

PRINCIPIOS E APLICAÇÕES DA DETECÇÃO REMOTA



Princípios Físicos da Deteção Remota

Chapter 3 – Physical Principles of Remote Sensing

- Características da radiação eletromagnética
- Equações de Maxwell
- Polarização das ondas
- Interferência
- Quantidades radiométricas
- Interação da radiação com a matéria
- Radiação Térmica
- Fontes de radiação eletromagnética
- Radiação Solar
- Interação com a atmosfera
- Conversão DN para radiância



Electromagnetic radiation characteristics

In physics, radiation is the emission or transmission of energy in the form of waves or particles through space or through a material medium

We are going to address systems based on electromagnetic radiation

Modelo das Partículas (Planck)

A radiação é transportada por fotões, ou quanta, que viajam à velocidade da luz e cuja energia é proporcional à frequência de oscilação.

$$Q = h\nu$$



$$c = \lambda\nu$$

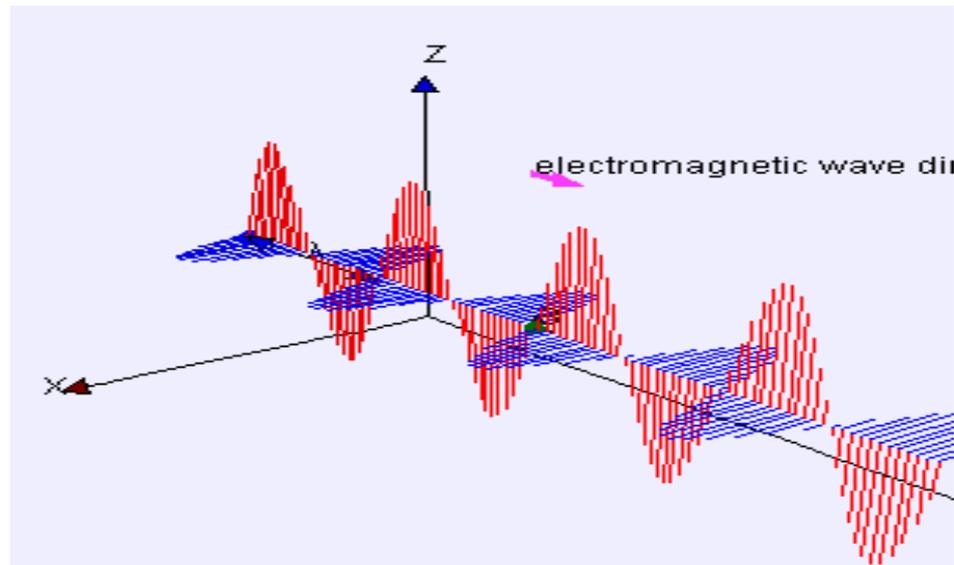


$$Q = \frac{hc}{\lambda}$$

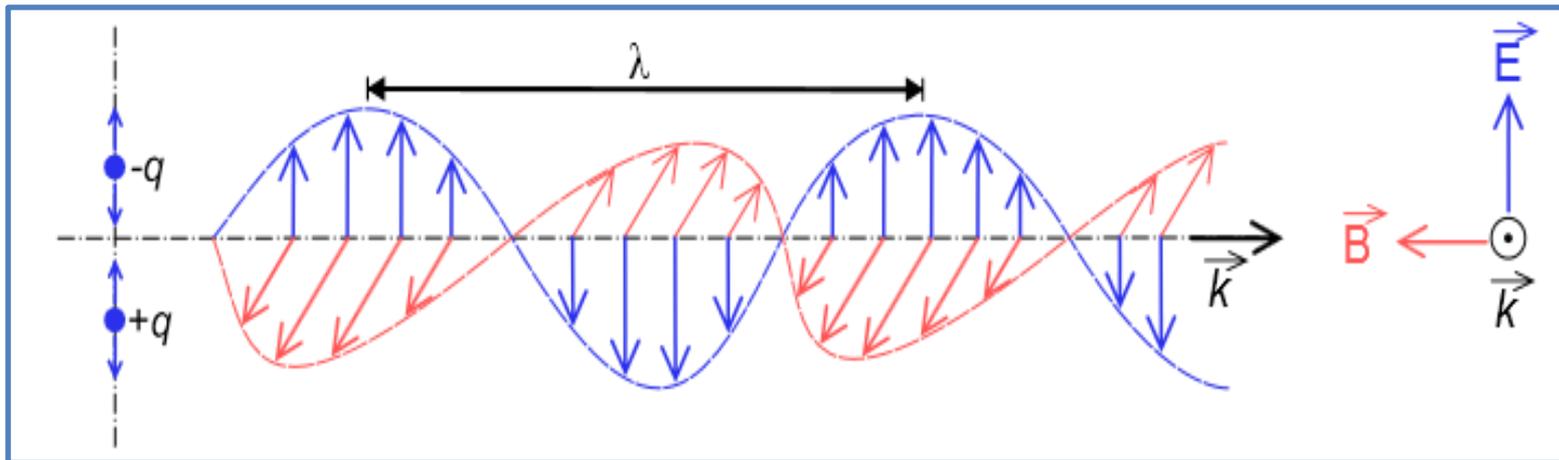
Q é a energia de um quantum (em Joules), h a constante de Planck (6.626×10^{-34} J.s)
 ν a frequência em Hz (Hertz) e c a velocidade da luz.

Modelo das Ondas

A teoria das ondas postula que a radiação electromagnética é um processo ondulatório composto por um campo eléctrico e um campo electromagnético perpendiculares entre si e à direcção de propagação.



Electromagnetic radiation characteristics



E : campo eléctrico; **B** : campo magnético; **k** : deslocamento

- Frequência (f): número de ondas completas que passam por um ponto por unidade de tempo (segundo)
- Período (T): tempo necessário para uma onda dar uma volta completa pelo mesmo ponto

Electromagnetic radiation characteristics

Equações

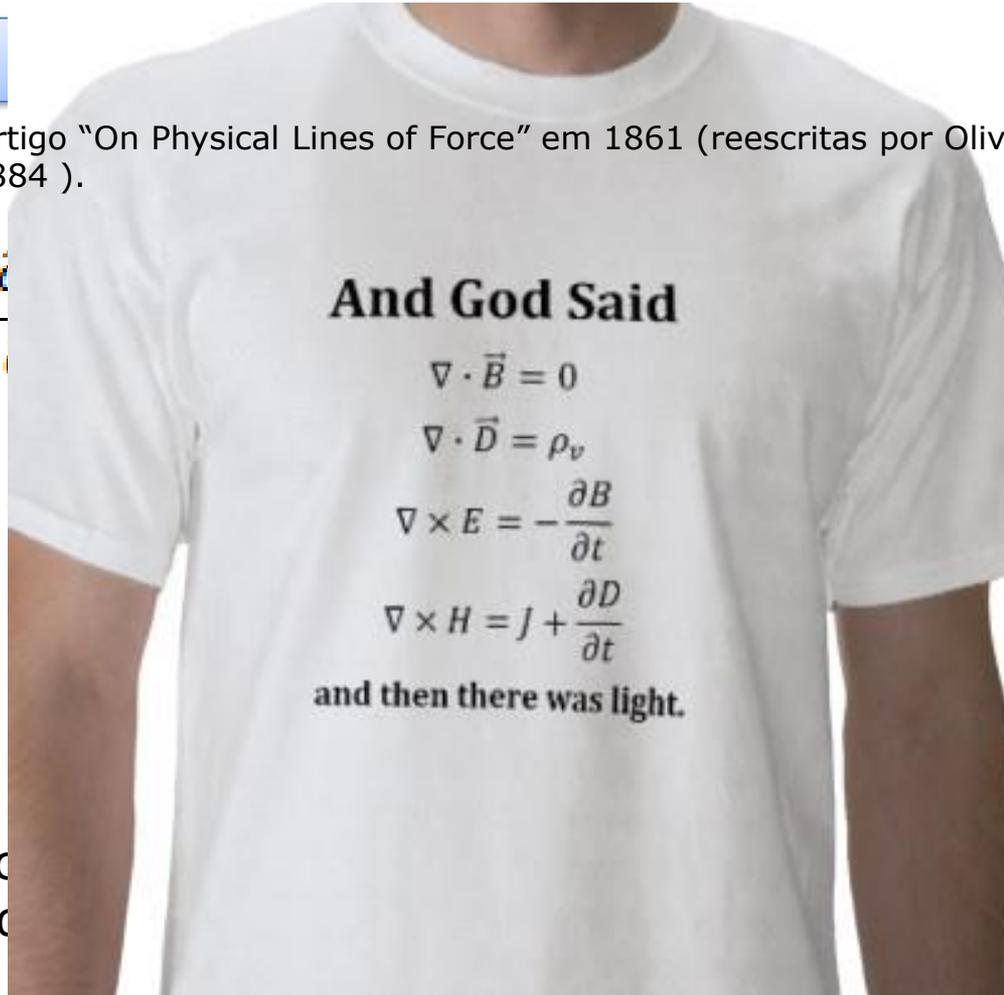
Publicadas num artigo "On Physical Lines of Force" em 1861 (reescritas por Oliver Heaviside e Willard Gibbs , que em 1884).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Em que:

Como rotacional
 \mathbf{j} é a densidade de corrente
elétrica.



localamento

po elétrico

po magnético

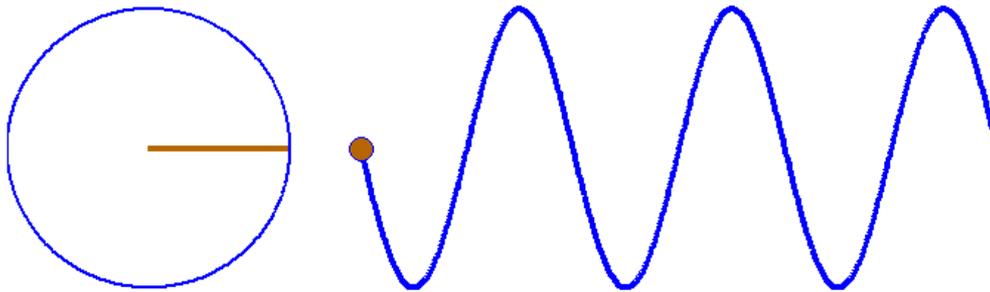
ção magnética

la, usado

e da carga

Plane electromagnetic waves

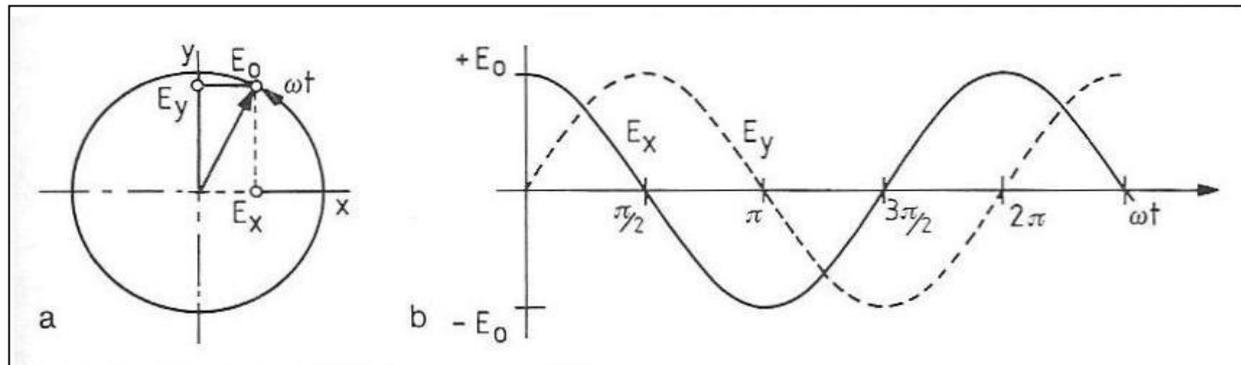
Comecemos por considerar uma oscilação fixa no espaço (sem propagação no espaço).



$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

$$c_0^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$\frac{d^2 \mathbf{E}}{dt^2} + \omega^2 \mathbf{E} = 0$$



Plane electromagnetic waves

Com propagação no espaço,
na direção z:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = 0$$

A solução é: $\mathbf{E}(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz)$

Em que k uma constante relacionada com o numero de oscilações ao longo da direção z. As equações de Maxwell ficam então:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E_y(z, t) = 0 \\ E_z(z, t) = 0 \end{array} \right.$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Esta solução representa uma onda que se propaga na direção z (a onda transporta a energia eletromagnética, neste sentido)

Plane electromagnetic waves

Outra solução das equações de Maxwell, rodada 90°, é:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x(z, t) = 0 \\ E_y(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E_z(z, t) = 0 \end{array} \right.$$

Ou seja: no plano yy.

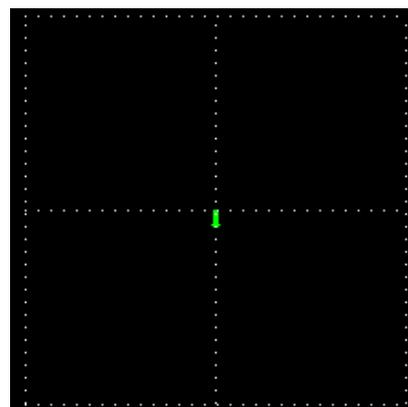
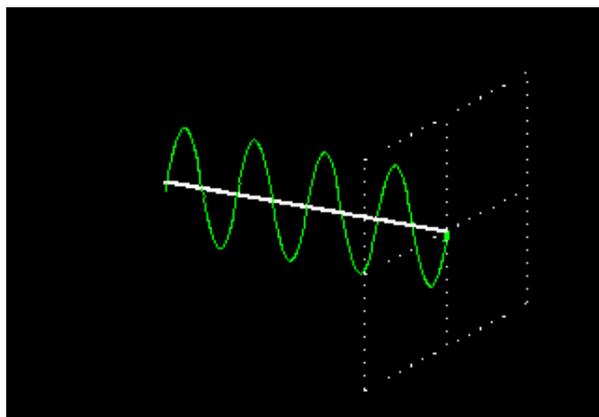
A solução geral das equações de Maxwell, é:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x(z, t) = E_{0,x} \cos(\omega t - kz - \varphi_x) \\ E_y(z, t) = E_{0,y} \cos(\omega t - kz - \varphi_y) \\ E_z(z, t) = 0 \end{array} \right.$$

A diferença de fase $\varphi_y - \varphi_x$ determina o estado de polarização da onda eletromagnética.

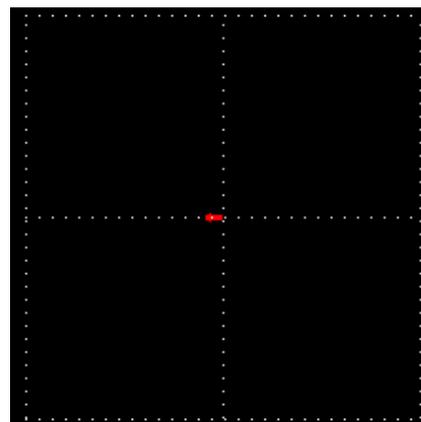
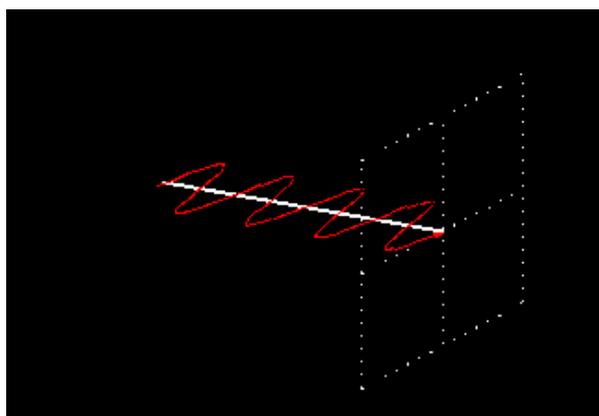
Polarização das ondas electromagnéticas

Por definição, a polarização de uma onda eletromagnética é o plano no qual se encontra a componente eléctrica da onda.



Linear

Vertical

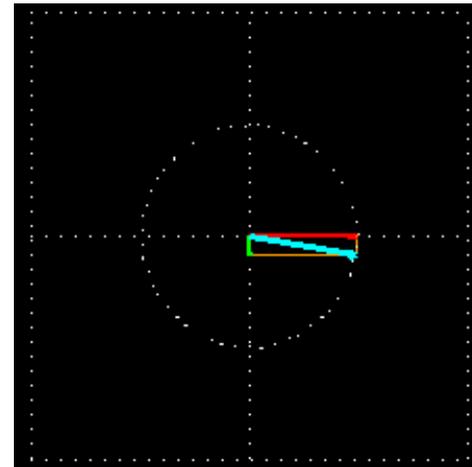
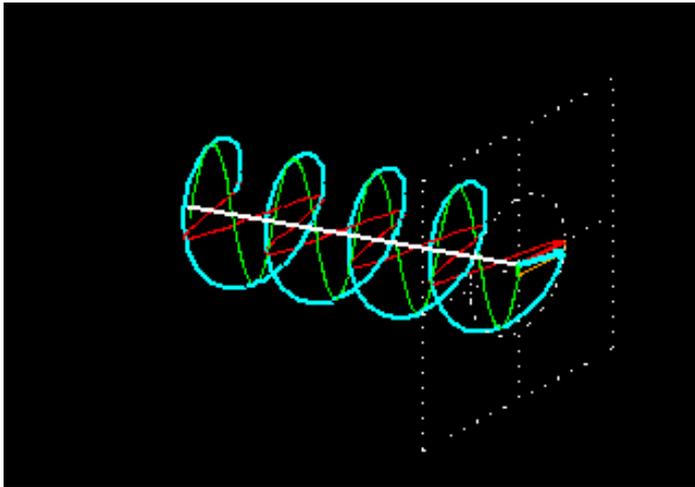


Horizontal

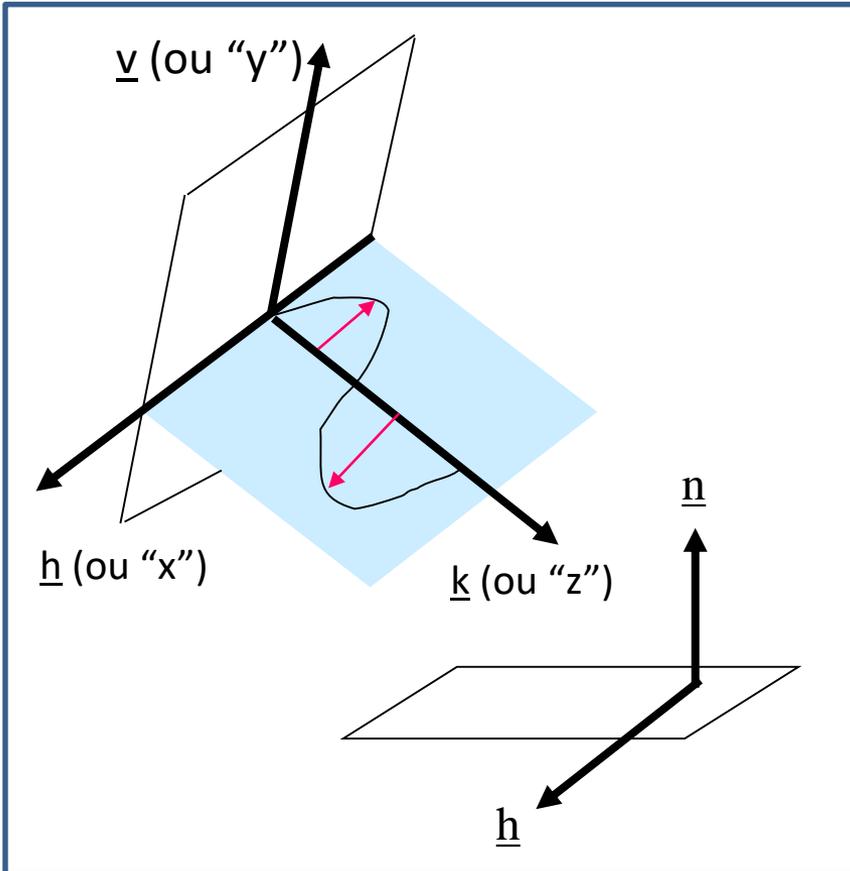
Polarização das ondas eletromagnéticas

A combinação de duas ondas linearmente polarizadas, uma vertical e outra horizontal, de mesma amplitude e eletricamente desfasadas de 90 graus, $\varphi_y - \varphi_x = \frac{\pi}{2}$ resulta em uma onda circularmente polarizada.

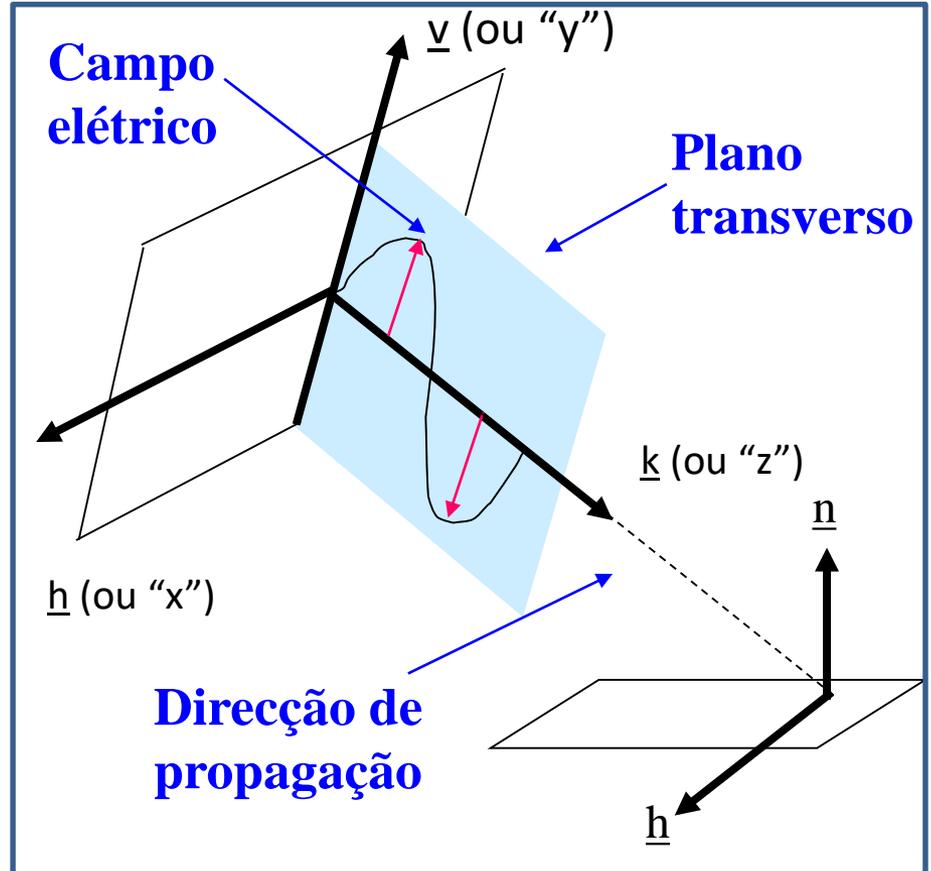
Polarização Circular



Polarização das ondas eletromagnéticas



Polarização horizontal
(Ex. RADARSAT HH)



Polarização vertical
(Ex. ERS-1/2 VV)



Ciências
ULisboa

Tejo VH





Ciências
ULisboa

Tejo VV





Quantidades Radiométricas

Energia Radiante (Q)

(Radiant Energy)

Energia Radiante é a quantidade de radiação eletromagnética recebida ou emitida por um corpo.

Unidades: Joule (J)

Fluxo Radiante (Φ)

$$\frac{dQ}{dt}$$

Radiant flux or
radiant power

O Fluxo radiante (Φ), ou Potencia radiante, é a energia total radiada em todas as direções por unidade de tempo.

Unidades : Watt (W)

(relativo a um elemento pontual, área nula)

Quantidades Radiométricas

Emitância (M)

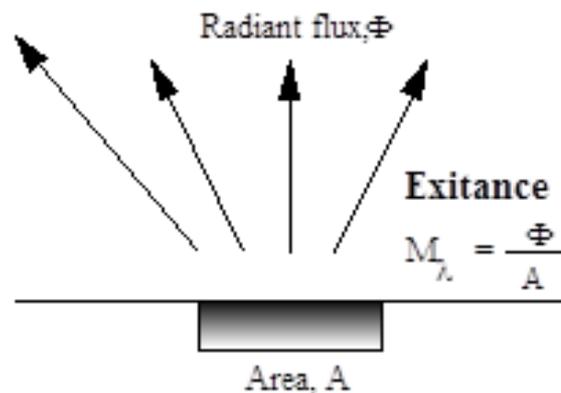
$$\frac{d\Phi}{dA} \text{ (out)}$$

(Emittance: radiant flux emitted by a surface per unit area)

Fluxo emitido por unidade de área

A Emitância (M), é o Fluxo radiante emitido por uma fonte extensa, por unidade de área projetada, **em todas as direções** (sem especificação da direccionalidade)

Unidades: W m⁻²
(Watt por metro quadrado)



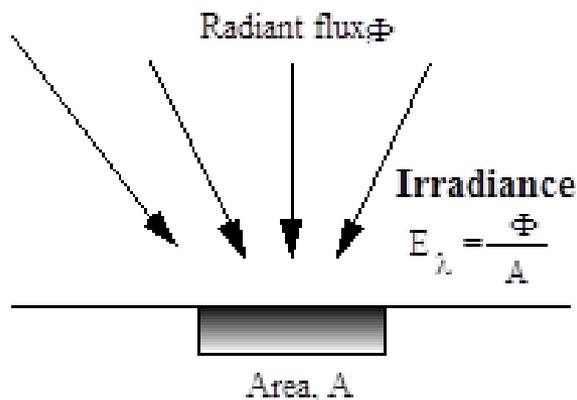
Quantidades Radiométricas

Irradiância (E)

$$\frac{d\Phi}{dA} \text{ (in)}$$

Irradiância (E) é a energia radiada numa unidade de área incidente numa superfície elementar. A potência recebida por unidade de área é fundamental para definir a SNR (relação sinal ruído) da imagem (muito mais do que saber a potência total recebida). Grandeza hemisférica.

Unidades: $W \text{ m}^{-2}$
(Watt por metro quadrado)



Fluxo incidente por unidade de área

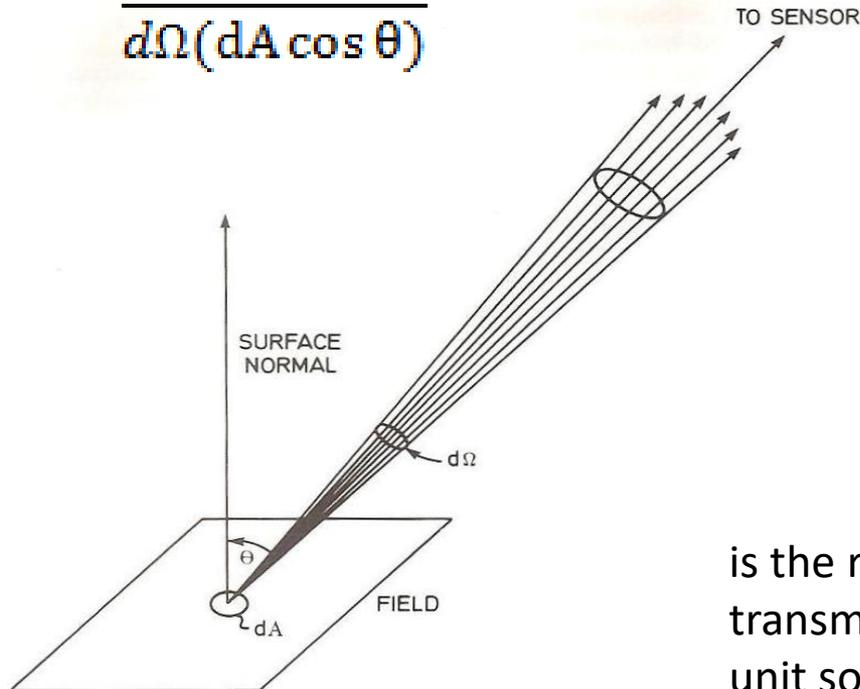
radiant flux *received* by a *surface* per unit area

Quantidades Radiométricas

Radiância (L)

Radiância (L) é o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido que é emitido ou transmitido por unidade de área projetada. Grandeza cônica.

$$\frac{d\Phi}{d\Omega(dA \cos \theta)}$$



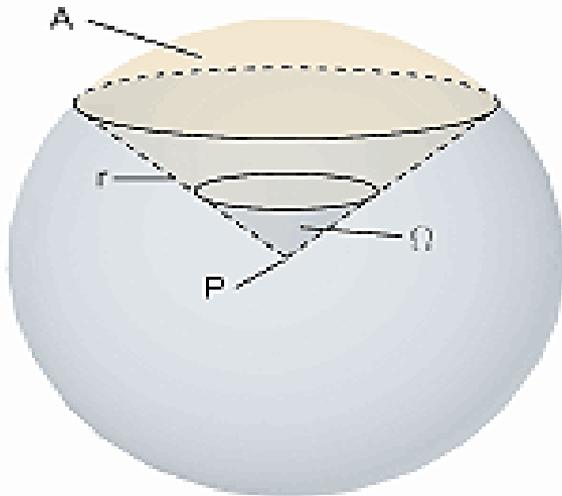
A Radiância é um dos termos mais importantes em Detecção Remota. É a energia que chega ao sensor.

Unidades : $W m^{-2} sr^{-1}$

is the radiant flux emitted, reflected, transmitted or received by a given surface, per unit solid angle per unit projected area.

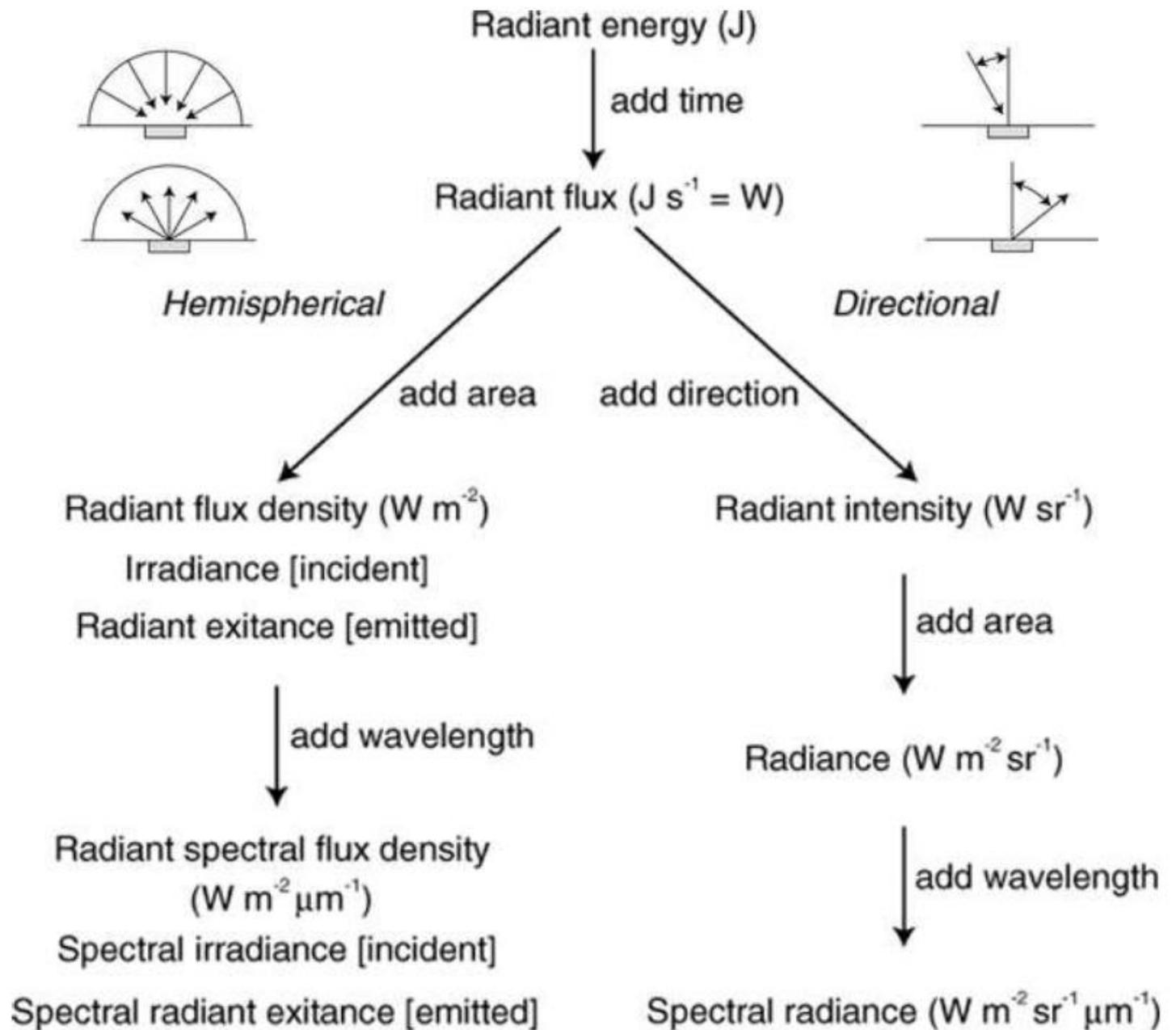
Angulo Sólido

O ângulo sólido Ω é definido como o ângulo (sólido) subjacente a uma área "A" na superfície de uma esfera dividida pelo quadrado do raio da esfera e é dado em unidades de esterradiano (sr).



$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

A : área da superfície da esfera
r : raio da esfera
 Ω : ângulo sólido



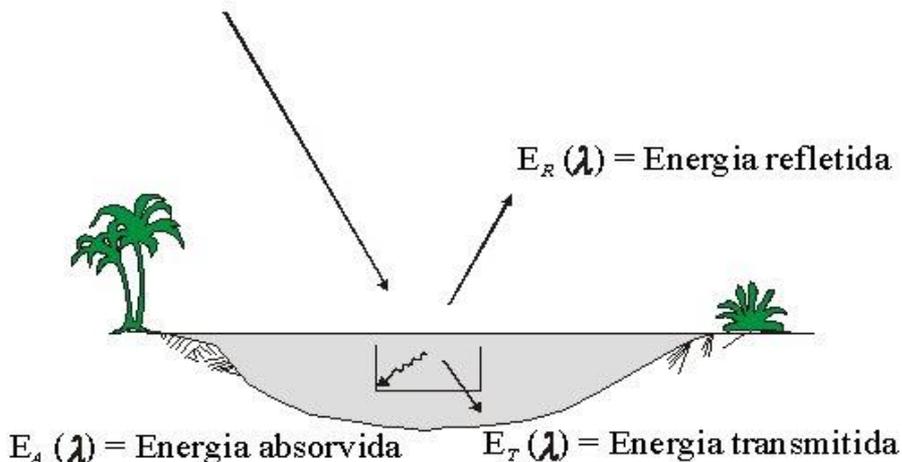
Interação da radiação com a matéria

Quando a radiação eletromagnética incide na superfície terrestre, podem ocorrer três tipos de interação : a energia é **refletida**, **absorvida** e/ou **transmitida**.

Aplicando o princípio da conservação da energia , podemos estabelecer a relação entre as três interações como:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (\text{Irradiância})$$

$E_I(\lambda)$ = Energia incidente



Dividindo por E_I obtemos:

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

Razão entre a energia refletida e a energia incidente

Interacção da radiação com a matéria

Emissividade

$$\frac{M}{M_{\text{corpo negro}}}$$

A emissividade (ε) é a razão entre a emitância radiante da superfície (M) e a emitância radiante de um corpo perfeito chamada o corpo negro.

Refletividade

reflectance

A refletividade (ρ) é a razão entre o fluxo radiante refletido e o incidente. $M_r = \rho E_i$

Absorvidade

absorptance

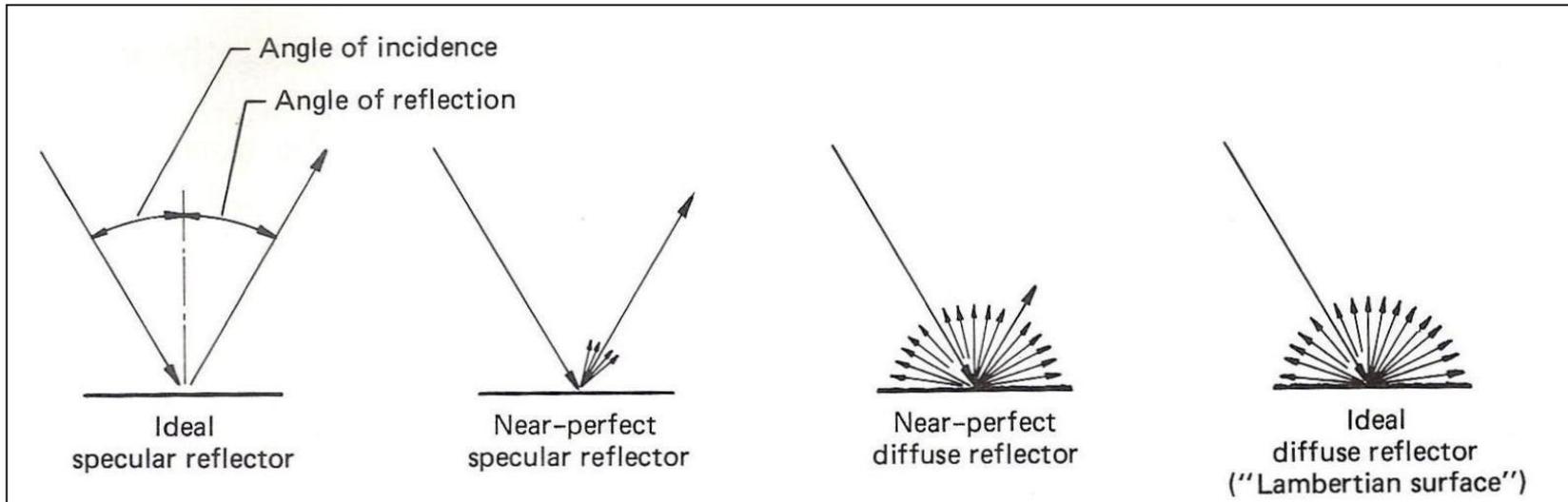
A Absorvidade (α) é a razão entre o fluxo radiante absorvido e o incidente.

Transmissividade

transmittance

A Transmissividade (τ) é a razão entre o fluxo radiante transmitido e o incidente.

Interação da radiação com a matéria



A categoria que caracteriza uma qualquer superfície é ditada pela rugosidade da superfície em comparação com o comprimento de onda da radiação incidente na superfície.

Quando o comprimento de onda da radiação incidente é muito menor que as variações altimétricas da superfície, ou tamanho das partículas que a compõem, a reflexão é difusa.

Interação da radiação com a matéria

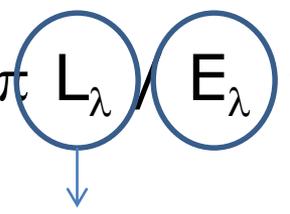
Para uma superfície Lambertiana a relação entre **radiância** espectral (grandeza “cónica”) e **emitância** espectral (grandeza “hemisférica”) é dada por

$$M_{\lambda} = \pi L_{\lambda}$$

Lei do cosseno
 $M = L \cdot \cos\theta \cdot$

e a refletividade espectral é dada por:

$$\rho_{\lambda} = \pi \frac{L_{\lambda}}{E_{\lambda}}$$



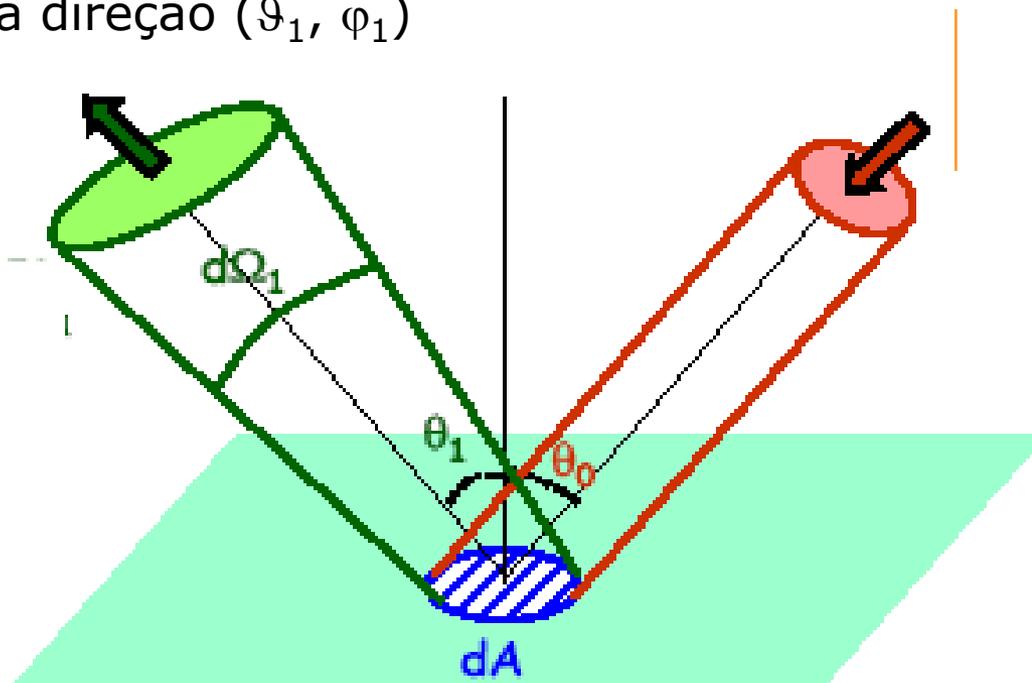
Refletividade

$L_1(\vartheta_1, \varphi_1)$ é a radiância da radiação difusa no ângulo sólido $d\Omega_1$ na direção (ϑ_1, φ_1)

A irradiância E na superfície é dada por:

$$E = F \cos\theta_0$$

F é o Fluxo da radiação incidente



$$R \text{ [sr}^{-1}\text{]} = \text{Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)} = L_1 / E$$

A BRDF depende das direções de incidência e difusão $R(\vartheta_0, \varphi_0, \vartheta_1, \varphi_1)$

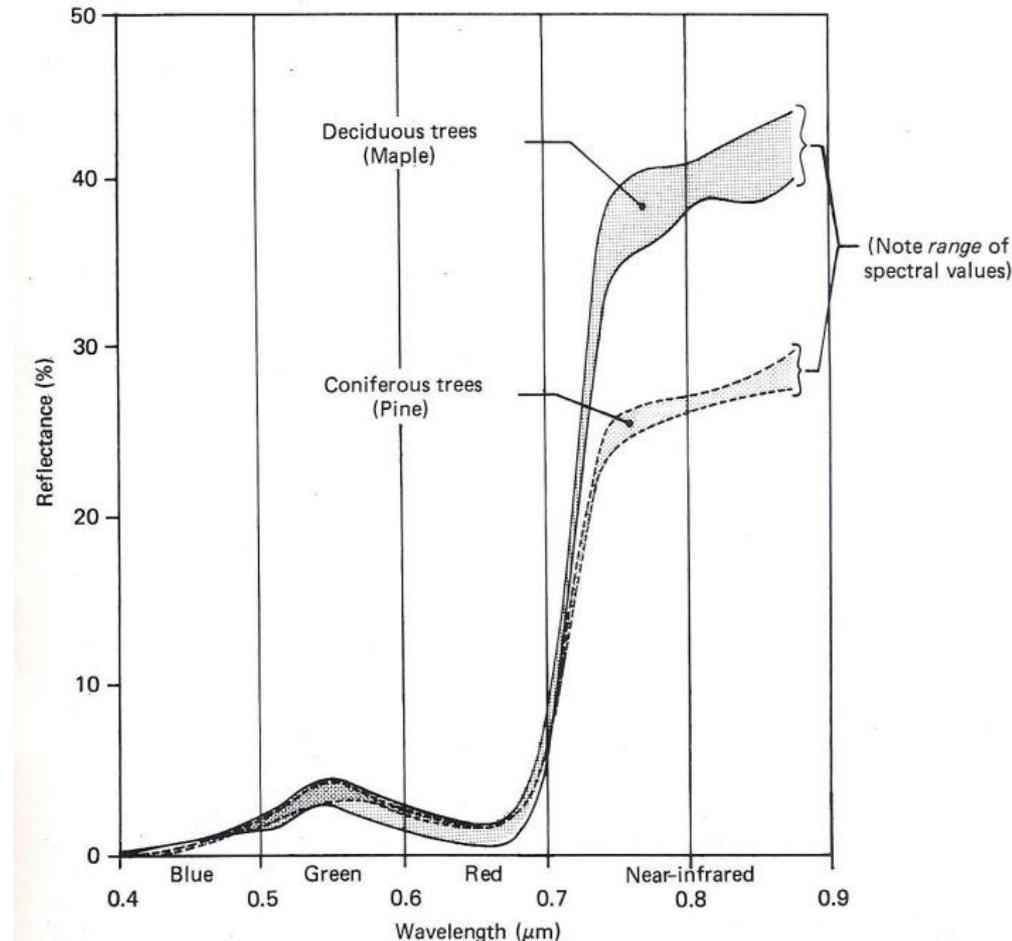
Reflectance

As características de reflectância dos elementos da superfície terrestre podem ser quantificadas medindo a porção da energia incidente que é reflectida.

Esta medida é feita em função do comprimento de onda e é chamada reflectividade espectral (ρ_λ).

É matematicamente definida como:

$$\rho_\lambda = \frac{\Phi_r(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \times 100$$



Thermal Radiance

Todos os corpos com temperatura superior a 0°K emitem radiação com comprimento de onda λ variável no espectro eletromagnético.

A quantidade de energia (Radiância) que um objeto radia é função da temperatura do corpo e é dada pela Lei de Planck do corpo negro:

$$L_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Usualmente com
unidades:
 $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$

em que k é a constante de Boltzman, $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, e h é a constante de Planck ($6.6261 \times 10^{-34} \text{ J s}$)

Thermal Radiance

A equação de Planck pode ser expressa em termos de comprimento de onda em vez de frequência e neste caso a **Radiância Espectral** é dada por:

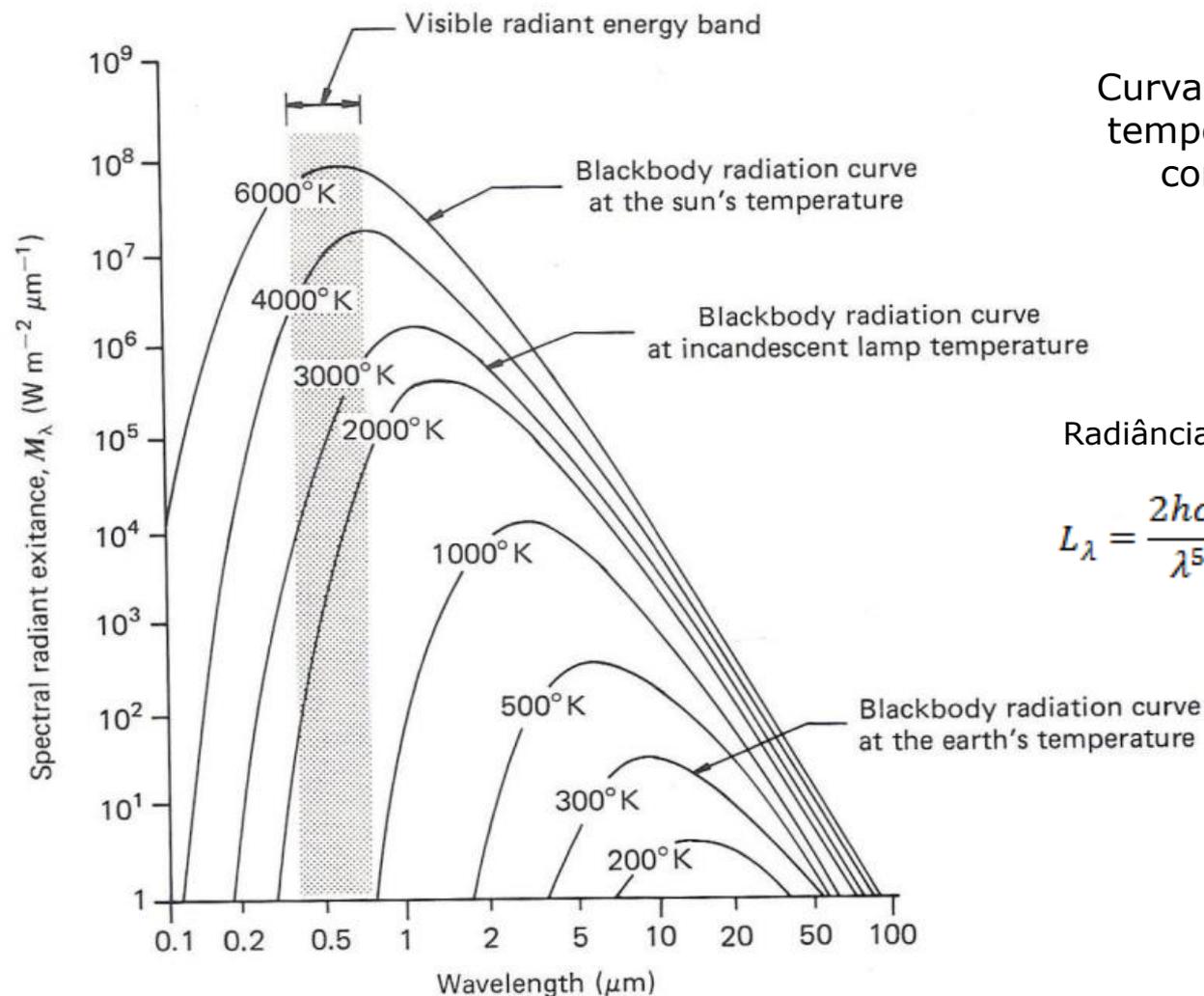
$$L_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad Wm^{-3}sr^{-1}$$

Se $\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T} \ll 1$, o que é válido no caso da radiação emitida pela

Terra (T cerca de 290° K) na região das microondas e das frequências radio, então:

$$L_{\lambda} = \frac{2 \cdot k \cdot T}{\lambda^2} \quad \text{Aproximação de Rayleigh-Jeans}$$

Sources of electromagnetic radiance

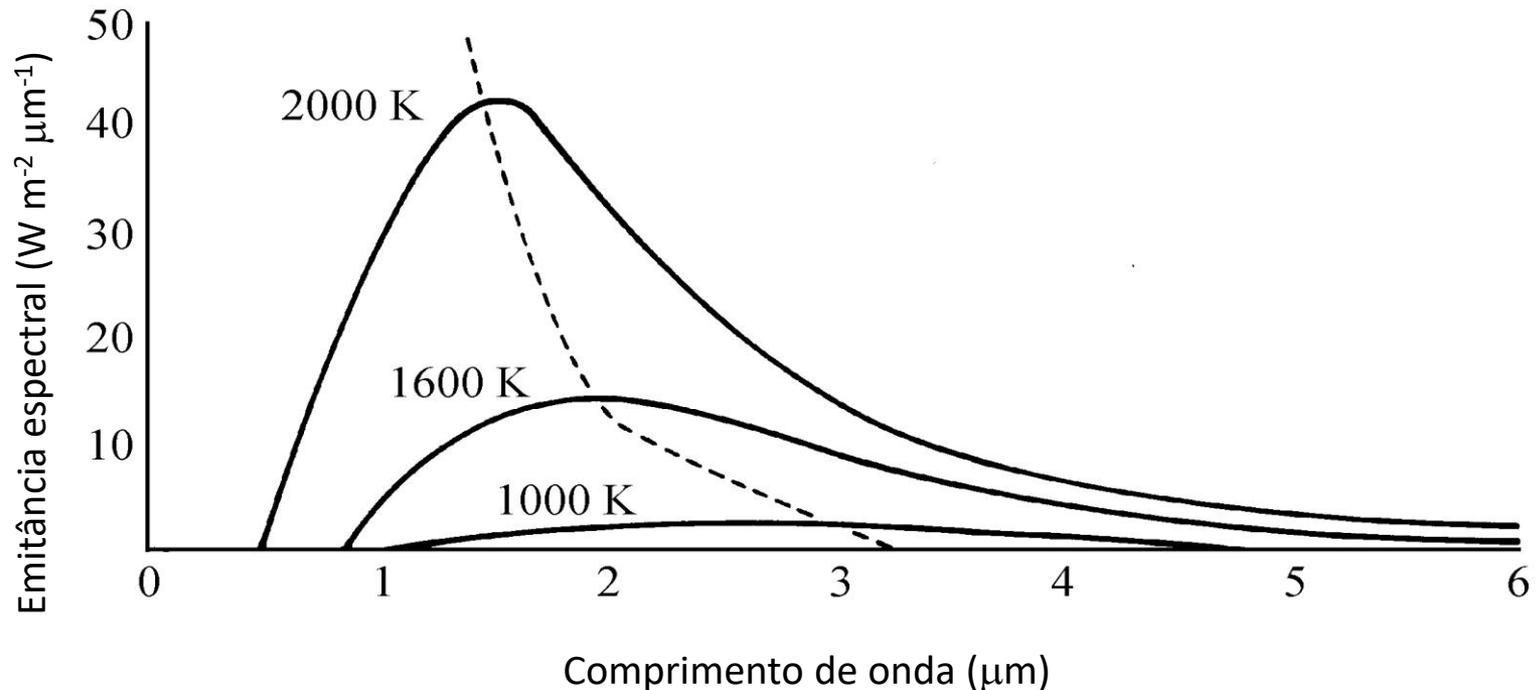


Curvas de Planck para várias temperaturas em função do comprimento de onda

Radiância espectral

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{Wm}^{-3}\text{sr}^{-1}$$

Sources of electromagnetic radiance

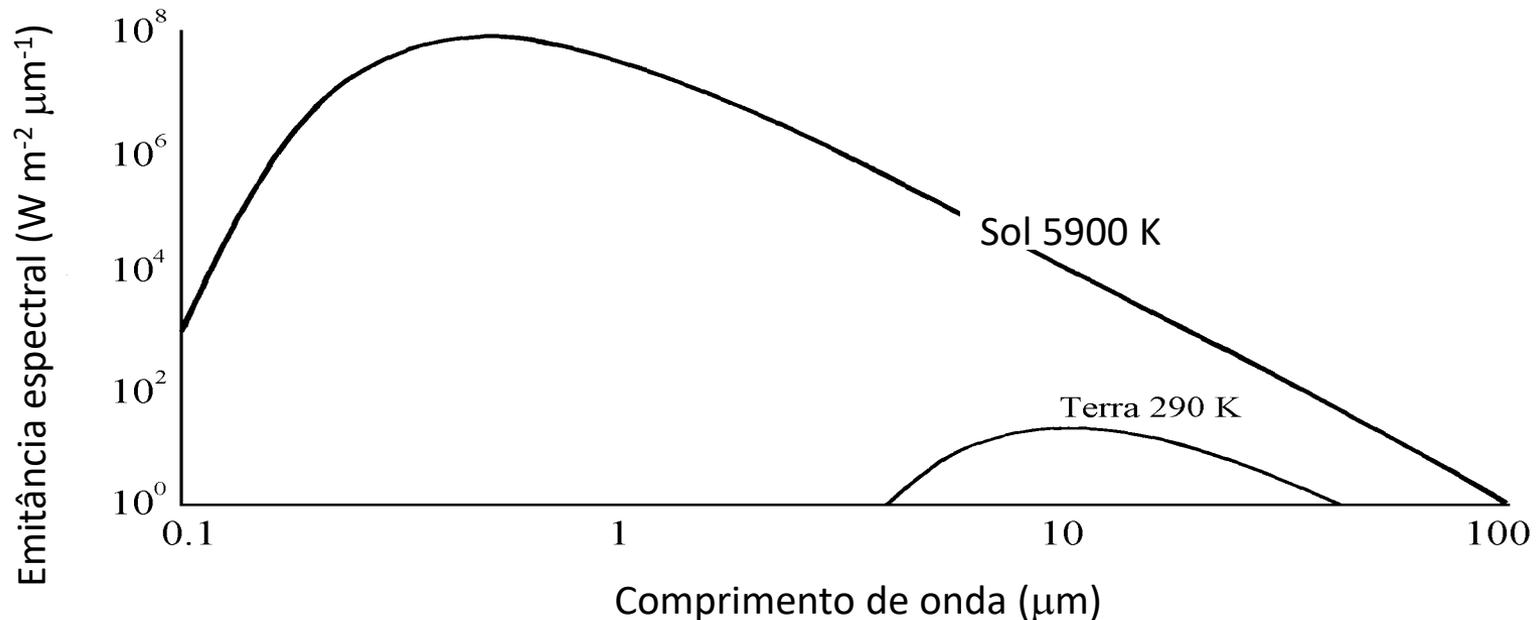


O comprimento de onda para o qual a curva atinge o máximo está relacionada com a sua temperatura pela lei do deslocamento de Wien's. Esta lei é obtida calculando o máximo da curva de Planck é:

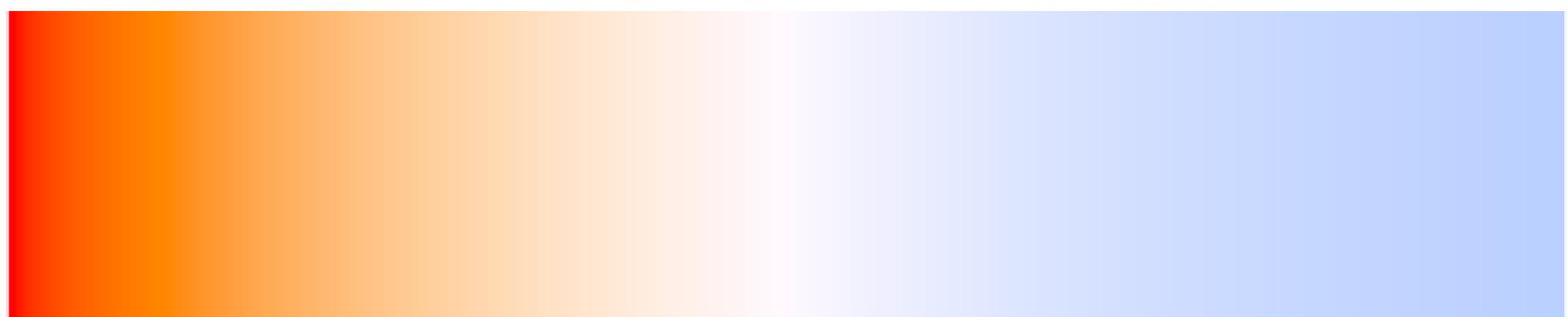
$$\lambda_{max} = \frac{2.989 \times 10^{-3}}{T} \mu\text{m} \quad \text{Temperatura de cor}$$

Sources of electromagnetic radiance

Curvas da emitância espectral de dois corpos com temperaturas próximas do Sol e da Terra



Para $T=290\text{K}$ $\rightarrow \lambda_{\text{max}} = 9.7 \mu\text{m}$ (infravermelho térmico). Para o Sol o valor de comprimento de onda dominante é $0.480 \mu\text{m}$ (amarelo) .

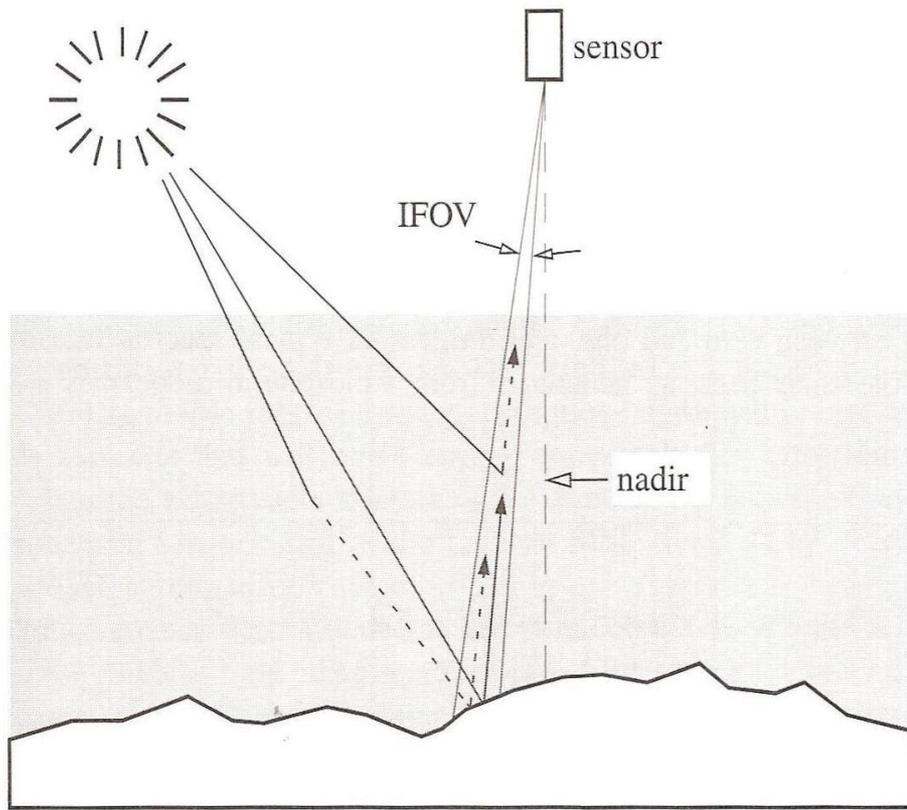


1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10000 11000 12000

Color of a black body from 800 K to 12200 K. This range of colors approximates the range of colors of stars of different temperatures, as seen or photographed in the night sky.



Atmospheric interaction



unscattered, radiação refletida pela superfície

$$L_{\lambda}^{su}$$

down-scattered, luz do céu, refletida pela superfície

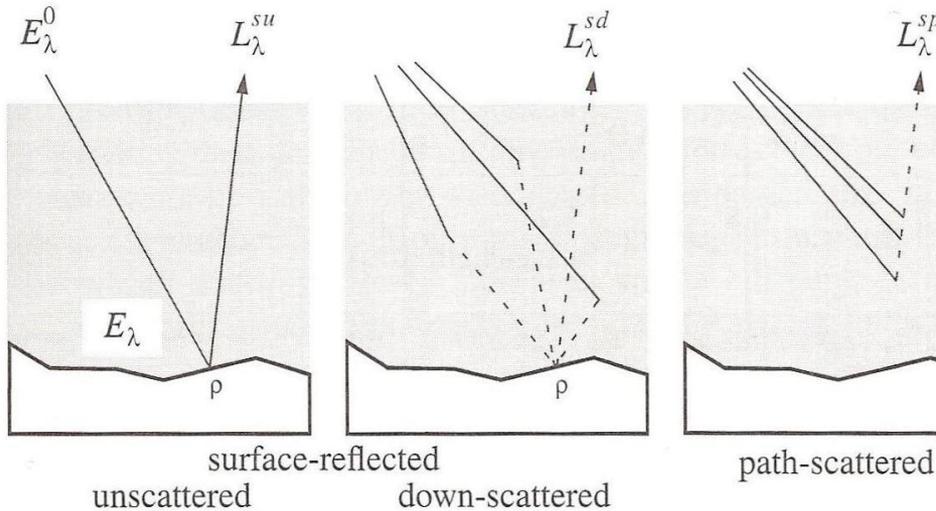
$$L_{\lambda}^{sd}$$

radiância up-scattered no percurso

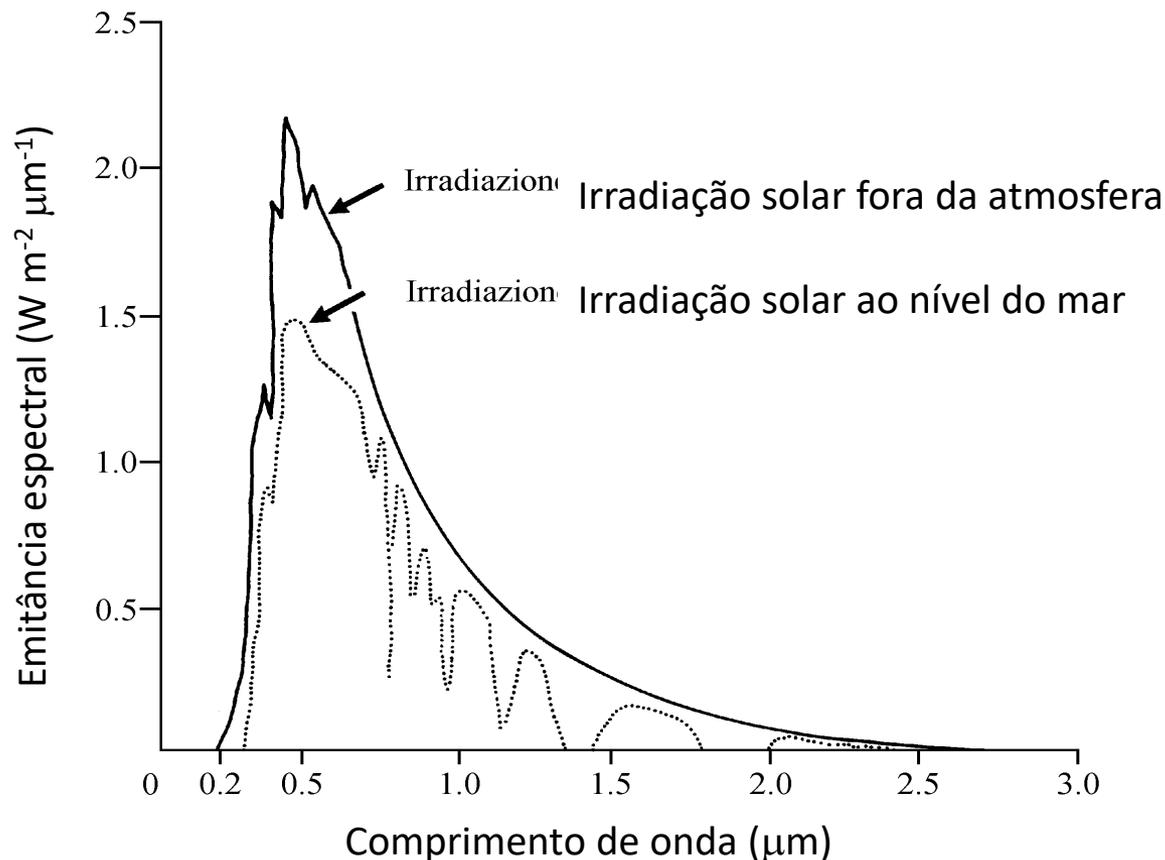
$$L_{\lambda}^{sp}$$

radiância no sensor:

$$L_{\lambda}^s = L_{\lambda}^{su} + L_{\lambda}^{sd} + L_{\lambda}^{sp}$$



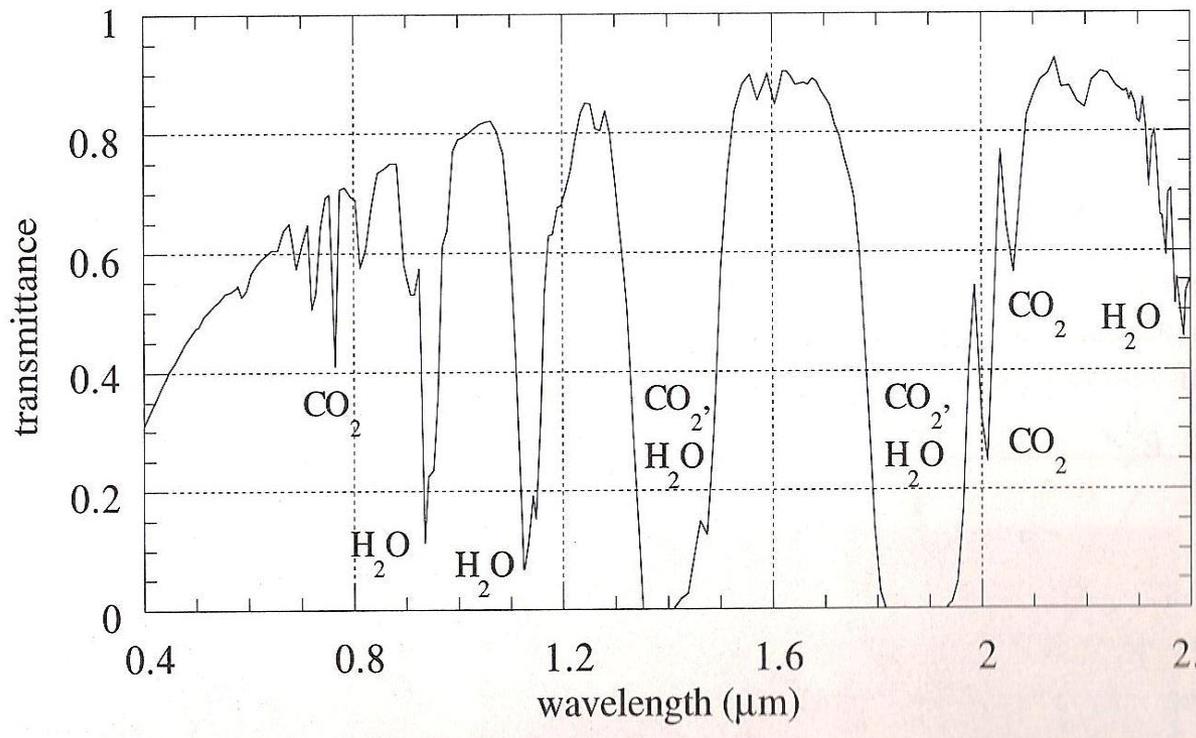
Sources of electromagnetic radiance



A razão entre estas curvas é a transmitância ou transmissividade da atmosfera.

Sobre a superfície terrestre chega apenas uma fração da energia emitida pelo Sol; a atmosfera desempenha uma função de filtragem.

Unscattered component (L_{λ}^{su})



Transmissividade ao longo do percurso solar, i.e, entre o Sol e a superfície da Terra, para um ângulo de elevação solar de 45° .
 As bandas de absorção estão essencialmente associadas ao vapor de água e ao dióxido de carbono.

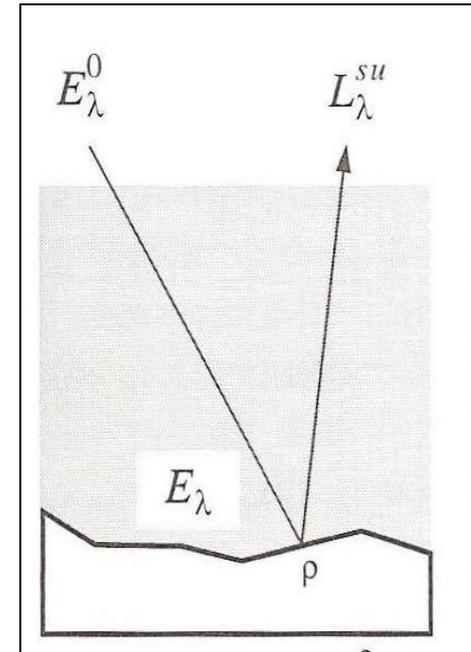
Unscattered component (L_{λ}^{su})

A atmosfera altera significativamente a irradiância espectral antes de chegar à superfície da Terra.

Matematicamente, a irradiância E_{λ} num plano perpendicular ao raio luminoso solar na superfície da Terra é dada por:

$$E_{\lambda} = \tau_s(\lambda) \cdot E_{\lambda}^0$$

Em que τ_s é a transmissividade da atmosfera. De notar que por definição a irradiância E_{λ} deverá ser menor que E_{λ}^0 .



Unscattered component (L_{λ}^{su})

A irradiância na superfície depende do ângulo de incidência

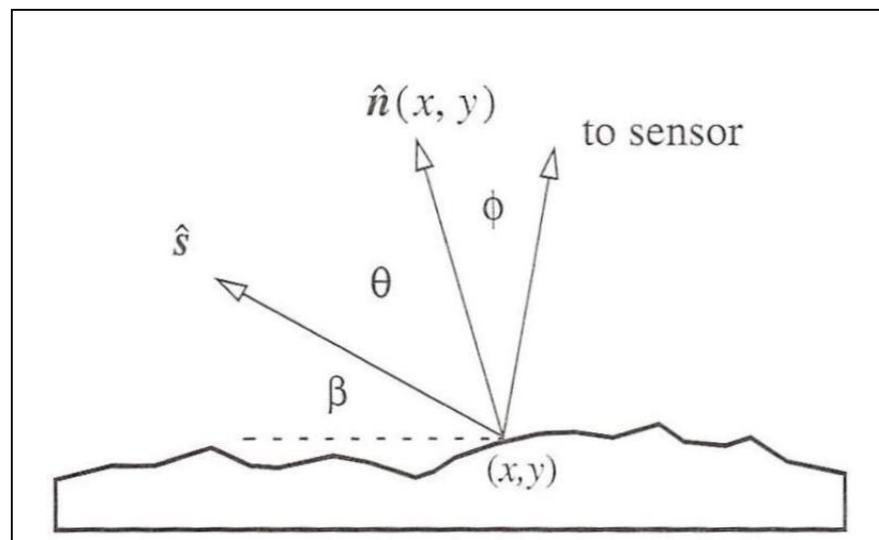
O vetor unitário \mathbf{s} está dirigido para o Sol e o vetor unitário $\mathbf{n}(x,y)$ é normal à superfície.

O ângulo de elevação solar é β e o ângulo zenital solar é $90-\beta$.

O ângulo de incidência na superfície é θ e o ângulo de emitância da superfície na direção do sensor é ϕ .

$$E_{\lambda}(x, y) = \tau_s(\lambda) \cdot E_{\lambda}^0 \cdot \vec{n}(x, y) \cdot \vec{s}$$

$$E_{\lambda}(x, y) = \tau_s(\lambda) \cdot E_{\lambda}^0 \cdot \cos(\theta(x, y))$$



Unscattered component (L_{λ}^{su})

A próxima transferência de energia ocorre sobre a refletividade na superfície da terra.

A **irradiância** que incide numa superfície Lambertiana é convertida na **radiância** que sai da superfície com a ajuda do factor π e da refletividade espectral difusa ρ :

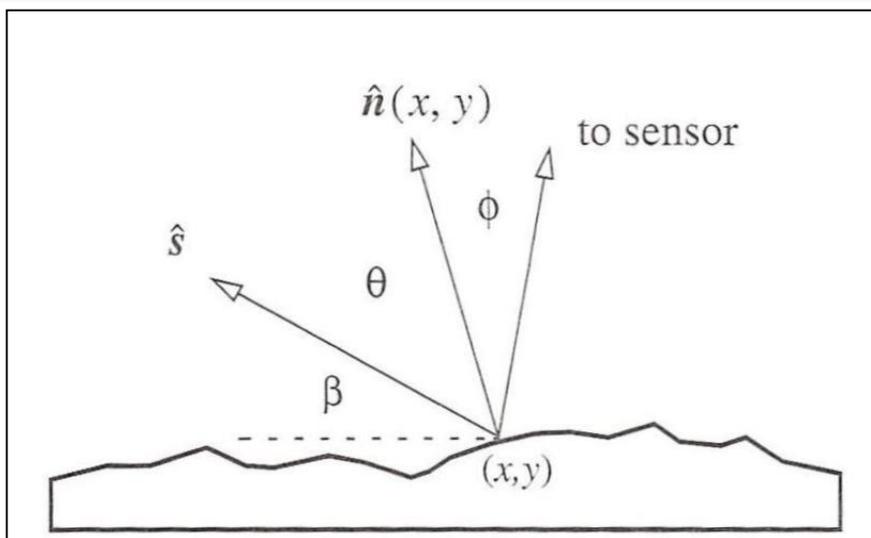
$$L_{\lambda}(x, y) = \rho(x, y, \lambda) \frac{E_{\lambda}(x, y)}{\pi}$$

$$\left| \begin{aligned} L &= \frac{E}{\Delta\Omega} \\ \Delta\Omega &= \frac{\pi \cdot r^2}{d^2} \end{aligned} \right.$$

$$L_{\lambda}(x, y) = \rho(x, y, \lambda) \frac{\tau_s(\lambda) \cdot E_{\lambda}^0}{\pi} \cos(\theta(x, y))$$

O desvio de um modelo simples é expresso numa Função distribuição da refletividade bidirecional (BRDF).

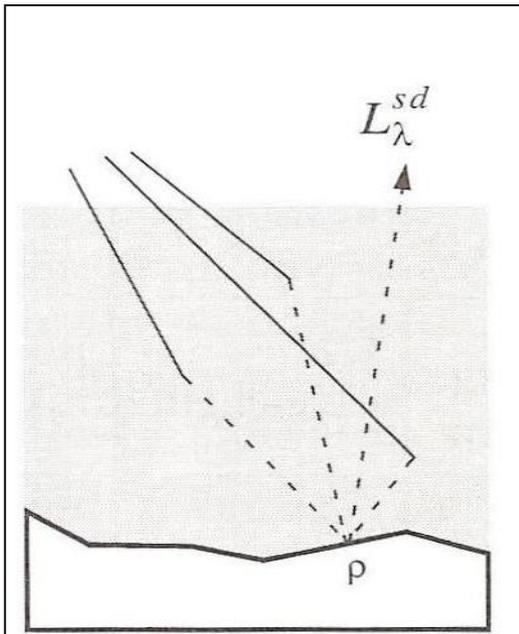
Unscattered component (L_{λ}^{su})



Devemos agora modificar a equação anterior para contemplar a transmissividade na vista do satélite ($\tau_v(\lambda)$) para obter a radiância no sensor:

$$L_{\lambda}^{su}(x, y) = \tau_v(\lambda) \cdot L_{\lambda} = \rho(x, y, \lambda) \frac{\tau_s(\lambda) \cdot \tau_v(\lambda) \cdot E_{\lambda}^0}{\pi} \cos(\theta(x, y))$$

Down-scattered component (L_{λ}^{sd})



$$L_{\lambda}^{sd}(x, y) = F(x, y) \cdot \rho(x, y, \lambda) \frac{\tau_v(\lambda) \cdot E_{\lambda}^d}{\pi}$$

Irradiância do céu: E_{λ}^d

Topografia
(modelo terreno): $F(x, y)$

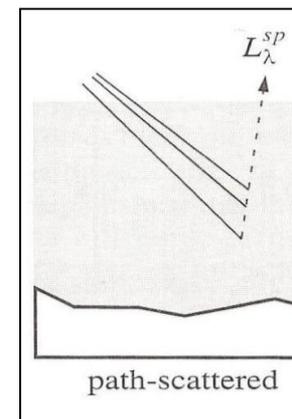
Transmissividade
na direção do
satélite $\tau_v(\lambda)$

Path-scattered component (L_{λ}^{SP})

O termo da radiância do percurso (path) é a combinação da dispersão de **Rayleigh**, que varia com o comprimento de onda como λ^{-4} , e a dispersão de **Mie**, que depende fracamente, ou mesmo não depende, do comprimento de onda.

O efeito combinado da dispersão de Rayleigh e Mie numa atmosfera limpa resulta numa dependência do comprimento de onda na ordem de λ^{-2} e $\lambda^{-0.7}$.

Para sensores com IFOV pequeno, a radiância do percurso é assumida como constante em toda a imagem e escrevemos o termo como $L_{\lambda}^{SP}(x,y)$.



A soma das três componentes resulta na equação:

$$L_{\lambda}^s(x, y) = \rho(x, y, \lambda) \frac{\tau_v(\lambda)}{\pi} \left\{ \tau_s(\lambda) E_{\lambda}^0 \cos(\theta(x, y)) + F(x, y) \cdot E_{\lambda}^d \right\} + L_{\lambda}^{sp}(x, y)$$

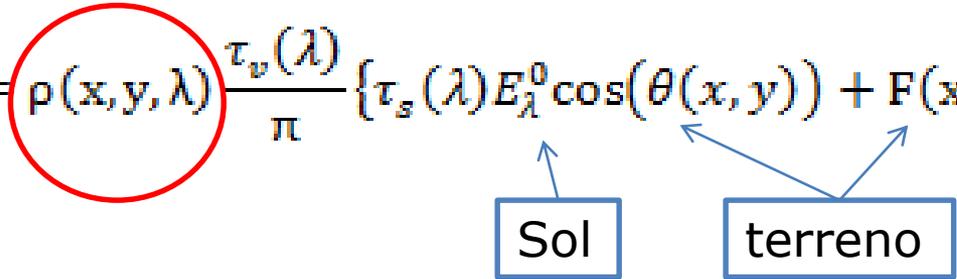
A radiância espectral total recebida pelo sensor é linearmente proporcional à refletividade difusa da superfície, modificada por:

um termo multiplicativo, fator variável espectralmente e espacialmente que depende da forma do terreno

um termo aditivo, espacialmente invariante e espectralmente dependente devido à dispersão do percurso da vista do sensor (view path scattering)

Solar radiance at sensor

Como podemos usar a Deteção Remota para reconhecer diferentes ocupações do solo?

$$L_{\lambda}^s(x, y) = \rho(x, y, \lambda) \frac{\tau_v(\lambda)}{\pi} \left\{ \tau_s(\lambda) E_{\lambda}^0 \cos(\theta(x, y)) + F(x, y) \cdot E_{\lambda}^d \right\} + L_{\lambda}^{sp}(x, y)$$


Os dados de Deteção Remota devem ser corrigidos dos efeitos atmosféricos e solares se o objetivo for a comparação com curvas de refletividade espectral medidas no terreno.

São necessárias correções atmosféricas relativas se as assinaturas espectrais de uma imagem numa data são para comparar com imagens adquiridas numa outra data, i.e se o objetivo é um estudo multitemporal.

Moderate Spectral Atmospheric Radiance and Transmittance (MOSART)



The Moderate Spectral Atmospheric Radiance and Transmittance (MOSART) computer program is a U.S. Department of Defense (DoD) standard code for calculating accurate and realistic atmospheric transmission and radiance along sensor-target line-of-sight paths and optical radiance backgrounds against which targets are detected by sensor systems. As such it has the capability to support both scene and signature

simulations.

The MOSART computer program calculates atmospheric transmission and radiation in the ultraviolet through the microwave spectral regions ($0.2 \mu\text{m}$ to infinity (∞) or $0 - 50,000 \text{ cm}^{-1}$). It contains features extracted from the MODTRAN[®] code developed by the Geophysics Division (PL/GPOS) of the Air Force's Phillips Laboratory [now Air Force Research Laboratory (AFRL)] and the APART code developed by Photon Research Associates, Inc. (PRA). MODTRAN[®] is widely used in many different atmospheric studies, both within and without DoD. Since APART was developed to provide atmospheric calculations for infrared (IR) signature studies of both targets and backgrounds, it has many features that are desirable for large simulation models. Because of the requirement that MOSART be compatible with various codes used in the Synthetic Scene Generation Model (SSGM), the overall structure of this version of MOSART closely follows that of APART. However, MOSART contains all the MODTRAN[®] atmospheric features and is easily used for that code's usual point-to-point calculations.



Curva de Refletividade

Curva de refletividade:

descreve como varia a refletividade dum dada superfície num determinado o intervalo espectral (p.e.: 0.4 – 2.5 μm).

Esta curva de refletividade dum superfície varia muito em função:

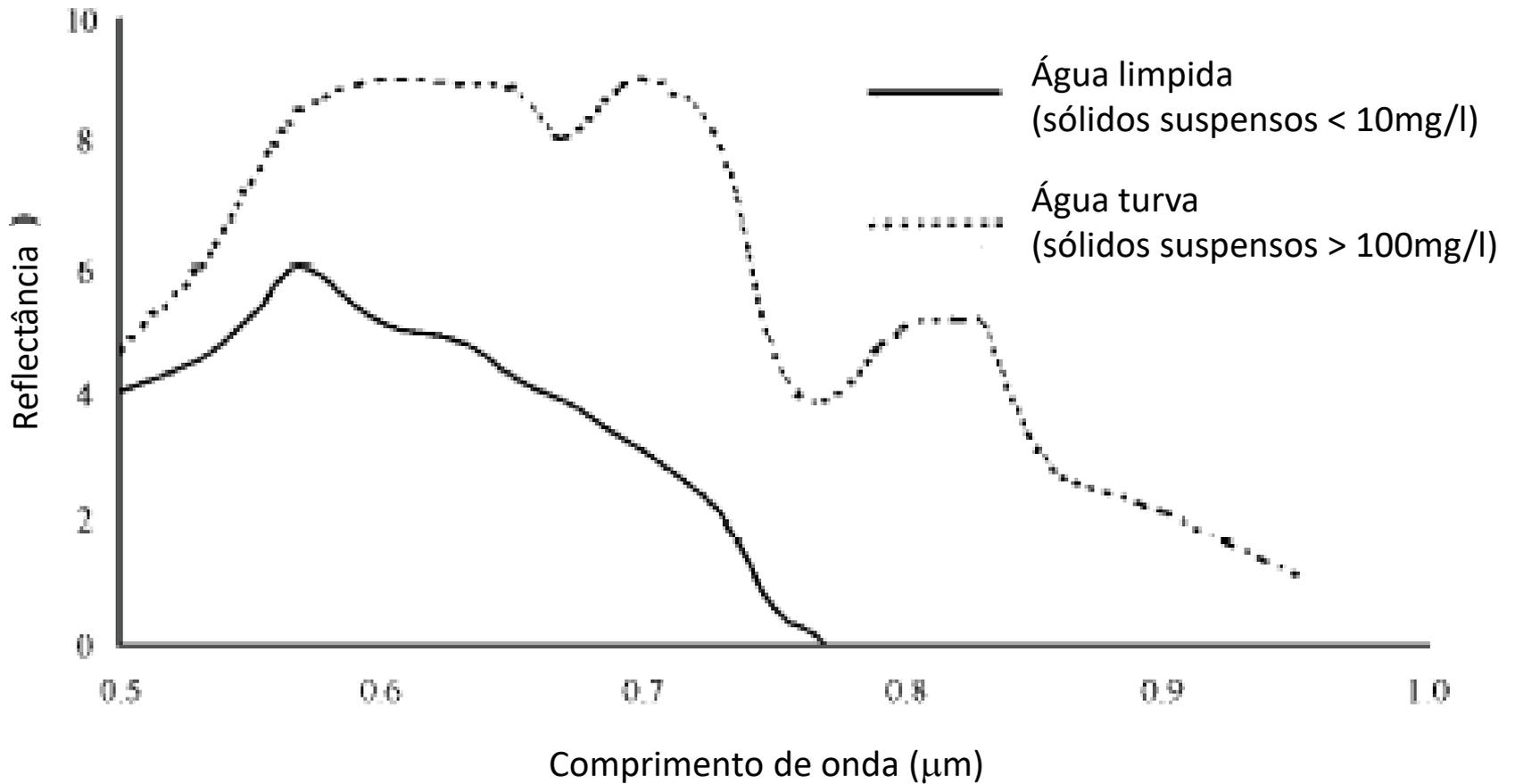
das **condições ambientais** (estação do ano, condição física e química da superfície) e

de **tomada da imagem** (geometria Sol – superfície – Terra)

É possível obter curvas de refletividade média que, embora tenham apenas um valor indicativo no sentido que podem variar muito em função dos parâmetros apenas descritos, contem informações úteis sobre o comportamento da superfície observada.

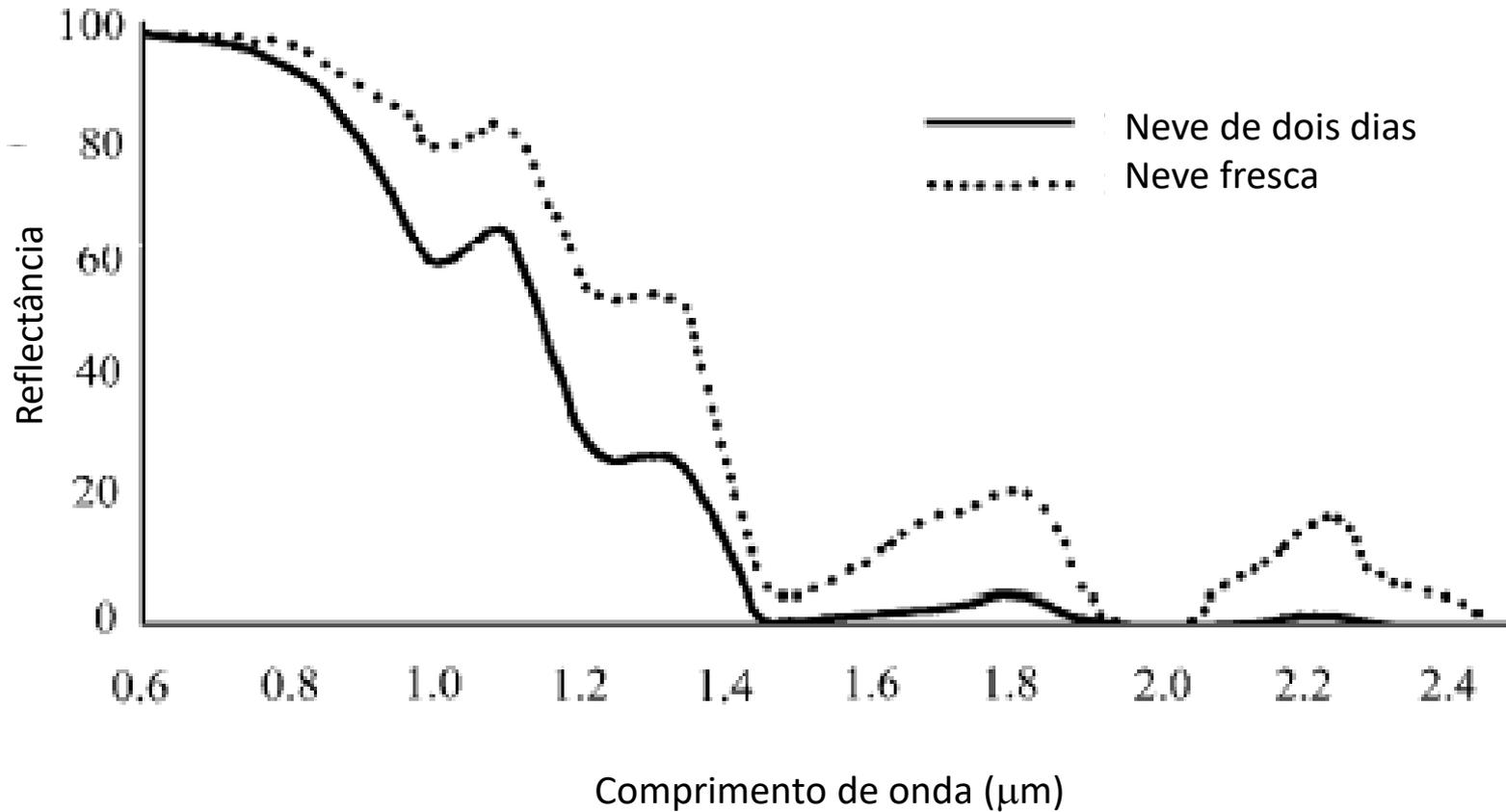


Water reflectance



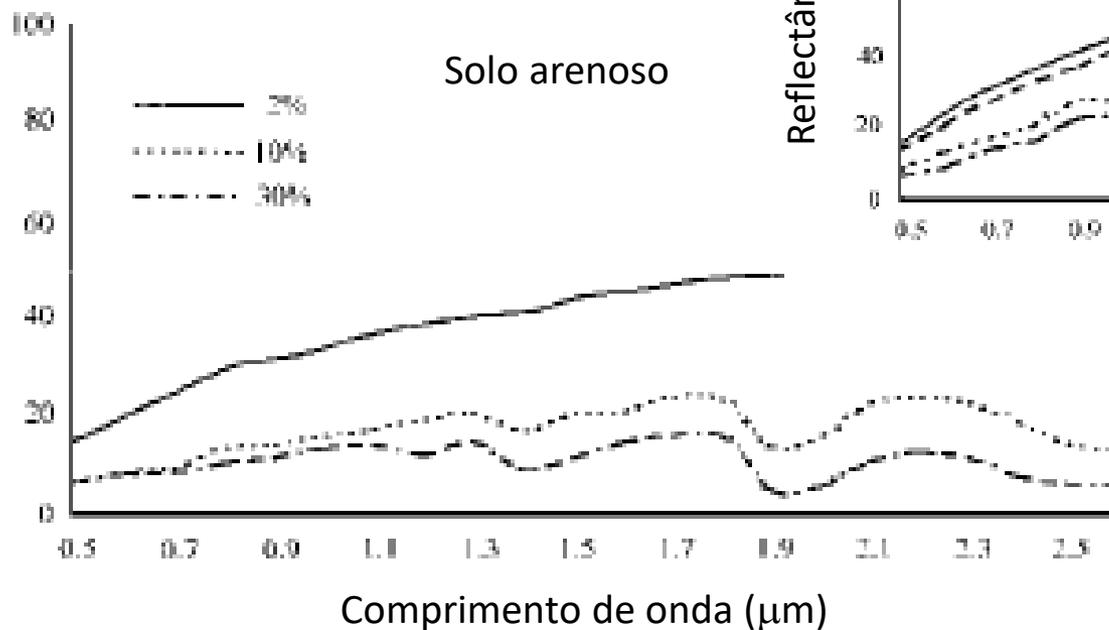
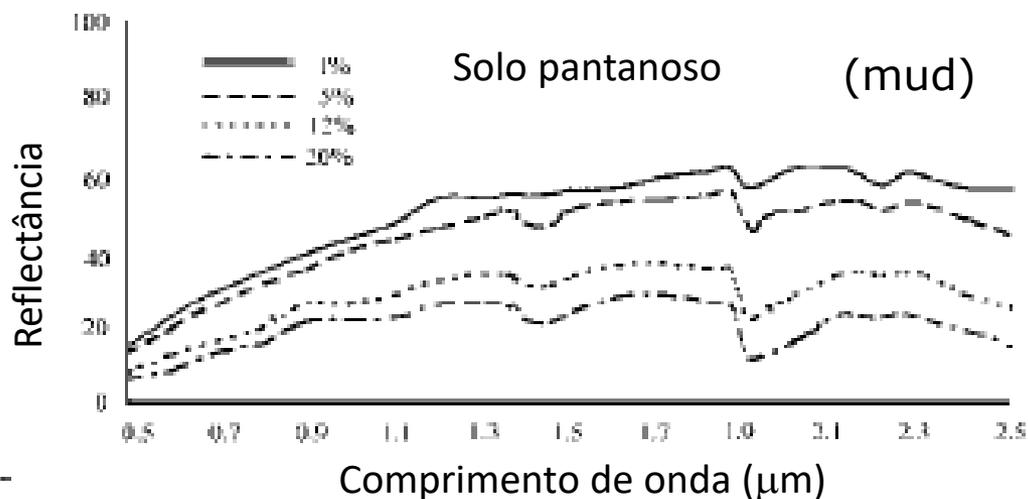
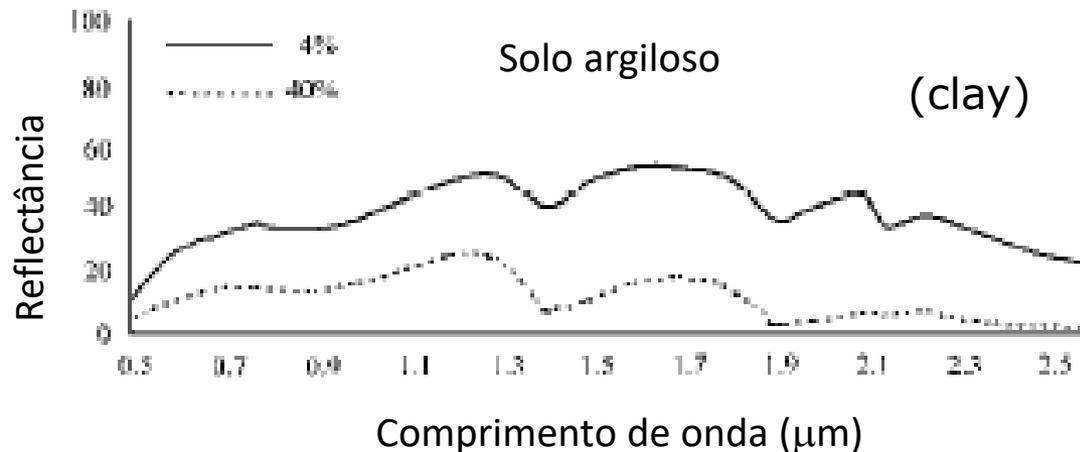


Snow reflectance

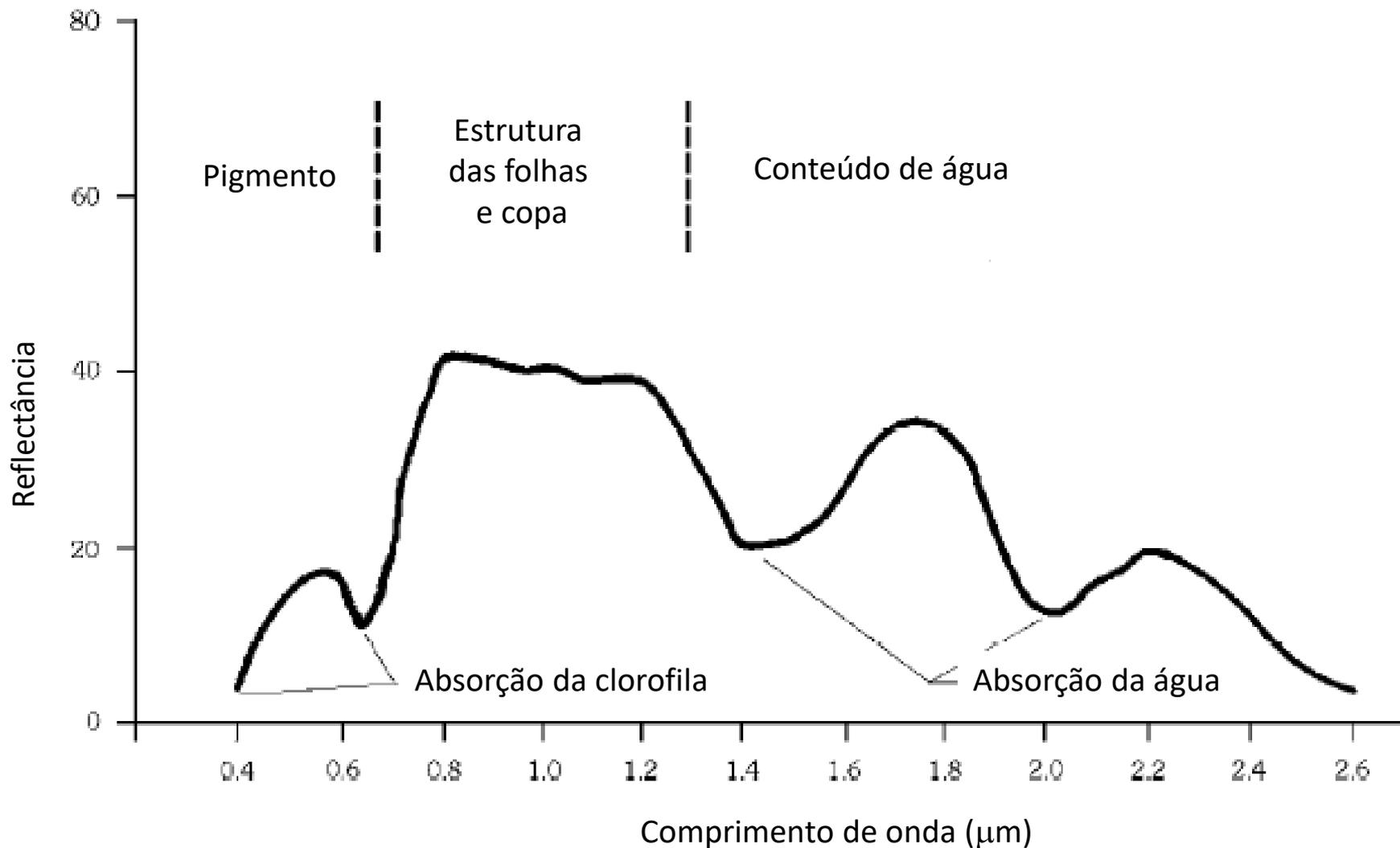




A curva de refletividade de diferentes solos nu com a variação do teor de humidade

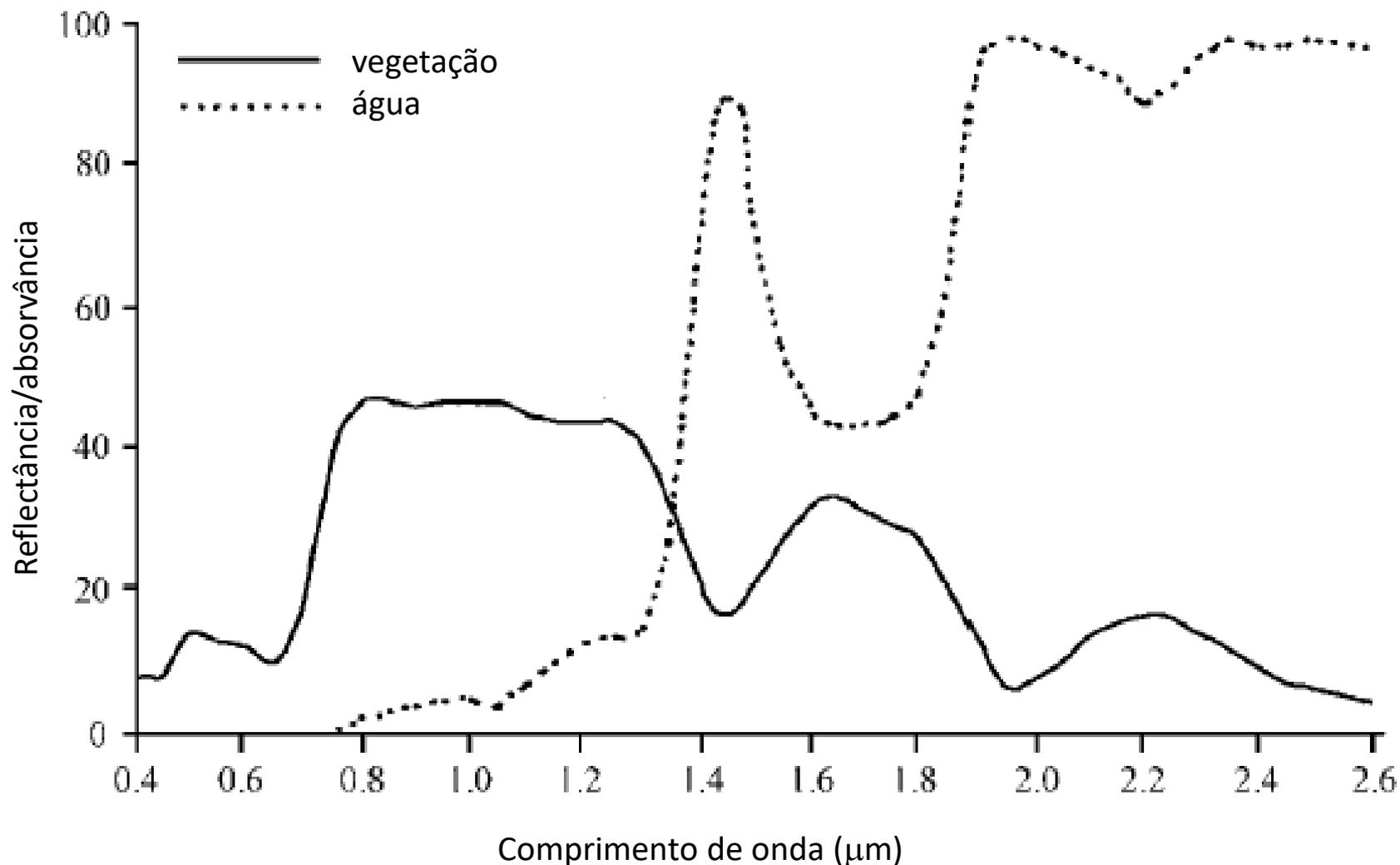


Vegetation reflectance





Comparação entre a curva de refletividade da vegetação e a curva de absorção da água





**Landsat 8
Operational
Land Imager
(OLI)
and
Thermal
Infrared
Sensor
(TIRS)**

**Launched
February 11, 2013**

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Banda 1



Banda 3, verde

12



Banda 4, vermelho



Banda 5,
Infra vermelho Próximo



Banda 6,
Infra vermelho

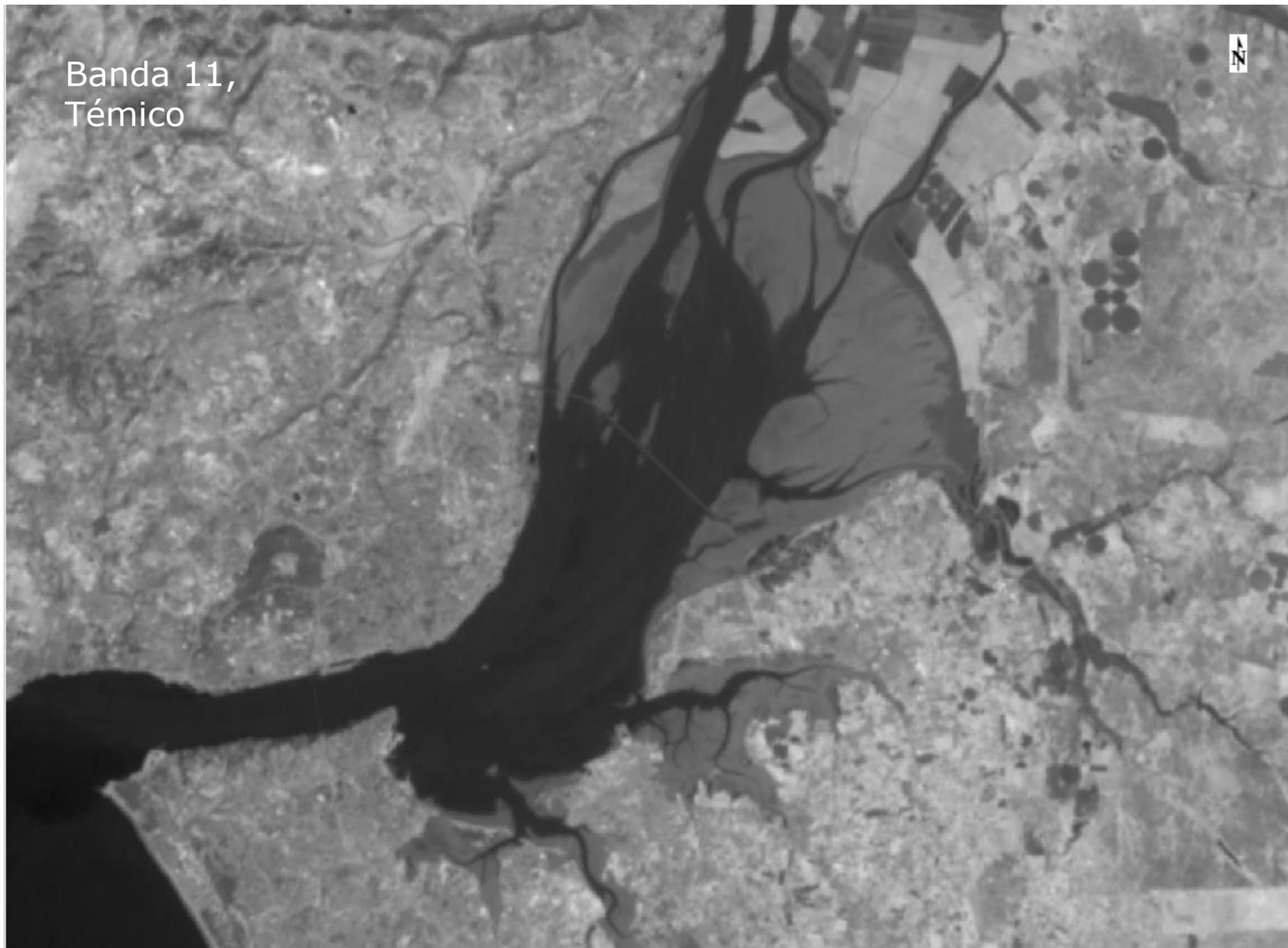


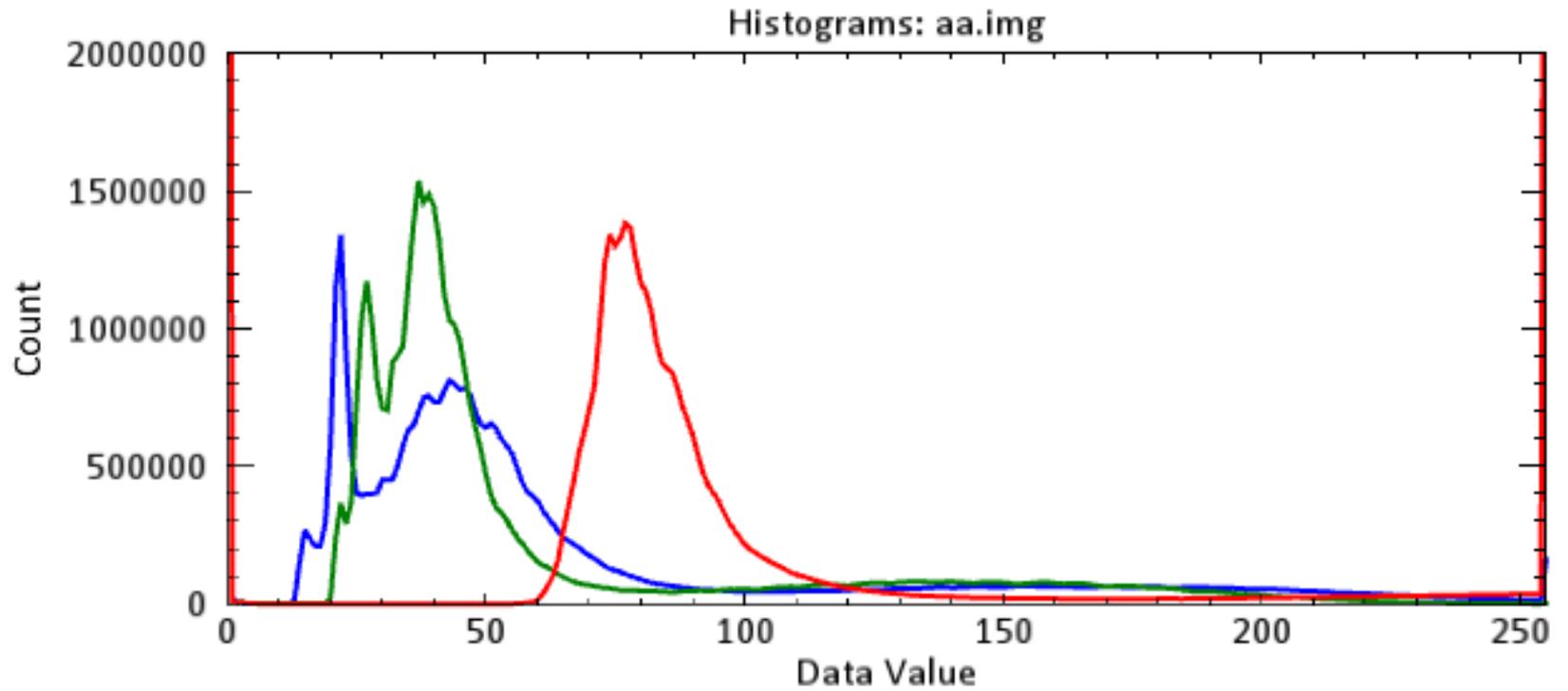
Banda 8,
Pancromático

22



Banda 11,
Témico

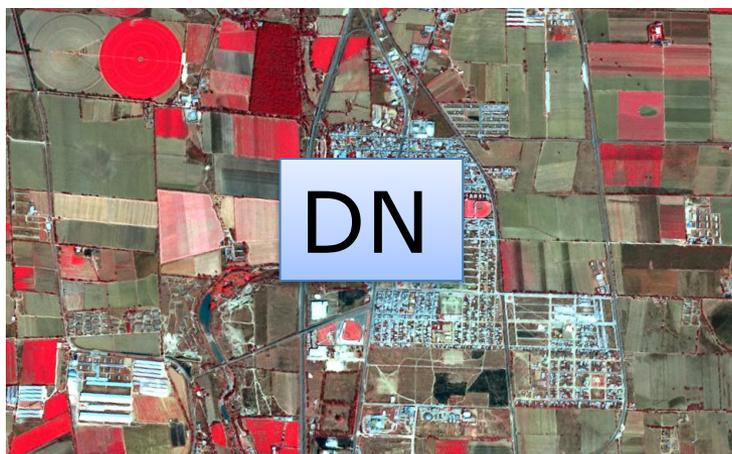




Landsat 5 : Tejo

Conversão de números digitais (DNs) para radiância

O calculo do valor da **radiância espectral** no sensor é essencial para a conversão de dados imagem de múltiplos sensores e plataformas numa quantidade com significado físico numa escala radiométrica comum.



Conversão para radiância dos produtos nível 0

Os valores dos pixels nos produtos nível 0 (raw data) são representados por Q .

A relação entre estas imagens e o valor de radiância no sensor e L_λ é dada por:

$$Q = G \times L_\lambda + B$$

$$L_\lambda = \frac{Q - B}{G}$$

A letra G é o coeficiente de ganho em cada banda.

O valor de B é o "bias" que é baseado na resposta de cada linha do sensor ao obturador no escuro.

Conversão para radiância dos produtos nível 1

Os valores dos pixels no nível 1 são representados como Q_{cal} .

A conversão dos produtos de nível 1 (Q_{cal}) em radiâncias espectrais ao nível do sensor (L_λ) requer o conhecimento dos valores mínimos e máximos dos fatores de escala originais.

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{max,\lambda} - L_{min,\lambda}}{Q_{cal,max} - Q_{cal,min}} \right) \cdot (Q_{cal} - Q_{cal,min}) + L_{min,\lambda}$$

Dinâmica da imagem.
Tipicamente $255 = 2^8 - 1$

DN

= 1

Conversão em reflectância TOA (Top of Atmosphere)

Poderemos obter uma menor variabilidade entre imagens adquiridas em diferentes datas convertendo a reflectância ao nível do sensor na reflectância exo-atmosfera (no topo da atmosfera, TOA), também conhecido como albedo planetário

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{SUN_{\lambda}} \cos \theta_S}$$

ρ_{λ} é a reflectância planetária TOA

L_{λ} é a radiância ao nível do sensor ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)

d é a distância da Terra ao Sol em unidades astronómicas (1UA= 149,597,870,691km)

Conversão para radiância dos produtos nível 1

Parâmetros calibrados para o sensor ETM+ do Landat 7 e irradiância solar exo-atmosférica (ESUN).

L7 ETM+ Sensor ($Q_{calmin} = 1$ and $Q_{calmax} = 255$)							
Band	Spectral range	Center wavelength	$LMIN_{\lambda}$	$LMAX_{\lambda}$	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$	$ESUN_{\lambda}$
Units	μm		$W/(m^2 sr \mu m)$		$(W/m^2 sr \mu m)/DN$	$W/(m^2 sr \mu m)$	$W/(m^2 \mu m)$
<i>Low gain (LPGS)</i>							
1	0.452–0.514	0.483	–6.2	293.7	1.180709	–7.38	1997
2	0.519–0.601	0.560	–6.4	300.9	1.209843	–7.61	1812
3	0.631–0.692	0.662	–5.0	234.4	0.942520	–5.94	1533
4	0.772–0.898	0.835	–5.1	241.1	0.969291	–6.07	1039
5	1.547–1.748	1.648	–1.0	47.57	0.191220	–1.19	230.8
6	10.31–12.36	11.335	0.0	17.04	0.067087	–0.07	N/A
7	2.065–2.346	2.206	–0.35	16.54	0.066496	–0.42	84.90
PAN	0.515–0.896	0.706	–4.7	243.1	0.975591	–5.68	1362
<i>High Gain (LPGS)</i>							
1	0.452–0.514	0.483	–6.2	191.6	0.778740	–6.98	1997
2	0.519–0.601	0.560	–6.4	196.5	0.798819	–7.20	1812
3	0.631–0.692	0.662	–5.0	152.9	0.621654	–5.62	1533
4	0.772–0.898	0.835	–5.1	157.4	0.639764	–5.74	1039
5	1.547–1.748	1.648	–1.0	31.06	0.126220	–1.13	230.8
6	10.31–12.36	11.335	3.2	12.65	0.037205	3.16	N/A
7	2.065–2.346	2.206	–0.35	10.80	0.043898	–0.39	84.90
PAN	0.515–0.896	0.706	–4.7	158.3	0.641732	–5.34	1362



Conversion to TOA Radiance

OLI and TIRS band data can be converted to TOA spectral radiance using the radiance rescaling factors provided in the metadata file:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

where:

L_{λ} = TOA spectral radiance (Watts/(m² * srad * μm))

M_L = Band-specific multiplicative rescaling factor from the metadata (RADIANCE_MULT_BAND_x, where x is the band number)

A_L = Band-specific additive rescaling factor from the metadata (RADIANCE_ADD_BAND_x, where x is the band number)

Q_{cal} = Quantized and calibrated standard product pixel values (DN)

Conversion to TOA Reflectance

OLI band data can also be converted to TOA planetary reflectance using reflectance rescaling coefficients provided in the product metadata file (MTL file). The following equation is used to convert DN values to TOA reflectance for OLI data as follows:

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho}$$

where:

ρ_{λ}' = TOA planetary reflectance, without correction for solar angle. Note that ρ_{λ}' does not contain a correction for the sun angle.

M_{ρ} = Band-specific multiplicative rescaling factor from the metadata (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, where x is the band number)

A_{ρ} = Band-specific additive rescaling factor from the metadata (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, where x is the band number)

Q_{cal} = Quantized and calibrated standard product pixel values (DN)



LandSat 8

Ciências
ULisboa

```
GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
REQUEST_ID = "0501505116091_00442"
LANDSAT_SCENE_ID = "LC82040332015001LGN00"
FILE_DATE = 2015-05-12T16:55:09Z
STATION_ID = "LGN"
PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_2.5.0"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
```

```
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 786.09534
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -64.91601
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 804.97119
RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -66.47478
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 741.77411
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -61.25595
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 625.50568
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -51.65446
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 382.77829
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -31.60996
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 95.19348
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = -7.86111
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 32.08530
RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -2.64961
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 707.90033
RADIANCE_MINIMUM_BAND_8 = -58.45864
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 149.59843
RADIANCE_MINIMUM_BAND_9 = -12.35389
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_10 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_10 = 0.10033
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_11 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_11 = 0.10033
```

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max,\lambda} - L_{min,\lambda}}{Q_{cal,max} - Q_{cal,min}} \right) \cdot (Q_{cal} - Q_{cal,min}) + L_{min,\lambda}$$

```
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2986E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.3298E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.2254E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 1.0333E-02
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.3233E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5725E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.3003E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1694E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.4713E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
```

```
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -64.92899
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -66.48808
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -61.26820
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -51.66480
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -31.61628
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.86268
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.65014
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -58.47033
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -12.35636
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
```



Question:

Where can I find the solar exoatmospheric spectral irradiances (ESUN) values for Landsat 8 OLI data?

Answer:

ESUN values are not provided for Landsat 8 data because they are not required for converting data to reflectance. Landsat 8's Operational Land Imager (OLI) adopted two independent National Institute for Standards and Technology (NIST) traceable radiance and reflectance calibration methods. The Landsat 8 metadata file provides coefficients necessary to convert to radiance and reflectance from the quantized and calibrated Digital Numbers (DNs) of the product

(see http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php). Thus, ESUN values are not required for reflectance conversion.

Relative Spectral Response (RSR) of the OLI spectral bands can be found on http://ldcm.gsfc.nasa.gov/spacecraft_instruments/oli_band_average.html and used along with the user's preferred solar spectrum to calculate ESUN values corresponding to Landsat 8 OLI bands. (NOTE: ESUN values calculated from RSRs were not used for OLI calibration).



LandSat 8

Ciências
ULisboa

TOA reflectance with a correction for the sun angle is then:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_{SE})}$$

where:

ρ_{λ} = TOA planetary reflectance

θ_{SE} = Local sun elevation angle. The scene center sun elevation angle in degrees is provided in the metadata (SUN_ELEVATION).

θ_{SZ} = Local solar zenith angle; $\theta_{SZ} = 90^{\circ} - \theta_{SE}$

For more accurate reflectance calculations, per pixel solar angles could be used instead of the scene center solar angle, but per pixel solar zenith angles are not currently provided with the Landsat 8 products.

REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05

REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000

```
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 0.49
CLOUD_COVER_LAND = 0.75
IMAGE_QUALITY_OLI = 9
IMAGE_QUALITY_TIRS = 9
TIRS_SSM_POSITION_STATUS = "ESTIMATED"
ROLL_ANGLE = -0.001
SUN_AZIMUTH = 158.52732765
SUN_ELEVATION = 25.19344132
EARTH_SUN_DISTANCE = 0.9833024
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 2
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 408
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 8.874
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 7.353
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 4.968
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 111
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 4.466
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
```



Level-1C

Level-1C processing includes radiometric and geometric corrections including ortho-rectification and spatial registration on a global reference system with sub-pixel accuracy.

Level-1C processing is broken down into the following steps:

- Tiles association: selection of pre-defined tiles intersecting the footprint of the required image.
 - Resampling grid computation: enabling linking of the native geometry image to the target geometry image (ortho-rectified).
 - Resampling of each spectral band in the geometry of the ortho-image using the resampling grids and an interpolation filter. Calculation of the TOA reflectances also occurs in this step.
 - Masks computation: cloud and land/water masks are generated.
 - Imagery compression of the resultant Level-1C imagery via the JPEG2000 algorithm and a GML geographic imagery-encoded header.
-



▾ Level-2

The Level-2A processing includes a scene classification and an atmospheric correction applied to Top-Of-Atmosphere (TOA) Level-1C orthoimage products. Level-2A main output is an orthoimage Bottom-Of-Atmosphere (BOA) corrected reflectance product.

Additional outputs are an Aerosol Optical Thickness (AOT) map, a Water Vapour (WV) map and a Scene Classification Map (SCM) together with Quality Indicators (QI) for cloud and snow probabilities at 60 m resolution. Level-2A output image products will be resampled and generated with an equal spatial resolution for all bands, based on the requested resolution (10 m, 20 m or 60 m). A 10 m resolution product contains the spectral bands 2, 3, 4 and 8 and an AOT map resampled from 20 m. A 20 m product contains bands 2 - 7, the bands 8A, 11 and 12 and an AOT and WV map. A 60 m product contains all components of the 20 m product and additionally the 60 m bands 1 and 9. The cirrus band 10 will be omitted, as it does not contain surface information.

The processor algorithm is a combination of state-of-the-art techniques for performing atmospheric corrections (including cirrus clouds correction [R1]), which have been tailored to the SENTINEL-2 environment together with a scene classification module described in [R2]. The scene classification algorithm allows detection of clouds, snow and cloud shadows and generation of a classification map, which consists of four different classes for clouds (including cirrus), together with six different classifications for shadows, cloud shadows, vegetation, soils/deserts, water and snow. The algorithm is based on a series of threshold tests that use as input TOA reflectance as input from the SENTINEL-2 spectral bands. In addition, thresholds are applied on band ratios and indexes like Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalised Difference Snow and Ice Index (NDSI). For each of these threshold tests, a level of confidence is associated. It produces at the end of the processing chain a probabilistic cloud mask quality indicator and a snow mask quality indicator. The algorithm uses the reflective properties of scene features to establish the presence or absence of clouds in a scene. Cloud screening is applied to the data in order to retrieve accurate atmospheric and surface parameters, either as input for the further processing steps below or for being valuable input for processing steps of higher levels.

ENVI

```
description = {Reflectance in band B2 - Unit: dl - Wavelength: 490.0nm}
```

```
samples = 10980
```

```
lines = 10980
```

```
bands = 1
```

```
header offset = 0
```

```
file type = ENVI Standard
```

```
data type = 12
```

```
interleave = bsq
```

```
byte order = 1
```

```
band names = { B2 }
```

```
map info = {UTM,5491.5,5491.5,554885.0,4445095.0,10.0,10.0,29,North,World Geodetic System 1984,units=Meters}
```

```
coordinate system string = {PROJCS["WGS 84 / UTM zone 29N", GEOGCS["WGS 84", DATUM["World Geodetic System 1984", AUTHORITY["EPSG","7030"]], PRIMEM["Greenwich", 0.0], UNIT["degree", 0.017453292519943295], AXIS["Geodetic latitude", NORTH], AXIS["Geodetic longitude", EAST], AUTHORITY["EPSG","31466"]], PROJECTION["Transverse_Mercator", AUTHORITY["EPSG","9807"]], PARAMETER["central_meridian", -9.0], PARAMETER["scale_factor", 0.9996], PARAMETER["false_easting", 500000.0], PARAMETER["false_northing", 0.0], UNIT["Meter", 1.0], AXIS["Northing", NORTH], AUTHORITY["EPSG","32629"]]}}
```

```
wavelength = {490.0}
```

```
data gain values = {1.0E-4}
```

```
data offset values = {0.0}
```

Exercício

1. Calcule a irradiância solar no topo da atmosfera. Considere que a temperatura do Sol é de cerca 5800°K . O seu raio é $r = 6.96 \cdot 10^8 \text{ m}$ e a sua distância à Terra $D = 1.50 \cdot 10^{11} \text{ m}$.
2. De acordo com a lei do deslocamento de Wiens qual é o comprimento de onda de máxima emissividade do Sol? (considere a temperatura de 5800 K)
3. Considere um pixel com os valores (75, 36, 29, 123, 103) nas primeiras 5 bandas de uma imagem Landsat 7 ETM+. Quais os valores de radiância espectral para o pixel nas 5 bandas?
4. Considerando os dados do problema 3, determine o valor do índice de vegetação NDVI para esse pixel e interprete o valor. A imagem foi adquirida no dia 6 de Julho de 2007. O Sol tinha no momento da aquisição da imagem num azimute de 122.8° e uma elevação de 64.5° .



Exercício

4.5 Sabendo que a irradiância espectral no topo da atmosfera é em média $1039 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ para a banda 4 do Landsat ($0.772\text{-}0.898\mu\text{m}$), que a transmissividade atmosférica na direção do Sol é 0.91 e que a radiação difusa é nula para essa banda, estime a irradiância à superfície para essa banda.

$$L_{\lambda}^s(x, y) = \rho(x, y, \lambda) \frac{\tau_v(\lambda)}{\pi} \{ \tau_s(\lambda) E_{\lambda}^0 \cos(\theta(x, y)) + F(x, y) \cdot E_{\lambda}^d \} + L_{\lambda}^{sp}(x, y)$$

4.6 Suponha que um determinado pixel na banda ($0.79\text{-}0.89 \mu\text{m}$) tem um valor de radiância de $90 \text{ W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e que a irradiância à superfície nessa banda na altura da aquisição da imagem é de $900 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$. Suponha ainda que a transmissividade atmosférica na direção do sensor nessa banda do espectro é de 0.91. Com base na informação de que dispõe estime a reflectância da parcela de terreno correspondente a esse pixel da imagem.