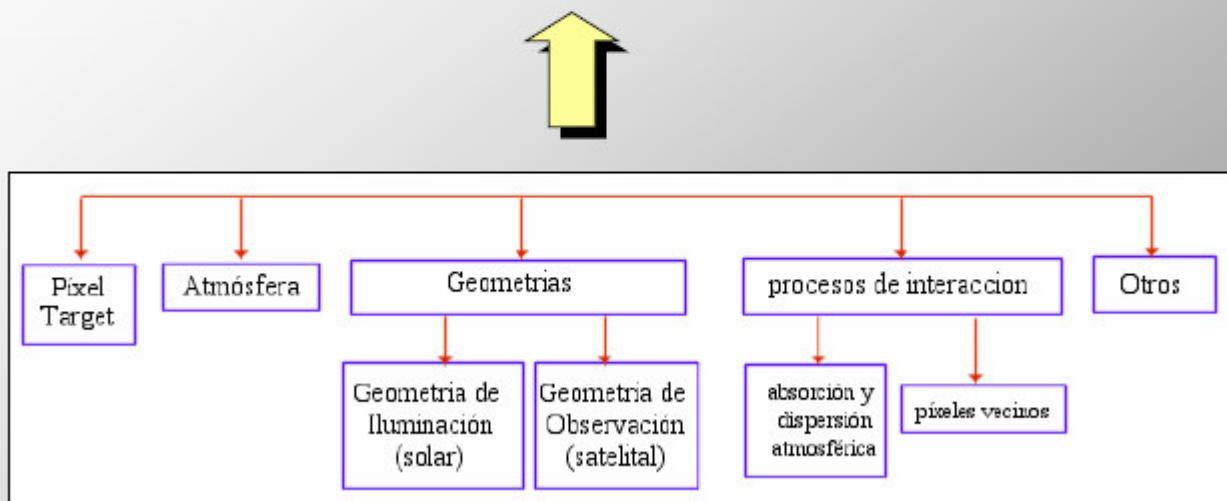
Reflectancia medida por el sensor

$$\rho = \frac{L_{SAT} \pi d^2}{E_0 \cos \theta_{sol}}$$

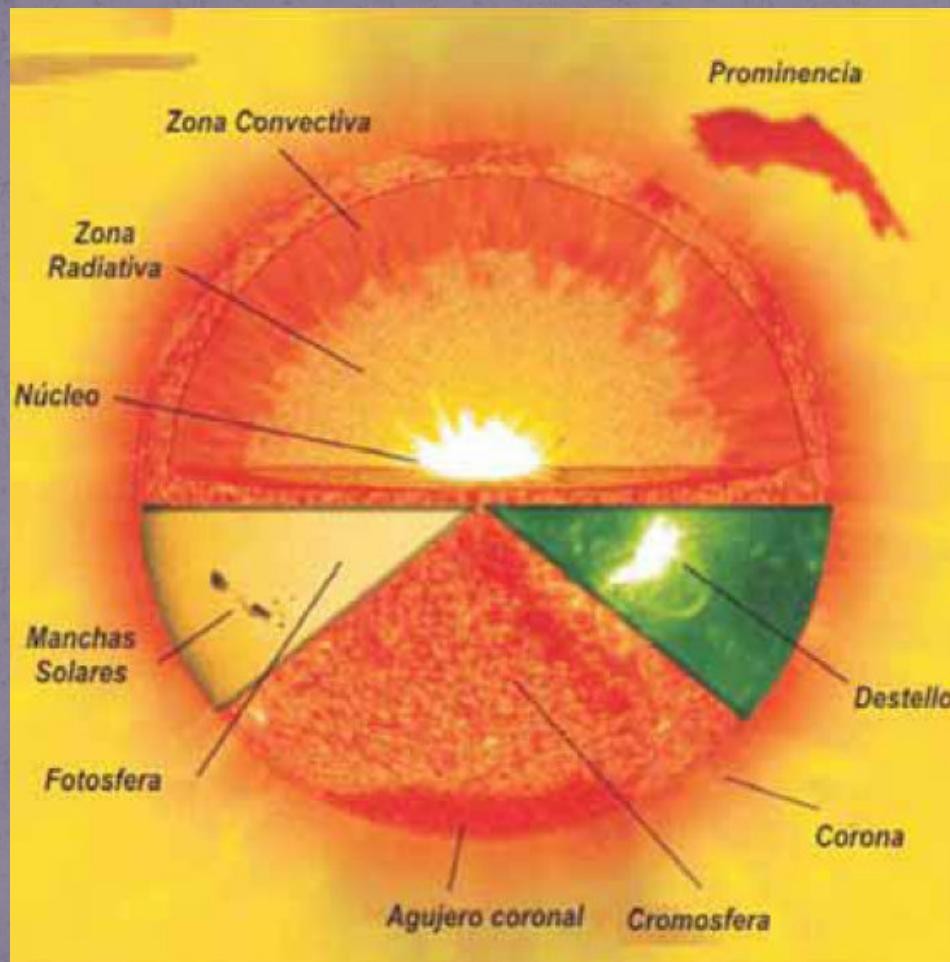
¿Qué es L_{sat} ?

$$L_{sat} = L_{atm} + L_{env} + L_{surf}$$

Magnitudes físicas: reflectancias



Estructura de la fuente de energía de la tierra: El Sol



La energía que recibe una superficie horizontal a lo largo del día fuera de la atmósfera es

$$Ra = \frac{1440}{\pi} * I_0 * [1 + 0,033 * \cos(360 * n / 365)] * [\cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega + (0,01745 * \omega * \sin \delta * \sin \varphi)] \text{ cal/cm}^2 / \text{día}$$

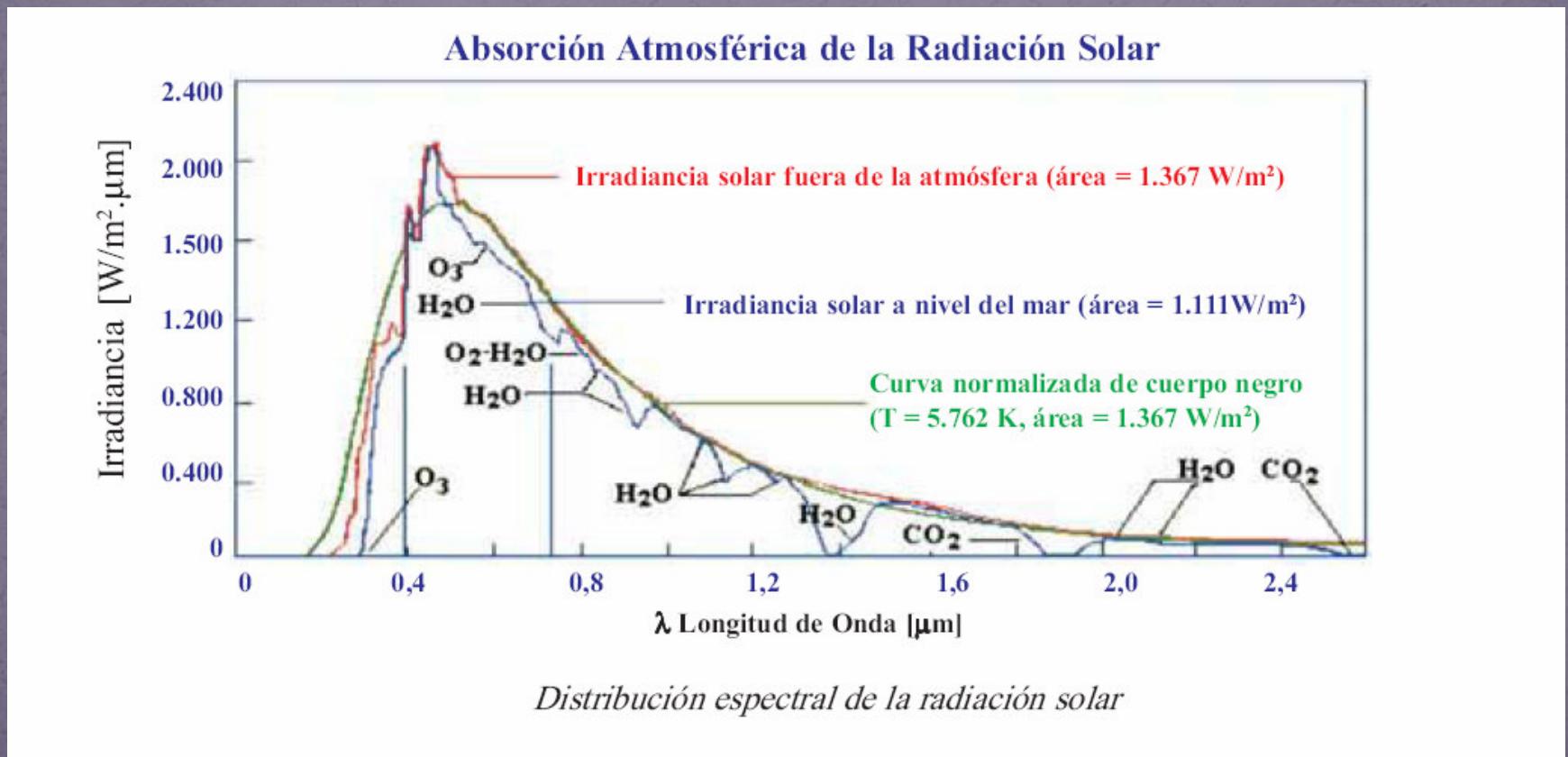
donde I_0 constante solar

δ declinación solar o época del año

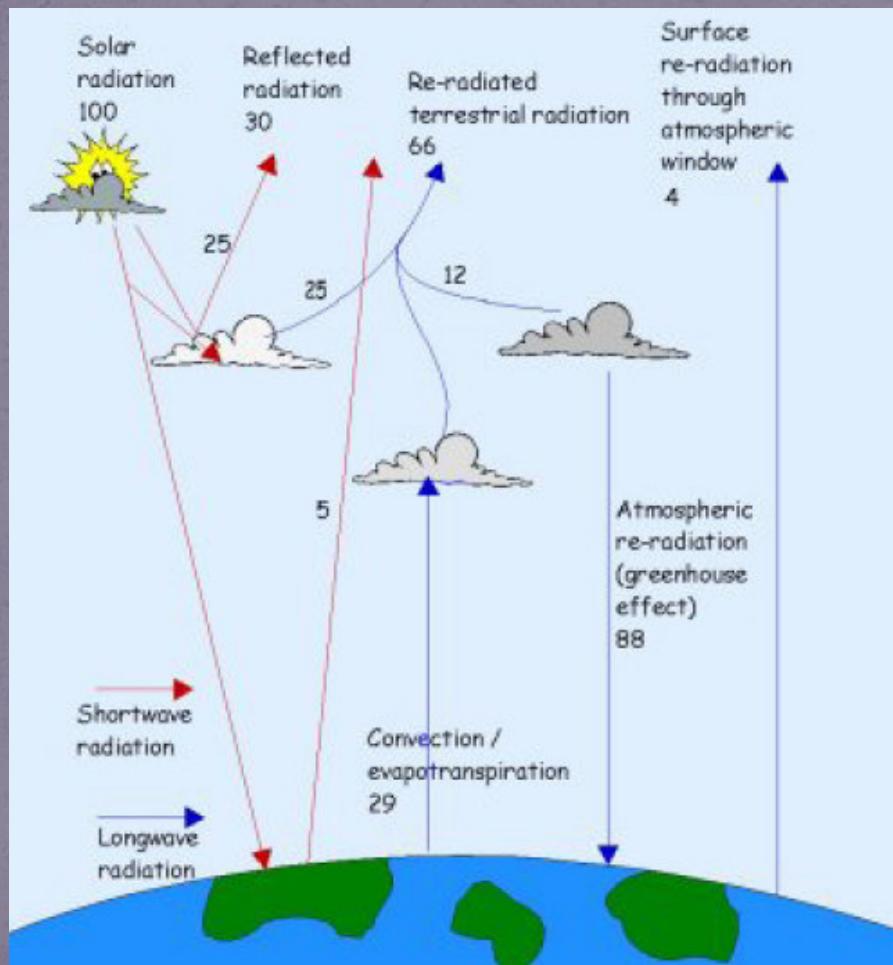
φ latitud

ω ángulo horario

Distribución espectral de la constante solar y cómo cambia al atravesar la atmósfera



Modelo elemental de radiación con atmósfera



Radiación solar que llega a la superficie terrestre

La radiación solar que llega a la superficie terrestre está atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera terrestre.

Estos procesos son:

1. Absorción selectiva por los gases y por el vapor de agua de la atmósfera.
2. Difusión molecular (o de Rayleigh), debida también a los gases y al vapor de agua.
3. Difusión y absorción por aerosoles o turbidez.

Se puede suponer que para los tres procesos se cumple la Ley de Beer; se tendrá entonces para cada longitud de onda λ y para cada altura del Sol sobre el horizonte la intensidad que se puede calcular a partir de la expresión

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp [-(K_\lambda + S_\lambda + t_\lambda) m \sec \theta]$$

donde:

K_λ = Coeficiente de absorción

S_λ = Coeficiente de difusión molecular

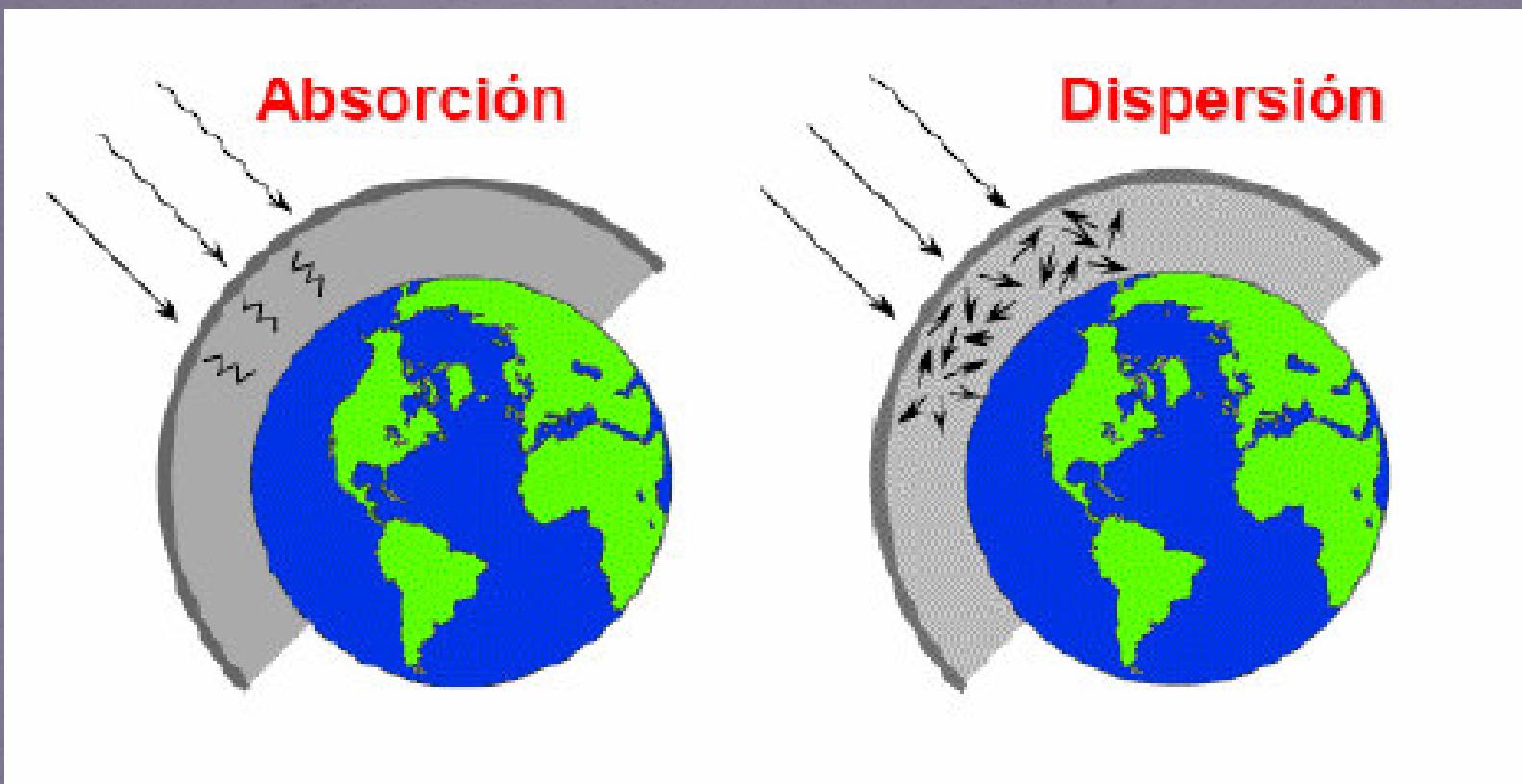
t_λ = Coeficiente de turbidez

$(I_\lambda)_0$ = Radiación fuera de la atmósfera correspondiente al intervalo $d\lambda$ considerado.

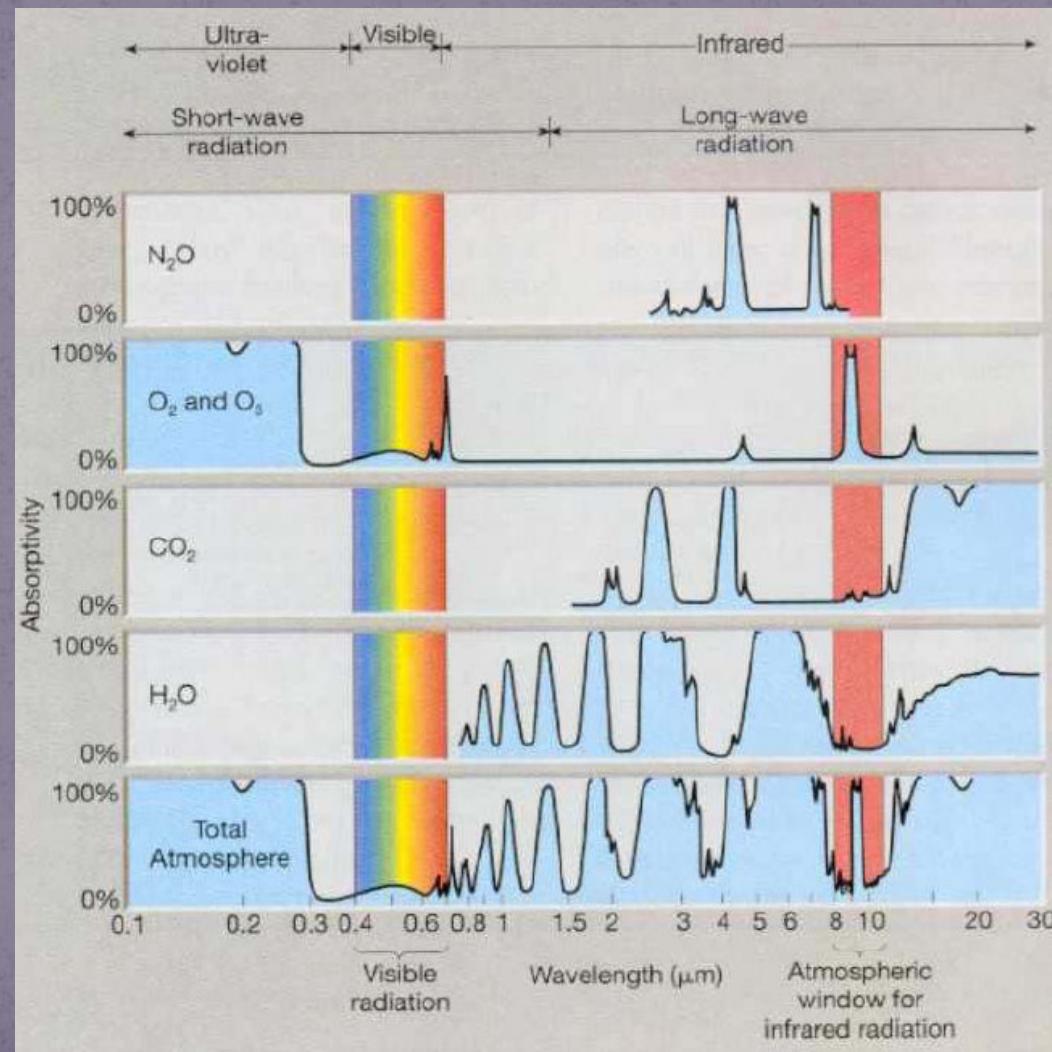
m = Espesor óptico de la atmósfera para una altura sobre el nivel del mar.

θ = Ángulo de incidencia.

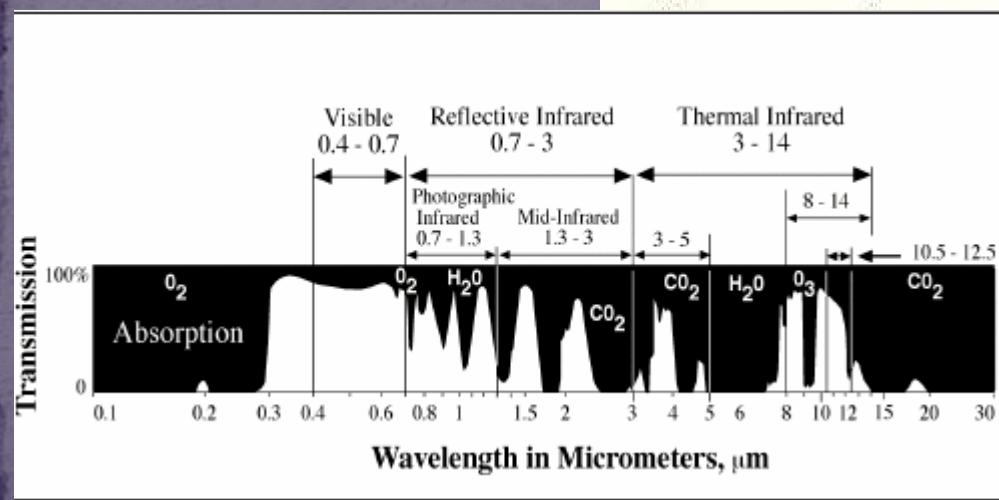
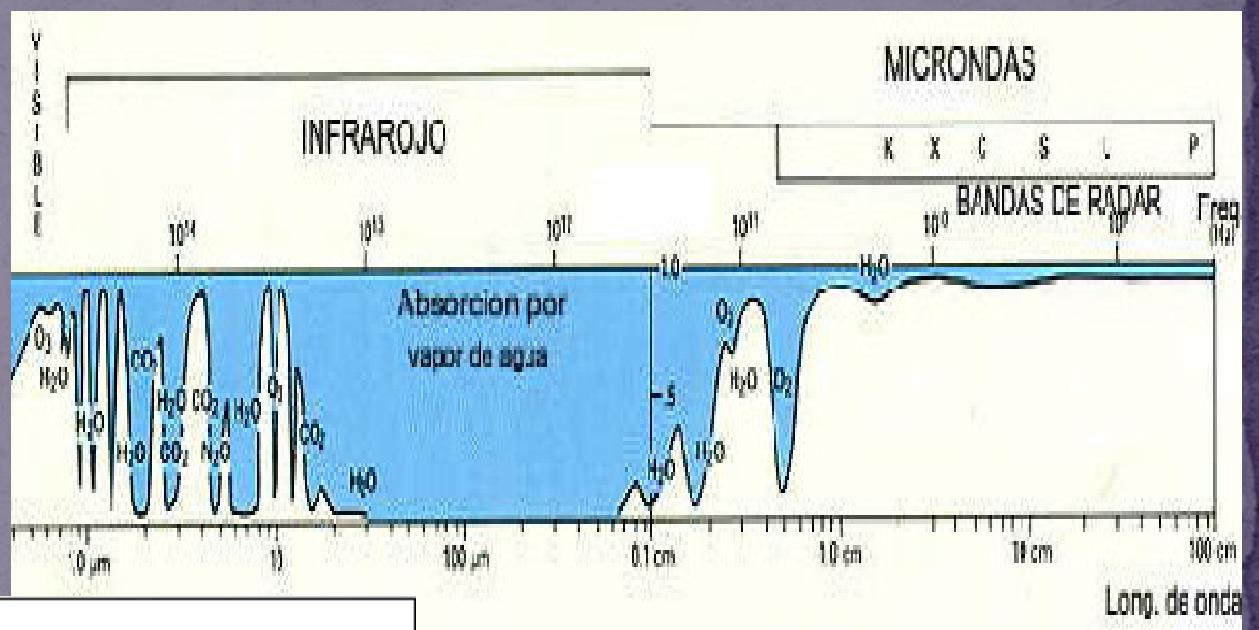
Absorción y Dispersión



Absorción selectiva de los principales gases de la atmósfera



Transmitancia de la Atmósfera



Dispersión Rayleigh: Longitud de onda menor que el tamaño de las partículas.

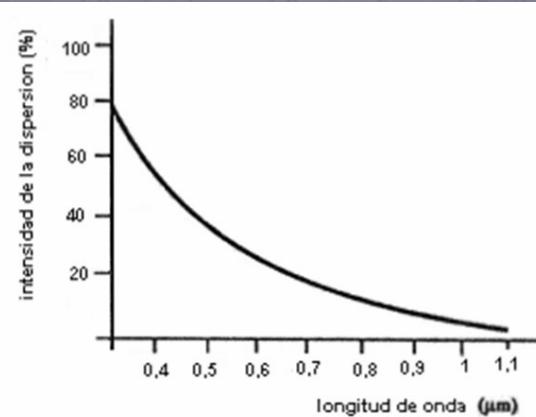
La atenuación de la intensidad de la radiación solar por difusión para un haz (de 1 cm² de sección) está dada por

$$\frac{dI_\lambda}{dx} = -S_\lambda I_\lambda$$

donde dx es la longitud del trayecto en el cual el haz se difunde y S_λ es el coeficiente de difusión. Para el aire se tiene que

$$S_\lambda = \frac{32\pi^3(n_\lambda - 1)^2}{3\lambda^4 N} \frac{\rho}{\rho_0}$$

donde N es número de moléculas en un cm³, ρ_0 es la densidad del aire en condiciones normales (1.013,3 milibares y 273 K), n_λ es el índice de refracción del aire para la longitud de onda λ , y ρ = densidad real del aire.



Dependencia de la dispersión Rayleigh de la longitud de onda

Es el responsable que veamos el cielo azul-celeste, dado que es la radiación proveniente del sol que más se dispersa en la atmósfera

Color del cielo al atardecer: Dispersión Rayleigh



Dispersión Mie

- La dispersión Mie está restringida a la atmósfera mas baja donde las partículas mas grandes son mas abundantes. (0-5 km).
- La dispersión de Mie ocurre cuando las longitudes de onda de la radiación entrante es similar al tamaño de las partículas atmosféricas (ej: aerosoles, una mezcla de gases, vapor de agua y polvo). $(\lambda \sim a)$
- Influye la regiónpectral completa desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo cercano inclusive.
- Patrones de dispersión complejos
- El efecto es un deterioro general en la calidad de la información. No depende tanto de la longitud de la onda sino de las características de la partícula.

Dispersión Mie: cielo blanco



Dispersión No Selectiva

Ocurre cuando el diámetro de las partículas atmosféricas que ocasionan dispersión (polvo o gotas de agua) son mucho mas grandes que el largo de onda ($\lambda \ll a$).

La radiación es dispersada de igual forma en todas las direcciones.

Es independiente del largo de onda. Responsable del color blanco de nubes densas y neblina que dispersan el azul, el verde y el rojo en igual proporción.

Factor de Atenuación por Turbidez

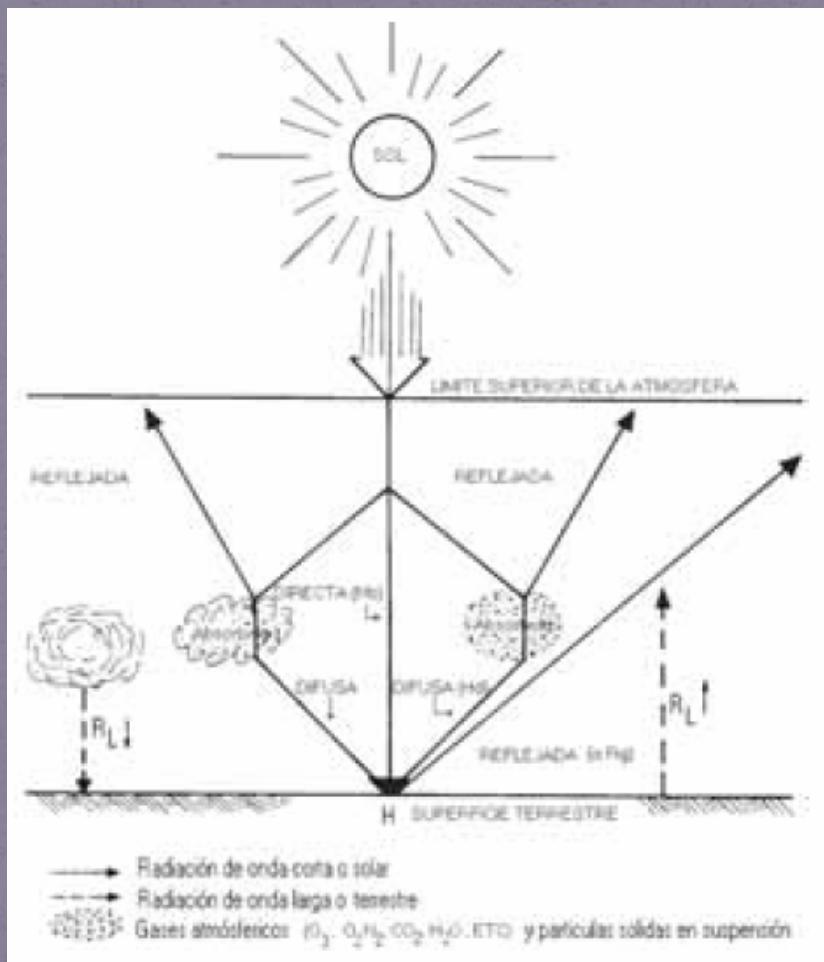
$$I = I_0 a^{mr}$$

$$a^{mr} = \exp(-\bar{S}_{\lambda g} T m_r)$$

donde $\bar{S}_{\lambda g}$ es el coeficiente medio para todas las longitudes de onda que corresponde a la atenuación debida a la difusión por los gases de una atmósfera pura y seca

T es el factor de turbidez de Linke, que se puede interpretar como el número de atmósferas puras y libres de polvo necesarias para obtener la atenuación observada.

Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre



Transmitancia de la atmósfera terrestre

Transmitancia de la atmósfera terrestre (Γ)

Los procesos de atenuación de la radiación solar en la atmósfera también pueden ser evaluados en forma global mediante el llamado coeficiente de extinción de la atmósfera (σ), donde:

$$\Gamma = K T = e^{-\int \sigma ds}$$

Para una atmósfera pura ideal $\Gamma = 1$. La intensidad se calcula mediante la ecuación $I = I_0 \Gamma$, es decir,

$$I = I_0 e^{-\int \sigma ds}$$

Modelo simple de transferencia radiativa (1)

La irradiancia solar o constante solar incluyendo fotones de todas las longitudes de onda es $E_{\text{sun}} = 1367 \text{ W m}^{-2}$

Otro atributo cómodo de la irradiancia solar es que como el sol está lejos, podemos considerar los rayos solares paralelos y tendríamos la misma irradiancia al tope de la atmósfera que en la superficie terrestre, pero...

la atmósfera altera la radiación solar por absorción y scattering . Esto produce una disminución de la radiación solar incidente y genera radiación que viene de otras direcciones (luz del cielo)(E_{difusa}).

- Calculemos primero la disminución en la energía solar incidente para lo cual podemos utilizar la **ley de Beer**

$$E = E_0 e^{-ar}$$

La cantidad de radiación dispersada (en cualquier dirección) se puede describir por el coeficiente de scattering b. La atenuación total c es la suma:

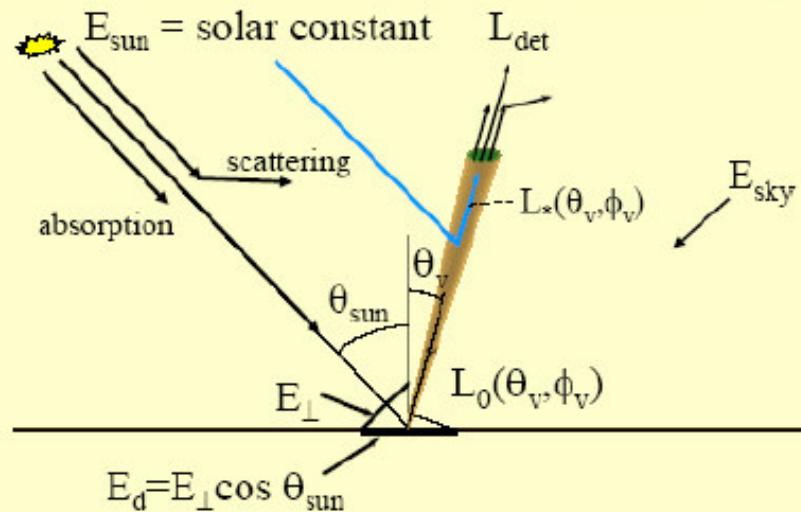
$$c = a + b$$

Y la atenuación del haz está dada por

$$E = E_0 e^{-cr}$$

Modelo simple de transferencia radiativa (2)

¿Qué llega al blanco?



Si c_{atm} representa el coeficiente de atenuación promedio de la atmósfera, es posible expresar la irradiancia solar que incide en una superficie perpendicular a la dirección de la radiación como

$$E_{\text{perp.}} = E_0 e^{-c_{\text{atm}} z \sec \theta_{\text{sun}}}$$

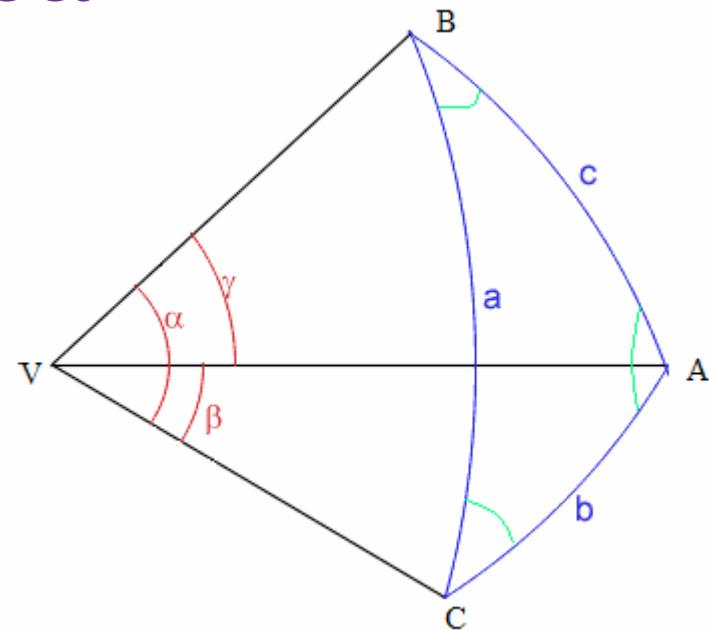
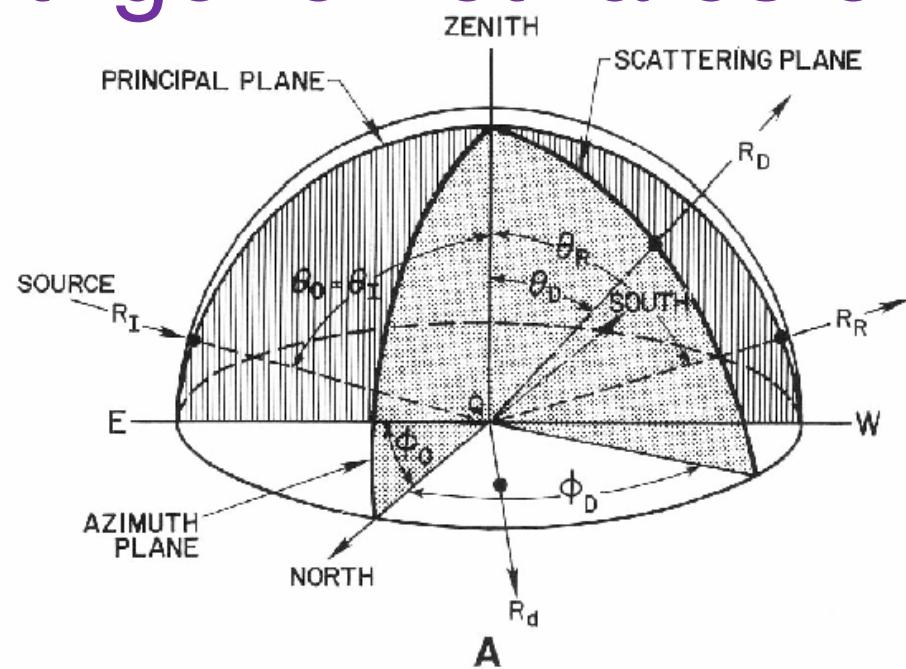
$$E_{\text{perp.}} = E_0 e^{-\tau \sec \theta_{\text{sun}}}$$

τ (espesor óptico de la atmósfera en la dirección vertical)

$$E_d = E_0 \cos \theta_{\text{sun}} T + E_{\text{sky}}$$

Donde T es la transmitancia atmosférica del sol al blanco.

Modelo del Sensor y algo de trigonometría esférica



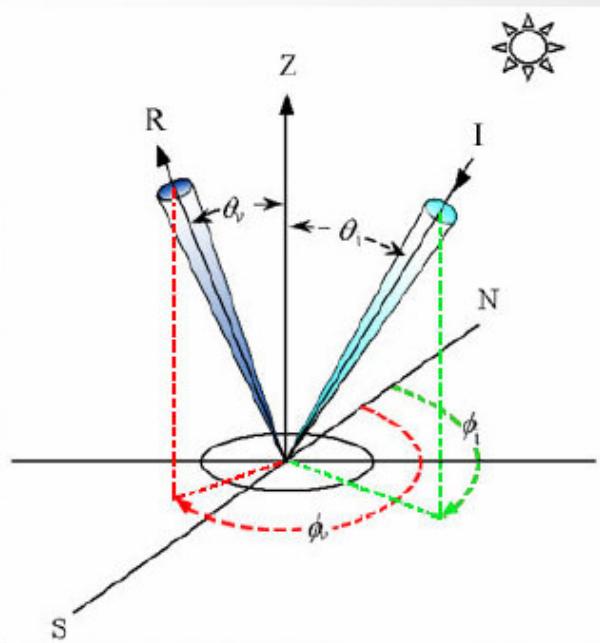
$$a = (VC) 2 \pi \alpha / 360 \quad b = (VA) 2 \pi \beta / 360 \quad c = (VB) 2 \pi \gamma / 360$$

$$(\sin a)/(\sin A) = (\sin b)/(\sin B) = (\sin c)/(\sin C)$$

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a$$

Geometría de iluminación y observación

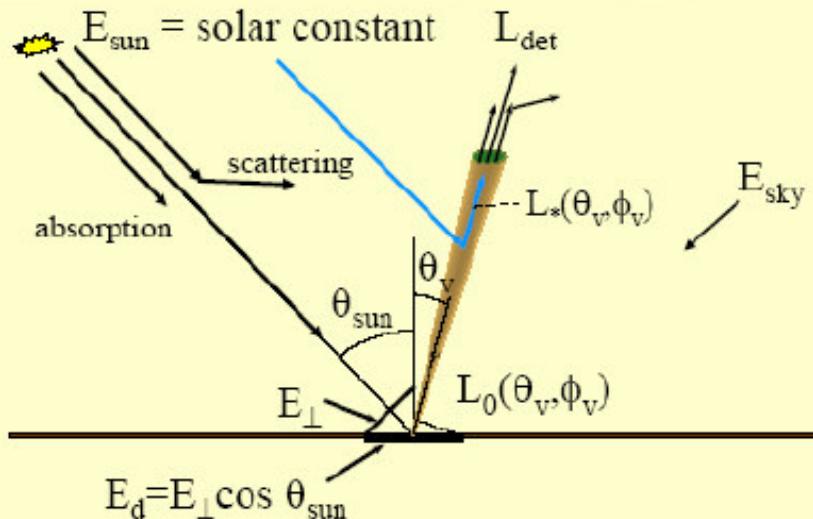


La geometría de iluminación y observación se describe con cuatro ángulos básicos: los ángulos cenitales del sol y del sensor y los ángulos acimutales del sol y del sensor.

➤ El ángulo cenital θ , entre el nadir y la dirección de iluminación. Varía entre 0° y 90° . El ángulo de elevación del sol es $(90 - \theta)$.

➤ El ángulo ϕ azimutal entre el Norte (en el meridiano local) y su proyección en la superficie terrestre. Varía entre 0° y 360° .

Modelo simple de transferencia radiativa (3)



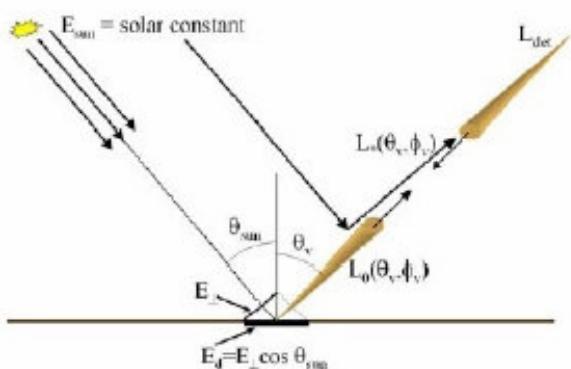
Si conocemos la respuesta del blanco

$$R(\theta_{\text{sun}} \varphi_{\text{sun}}, \theta_{\text{view}} \varphi_{\text{view}})$$

Podemos escribir la radiancia saliente como

$$L(\theta_{\text{view}} \varphi_{\text{view}}) = R(\theta_{\text{sun}} \varphi_{\text{sun}}, \theta_{\text{view}} \varphi_{\text{view}}). (E_0 \cos \theta_{\text{sun}} T + E_{\text{sky}})$$

Modelo simple de transferencia radiativa (4)

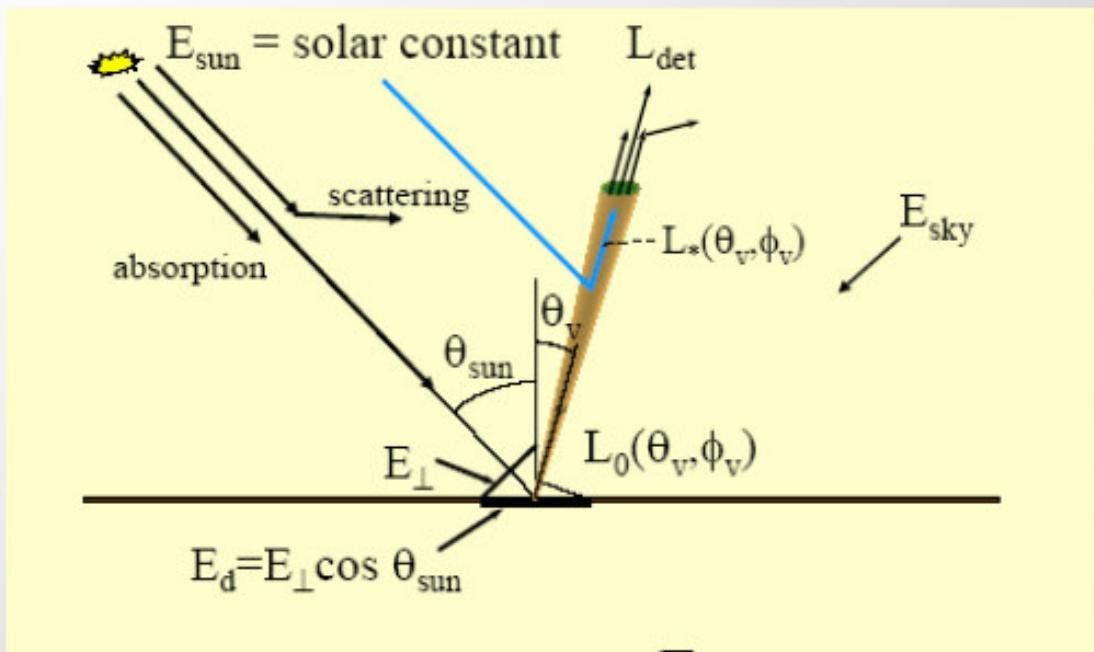


La radiancia reflejada se propaga a través de la atmósfera hacia el detector con un factor de transmisión

$$T_{sensor} = e^{-\tau \sec \theta_{view}}$$

Pero hay también una contribución de la radiancia dispersada en la atmósfera que entra en el campo de visión del sensor. Esta radiación denominada *path radiance*, L_p , nunca llega al suelo o si lo hace, es dispersada en la dirección del sensor desde afuera del campo de visión del sensor. Se llama "path radiance" (camino óptico) porque se produce a lo largo del camino de visualización.

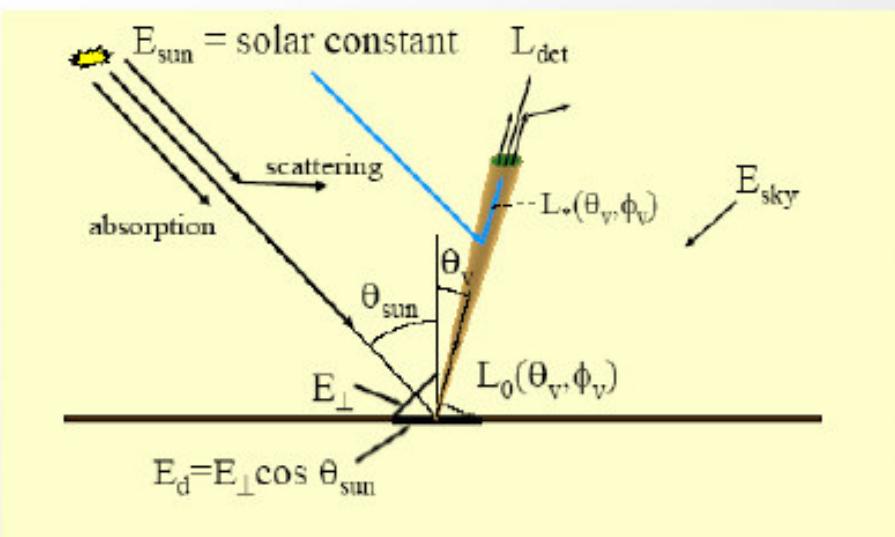
Finalmente la radiancia total en el detector es:



$$E_d$$

$$L_{sensor}(\theta_{view}, \varphi_{view}) = \frac{\rho}{\pi} \underbrace{(E_0 \cos \theta_{sun} T_{sun} + E_{sky})}_{L_0(\theta_v, \varphi_v)} \cdot \cos \theta_{view} T_{sensor} + L_*$$

Modelo simple de transferencia radiativa (6)



$$L_{\text{sensor}}(\theta_{\text{view}}, \phi_{\text{view}}) = \rho / \pi (E_0 \cos \theta_{\text{sun}} T_{\text{sun}} + E_{\text{sky}}) \cdot \cos \theta_{\text{view}} T_{\text{sensor}} + L_*$$

$$\rho_{\text{superficie}} = \frac{(L_{\text{sensor}}(\theta_{\text{view}}, \phi_{\text{view}}) - L_*) \pi / (\cos \theta_{\text{view}} T_{\text{sensor}})}{(E_0 \cos \theta_{\text{sun}} T_{\text{sun}} + E_{\text{sky}})}$$

Esta ecuación provee algunas claves para optimizar la observación.

Nuestro interés es obtener información acerca del blanco, o sea determinar la reflectancia ρ a partir de las observaciones. Queremos

minimizar el “path radiance” y la pérdida por transmisión. Esto se puede hacer si el ángulo de observación es pequeño cerca del nadir
 $\theta_v \approx 0$.

Radiancia medida por el sensor

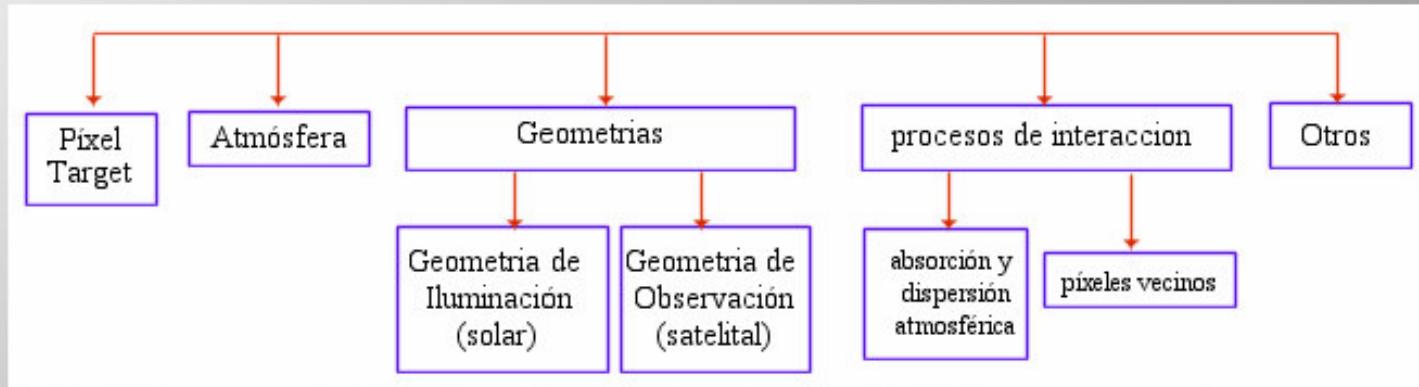
Atmósfera

blanco

Geometría de observación y la atmósfera

$$\rho_{superficie} = \frac{(L_{sensor}(\theta_{view}, \varphi_{view}) - L_*)\pi / (\cos \theta_{view} \cdot T_{sensor})}{(E_0 \cos \theta_{sun} T_{sun} + E_{sky})}$$

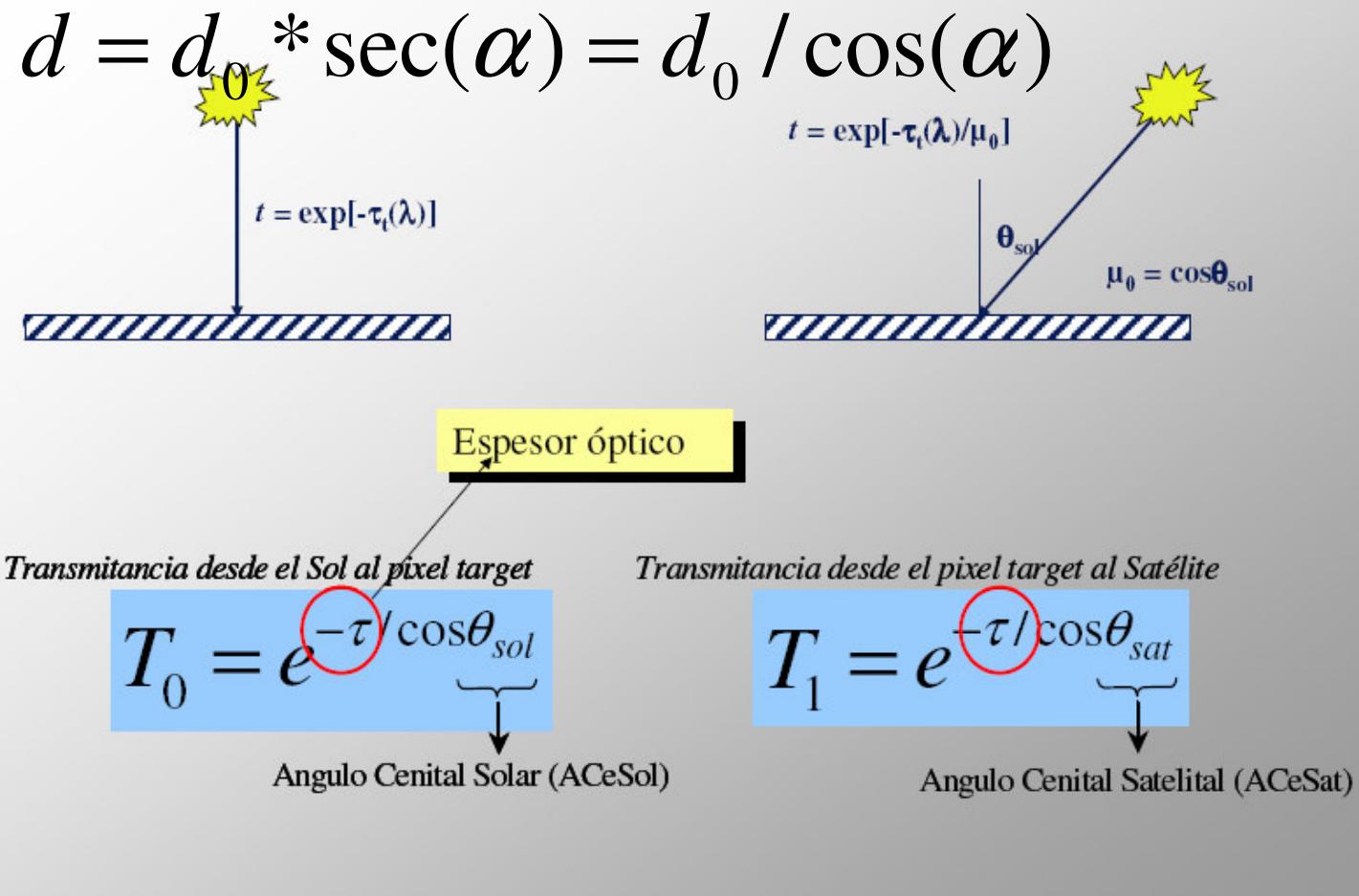
Irradiancia incidente, geometría de iluminación, atmósfera



$$\rho_{superficie} = \frac{(L_{sensor}(\theta_{view}, \varphi_{view}) - L_*)\pi / (\cos \theta_{view} \cdot T_{sensor})}{(E_0 \cos \theta_{sun} T_{sun} + E_{sky})}$$

$$\rho_{toa} = \frac{L_{sensor}\pi}{\frac{E_0}{d^2} \cos \theta_{sun}}$$

El camino avanzado atravesando al atmósfera es el espesor de la atmósfera dividido el coseno del ángulo que forma la atmósfera con el zenith



Correcciones radiométricas

obtención de las radiancias medidas por el sensor a partir de los contajes digitales (DN)

correcciones atmosféricas: obtención de radiancias de superficie

Cálculo de reflectancias: **magnitud física de interés**

Obtención de las radiancias calibradas medidas por el sensor

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calMAX}} \right) Q_{cal} + LMIN_{\lambda}$$

Donde

L_{λ} = Radiancia espectral en el sensor [W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹]

Q_{cal} = Valor del pixel en conteo

Q_{calMIN} = Valor mínimo del pixel en conteo min(Q_{cal})

Q_{calMAX} = Valor máximo del pixel en conteo max(Q_{cal})

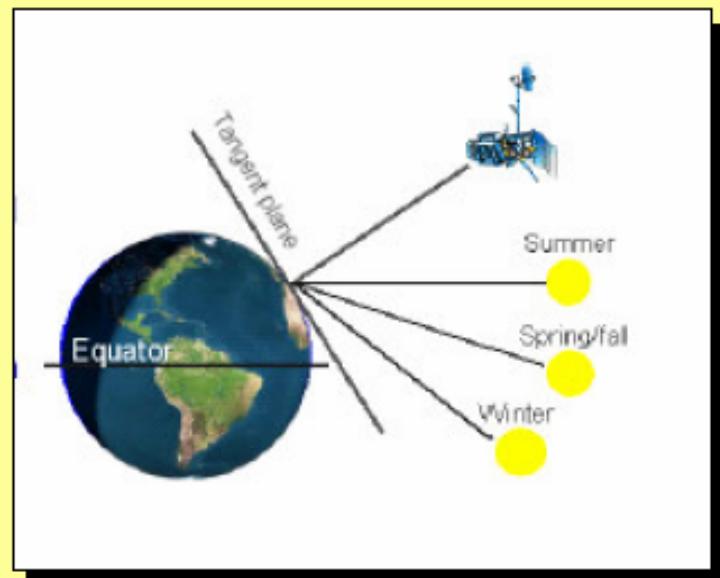
$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral escalada a Q_{calMIN} [W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹]

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral escalada a Q_{calMAX} [W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹]

Efectos por la iluminación del sol

Posición del sol:

- Elevación del sol (ángulo del sol)
- Distancia Sol-Tierra



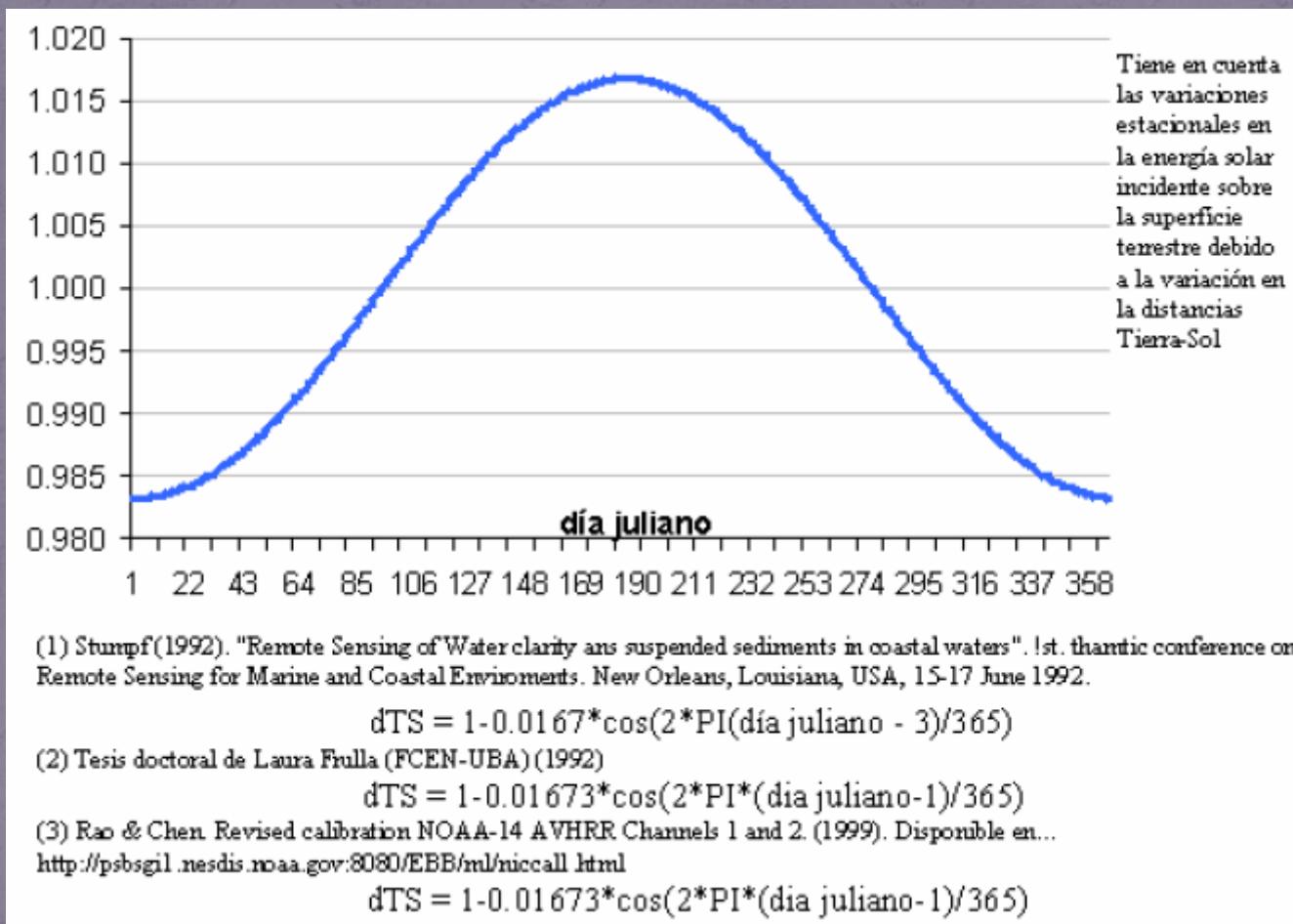
Correcciones de elevación:

- División de cada pixel por el seno del ángulo de la elevación solar para una fecha y ubicación en particular por bandapectral

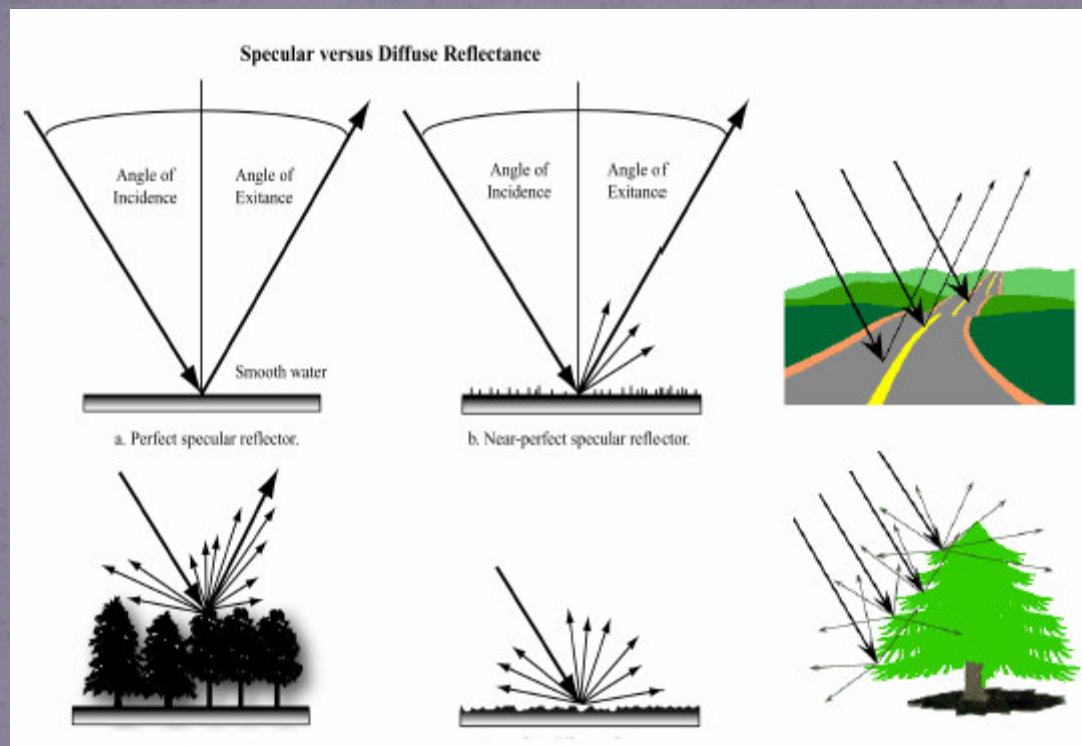
Corrección de distancia:

- La radiación del sol disminuye con el cuadrado de la distancia.

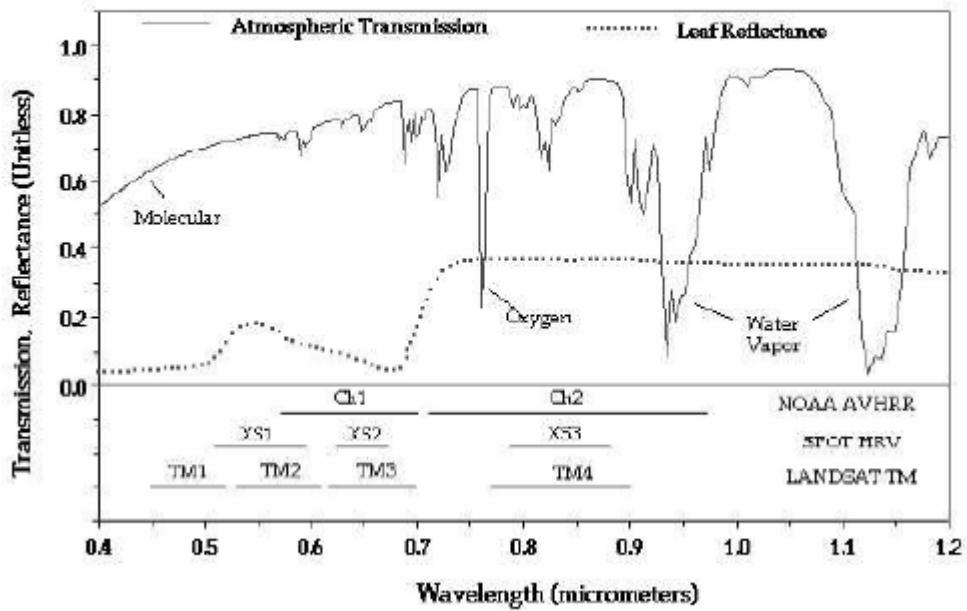
Variación de la distancia tierra - sol



Reflectancia Difusa



Use of Multi-Sensor Remote Sensing to Monitor Biospheric Processes



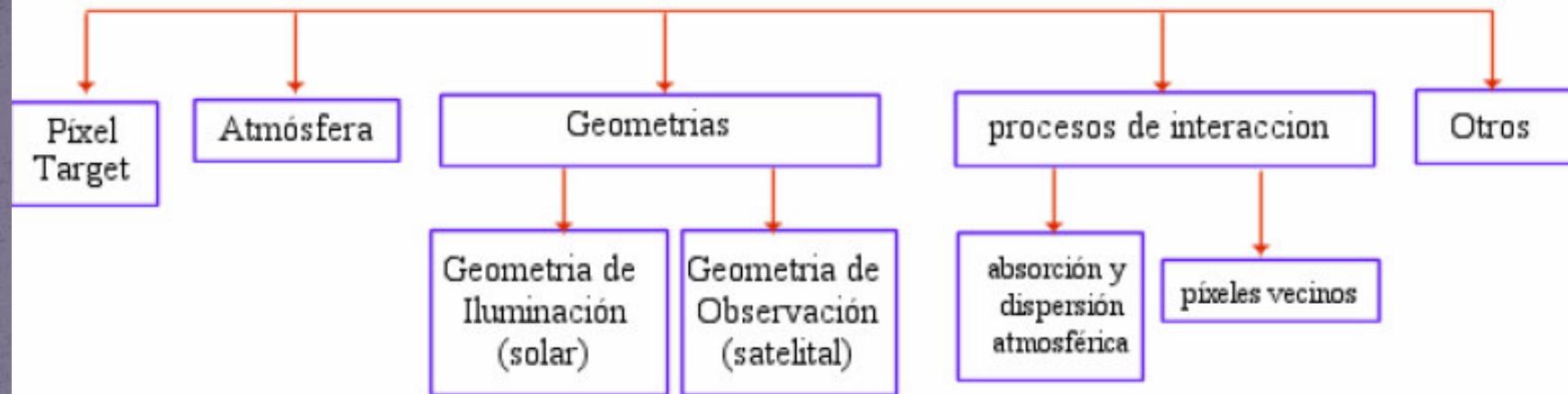
Reflectancia medida por el sensor

$$\rho = \frac{L_{SAT} \pi d^2}{E_0 \cos \theta_{sol}}$$

¿Cuál es la contribución de cada uno de los componentes de la radiancia en la reflectancia total medida por el sensor?

$$L_{sat} = L_{atm} + L_{env} + L_{surf}$$

Interacción de la radiación EM con el sistema tierra-atmósfera



La atmósfera afecta la radiancia del blanco de dos maneras:

- 1) atenúa, reduce la energía que ilumina el objeto y la que se refleja del objeto (absorción).
- 2) actúa también como un reflector, agregando una radiancia atmosférica (dispersión, **path radiance**).

Estrategias sencillas para la corrección atmosférica

Los modelos sencillos de corrección atmosférica asumen lo siguiente:

- interacciones simples y no múltiples.
- la contribución de la atmósfera como reflector (**path radiance**) se añade a la del blanco.
- la atmósfera como atenuador se expresa mediante un factor multiplicativo

Por lo tanto

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{blanco}} T + L_p$$



Corrección atmosférica parcial:

Calculo de Path radiance (moléculas y aerosoles)

Corrección Rayleigh (moléculas)

$$L_{\text{total}} = L_{\text{blanco}} T + L_p$$

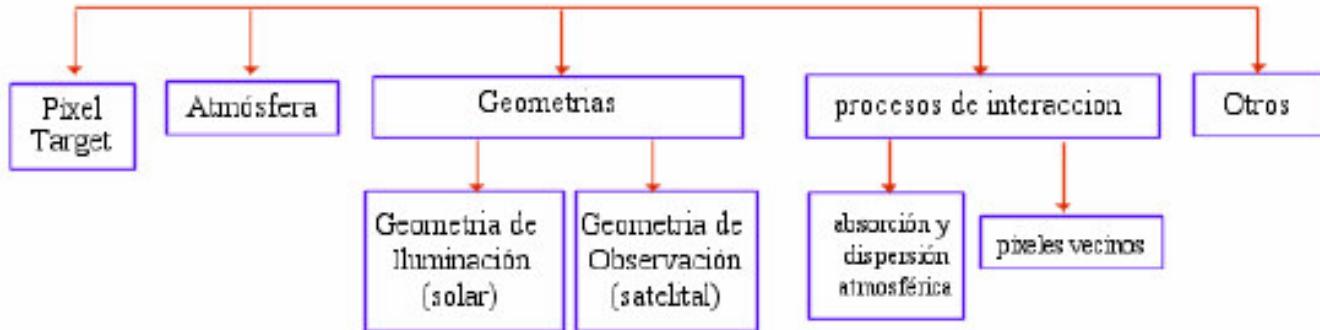
$$T = 1$$

$$L_{\text{blanco}} = L_{\text{total}} - L_p$$

La estrategia es calcular el path radiance. Por qué?

La teoría muestra que el efecto del path radiance (aerosoles + moléculas) es dominante en el visible y tiende a cero para las bandas del infrarrojo. Lo opuesto sucede con la atenuación atmosférica. Es mínima en el visible y aumenta en el infrarrojo.

Se hace una corrección parcial porque es posible obtener parte del path radiance teóricamente y/o de datos de la imagen.



Asunción del modelo simplificado

- ❖ Sin atmósfera:

- Transmisividad plena(=1)

- ❖ Observación vertical

- ❖ Sin topografía

- ❖ Lambertiano

$$\rho_{TOA} = \frac{L_{SAT} \pi d^2}{E_0 \cos \theta_{sol}}$$

Aumentamos la radiación incidente agregando la difusa que entrega la atmósfera

➤ Rayo incidente:

$$E_{\text{sup},\lambda} = E_{\text{sol},\lambda} \cos \theta_{\text{sol}} \tau_{\lambda,\text{sol}} + E_{d,\lambda}$$

➤ Rayo reflejado:

$$L_{\text{sat},\lambda} = L_{\text{sup},\lambda} \tau_{\lambda,\text{sat}} + L_{a,\lambda}$$

➤ Efecto de la atmósfera:

$$\tau_{\lambda,\text{sat}} = \frac{\exp(-\tau_{\text{sat,gases},\lambda} - \tau_{a,\lambda} - \tau_{r,\lambda})}{\cos \theta_{\text{sat}}}$$

$$\tau_{\lambda,\text{sol}} = \frac{\exp(-\tau_{\text{sol,gases},\lambda} - \tau_{a,\lambda} - \tau_{r,\lambda})}{\cos \theta_{\text{sol}}}$$

Cálculo de reflectividades: Modelo Avanzado

$$\rho = \frac{d^2\pi((L_{sen,\lambda} - L_{a,\lambda})/\tau_{\lambda,sat})}{E_{sol,\lambda} \cos \theta_{sol} \tau_{\lambda,sol} + E_{d,\lambda}}$$

➤ Asunciones:

- Sin topografía
- Lambertiano

Alternativas al modelo avanzado

Cálculo de Path radiance Rayleigh

Corrección atmosférica parcial

- Modelo de dispersión simple
- Calcula Rayleigh y aerosoles por separado
- Calcula la atenuación de la radiancia Rayleigh
- Las hipótesis sobre la geometría de observación (ángulo cenital y azimutal del sensor) son claves en la diferencia entre el cálculo para SACC y TM (nadir viewing)
- La fórmula propuesta es sencilla.
- Se ingresan las transmitancias de la atmósfera

Corrección por efecto Rayleigh

$$\rho = \frac{d^2 \pi (L_{sen,\lambda} - L_{Rayleigh,\lambda})}{E_{sol,\lambda} \cos \theta_{sol}}$$

donde

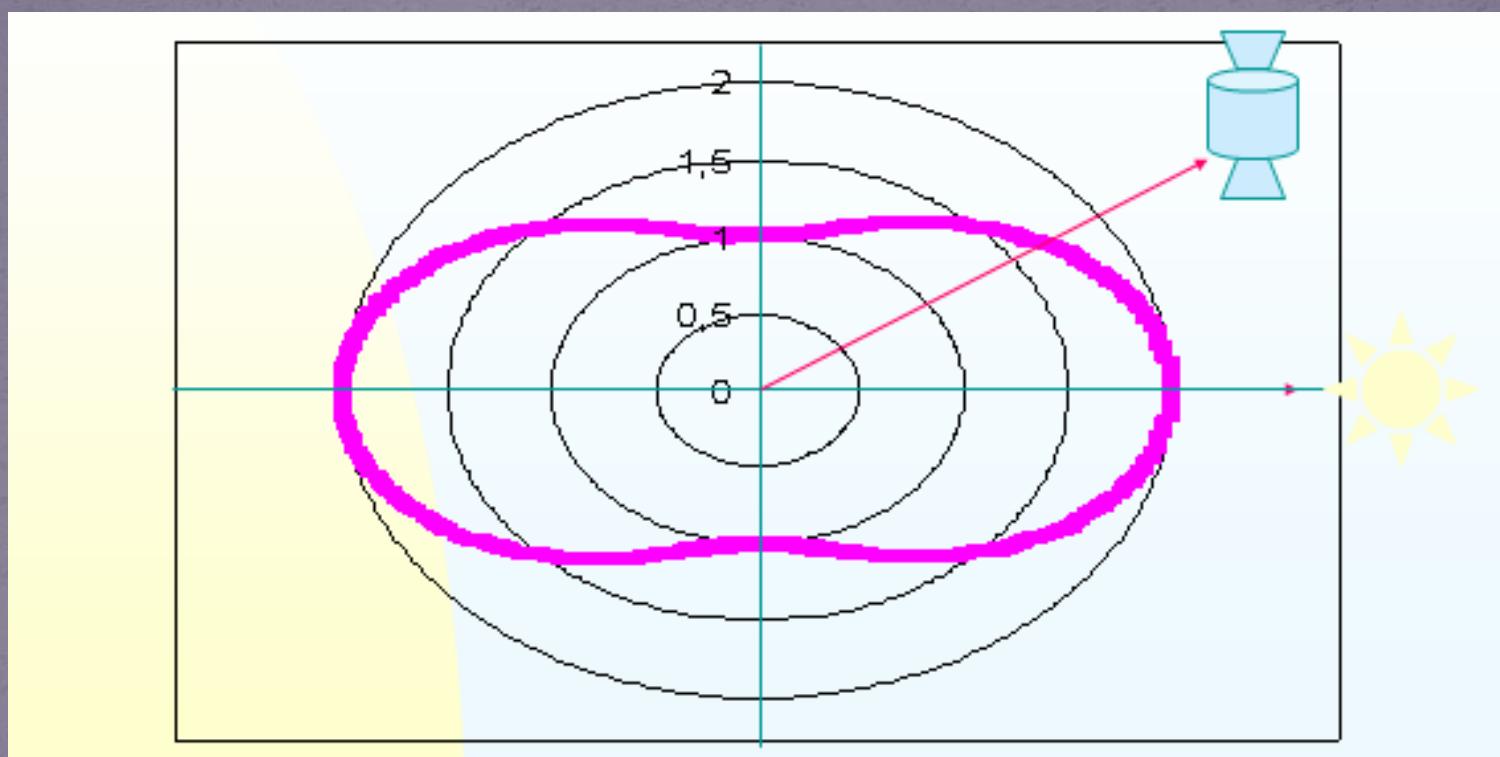
$$d = 1 - 0.0167 * \cos\left(\frac{2\pi(día juliano - 3)}{365}\right)$$

Radiación Rayleigh

$$I_{disp,k} = a \frac{N_0 V^2}{R^2 \lambda^4} I_{0,k} (1 + \cos^2(\psi))$$

- a: Coeficiente de heterogeneidad del medio
- N_0 : Número de partículas por unidad de volumen
- V_0 : Volumen promedio de las partículas
- R : Distancia entre el volumen difusor y el satélite
- I_0 : Intensidad de la radiación incidente
- ψ : Ángulo entre el rayo incidente y el dispersado

Influencia del ángulo de Dispersión Rayleigh



$$\frac{dI}{dx} = -S_{fen} I$$

$$\frac{dI}{I} = -S_{fen} dx$$

Integrando

$$\ln \left[\frac{I_s}{I_i} \right] = -S_{fen} x$$

$$\left[\frac{I_s}{I_i} \right] = \exp^{-S_{fen} x}$$

Ángulos de scattering:

$$\rightarrow \cos \psi_{\pm} = \pm \cos \theta_{Sat} \cos \theta_{Sol} - \sin \theta_{Sat} \sin \theta_{Sol} \cos(\phi_{Sat} - \phi_{Sol})$$

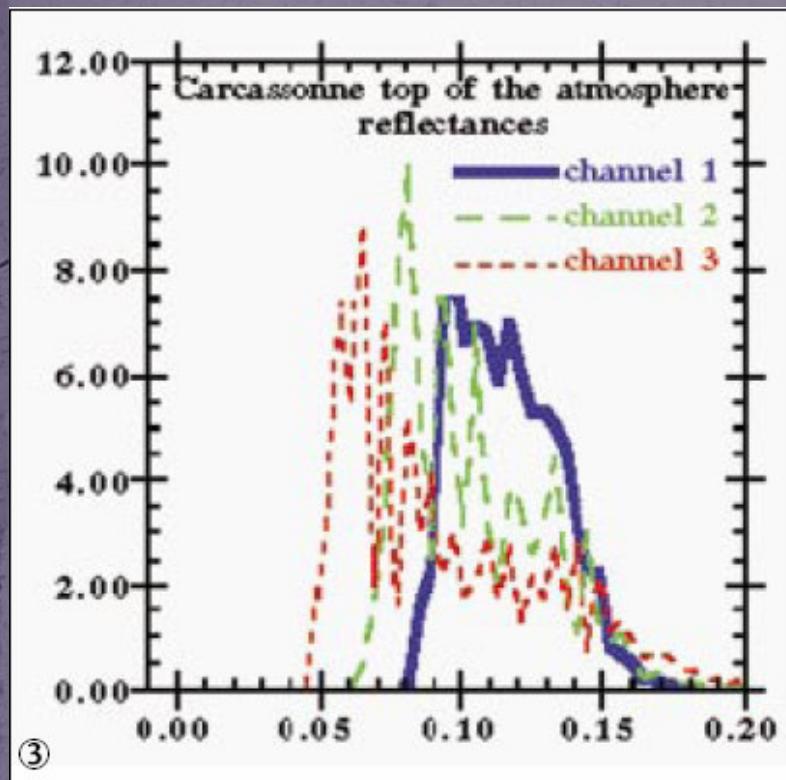
Función de fase de Rayleigh:

$$P(\psi_{\pm}) = \frac{3}{4} \left(1 + \cos^2 \psi_{\pm} \right)$$

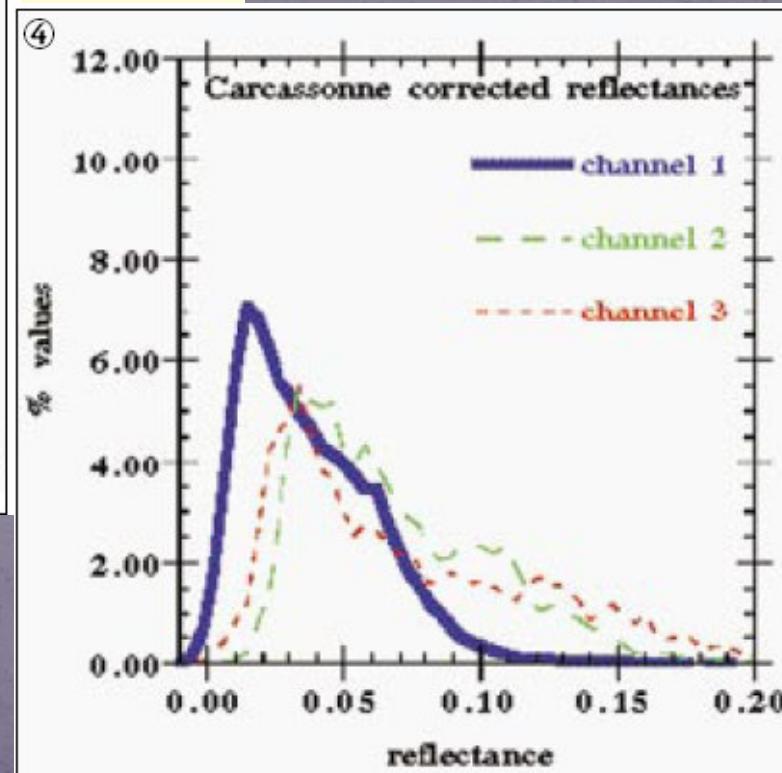
Radiancia Rayleigh:

$$L_r = \frac{E_0 \tau_r(\lambda)}{4\pi d^2 \cos \theta_{Sat}} \exp\left(-\tau_r(\lambda) / \cos \theta_{Sat}\right) \exp\left(-\tau_r(\lambda) / \cos \theta_{Sol}\right) (P(\psi_-) + 0.052 P(\psi_+))$$

Corrección de valores de reflectancia por efecto Rayleigh



Histograms of data taken from the first three TM channels before atmospheric correction.



Histograms of the data taken from the first three TM channels after atmospheric correction.

Imágenes corregidas por efecto Rayleigh

Surface reflectance colour composite produced from bands 3, 2 and 1 data of Landsat-5 TM, acquired at Fucino on 1 July 1994.

