

CAPÍTULO 2

AS INTERAÇÕES ENTRE A ENERGIA E A MATÉRIA

1.0. Introdução

No Capítulo 1 vimos que o sensoriamento remoto é o ramo da ciência que retrata a obtenção e análise de informações sobre materiais (naturais ou não), objetos ou fenômenos que ocorrem na superfície dos planetas, estrelas, etc., utilizando a energia eletromagnética refletida e/ou emitida dos materiais estudados que são registrados por dispositivos situados à distâncias dos mesmos (sensores) (Figura 1).

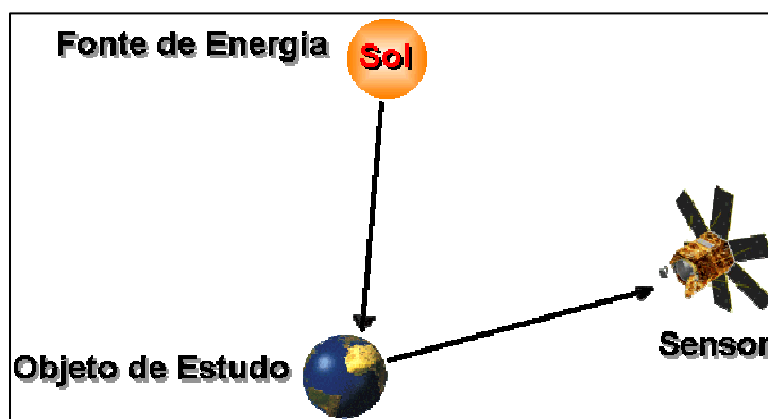


Figura 1. Fonte de energia, objeto de estudo e sensor.

O sensor é um dispositivo capaz de responder à radiação eletromagnética em determinada faixa do espectro eletromagnético, registrá-la e gerar um produto numa forma adequada para ser interpretada pelo usuário (ROSA, 1992).

Os dados que podem ser registrados pelos sensores remotos são:

- Planimetria - Localização (X, Y);
- Topografia/ Batimetria - Elevação (z);
- Cor de objetos;
- Característica da absorção de REM pela clorofila na vegetação;
- Biomassa da vegetação;
- Conteúdo de umidade da vegetação;
- Temperatura;
- Textura ou rugosidade da superfície.

Segundo Alvaro Crósta (1993), as imagens originadas por sensores remotos estão presentes cada vez mais do nosso dia-a-dia . Estão presentes nos **jornais e na televisão** informando as **informações meteorológicas** (chuvas, estiagem, neve, furacões, deslocamento de tornados, etc)

A função principal de processar digitalmente as imagens de sensoriamento remoto é a de **fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da informação contidas nas imagens**. O uso de sistemas computacionais é de fundamental importância para a análise e manipulação das imagens brutas. O resultado deste processamento é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

O objetivo principal do processamento de imagens é o de remover as barreiras como:

- **Enorme volume de informação;**
- **Vários tipos de degradações e distorções, inerentes ao sistema visual humano, facilitando a extração de informações a partir de imagens.**

1.1. Tipos de sistemas sensores:

Os sensores podem ser passivos ou ativos. A diferença existente entre os dois é a seguinte:

- **Sistema passivo:** Utilizam fonte de energia externa (Figura 2). Ex. Luz solar;
- **Sistema ativo:** fornece a energia para imagear (Figura 3). Ex Radar (Microondas).

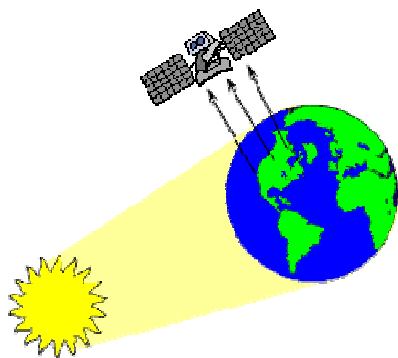


Figura 2. Sistema passivo. Ex: Landsat, Spot, Ikonos, etc

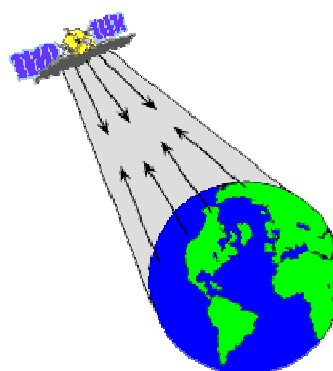


Figura 3. Sistema ativo. Ex: Radarsat, Jers-1, etc.

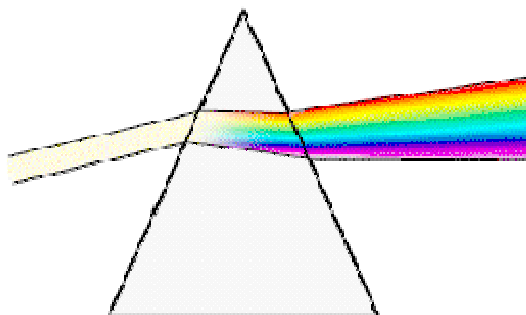
2.0. A natureza da radiação eletromagnética (REM)

Toda matéria a uma temperatura acima de zero absoluto (0° K) **emite energia**. Desta maneira, todo **corpo negro** com temperatura acima de zero absoluto pode ser considerado como uma fonte de radiação.

Existem duas teorias que explicam a propagação de energia a partir de uma fonte: **a teoria do modelo corpuscular** e **a teoria do modelo ondulatório**.

A teoria do modelo corpuscular **considera que a energia se propaga pela emissão de um fluxo de partículas (fótons) que se movem à velocidade da luz**. Já a teoria do modelo ondulatório **considera que a propagação da energia ocorre através de um movimento ondulatório**.

Segundo Maxwell, a aceleração de uma carga elétrica provoca perturbações no campo elétrico e magnético, que se propagam repetitivamente no vácuo. Estas perturbações são denominadas de **ondas eletromagnéticas**. A luz se propaga como uma série de ondas que explicam a refração da luz por meio de um prisma, lentes e difração.



A luz tem um comportamento natural dual **contínuo e discreto**. Segundo as teorias da propagação da luz de Newton e Planck, a luz se propaga como unidades discretas que viajam em "**linha reta**".

Onda eletromagnética é o resultado da oscilação dos **campos elétrico (E) e magnético (M) segundo um padrão harmônico de ondas**. Um padrão harmônico de ondas significa que as ondas são **espaçadas repetitivamente** no tempo.

A onda eletromagnética se propaga no vácuo à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s). O número de ciclos de

onda que passa por um ponto do espaço num determinado intervalo de tempo define a **freqüência (f)** da radiação eletromagnética. O intervalo de tempo relativo à passagem de um ciclo representa o **período (T)** da onda eletromagnética.

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\lambda = c \cdot T \quad (\text{Eq. 3})$$

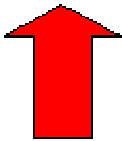
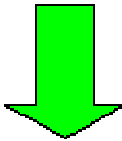
	
Aumento do comprimento de onda	Diminui a energia de um foton, ou vice-versa

Figura 4. Relação entre comprimento de onda e freqüência.

É importante observar que uma onda eletromagnética representa a variação no tempo dos campos elétrico e magnético. Tais campos sempre ocorrem juntos. Assim sendo, quando as ondas eletromagnéticas interagem com a matéria, o resultado desta interação dependerá das propriedades elétricas e magnéticas da matéria.

2.1. Conceitos importantes

- **Radiação do corpo negro:** todo corpo com temperatura acima de zero graus Kelvin ($0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$) emite radiação eletromagnética. Para um dado comprimento de onda a quantidade de energia emitida atinge um **máximo** a uma dada temperatura do corpo negro. O comprimento de onda no qual a energia emitida é máxima pode ser determinada pela **Lei do Deslocamento de Wien**:

$$\lambda_{\max} = \frac{2.8983 \times 10^{-3} \text{ K}^\circ\text{m}}{T} \quad (\text{eq. 4})$$

Em que:

T = Temperatura em graus kelvin.

- **Teoria quântica:** explica a interação da REM com a matéria. “A energia é composta por unidades discretas denominadas por Max Planck de **Fótons ou Quanta**”. A equação de Planck explica o efeito fotoelétrico. O impacto do quanta sobre uma determinada superfície metálica causa a **emissão de elétrons**. **Planck descobriu que a luz é absorvida e emitida em unidades discretas denominadas de QUANTA ou FÓTONS** (Figura 5). O tamanho de cada unidade é diretamente proporcional a freqüência da energia da radiação. A equação de Planck explica o efeito fotoelétrico.

$$Q = h \cdot f \quad (\text{eq. 5})$$

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{eq. 6})$$

Em que:

Q = energia de um fóton;

h = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J/s);

f = freqüência;

c = velocidade da Luz (3×10^8 m/s)

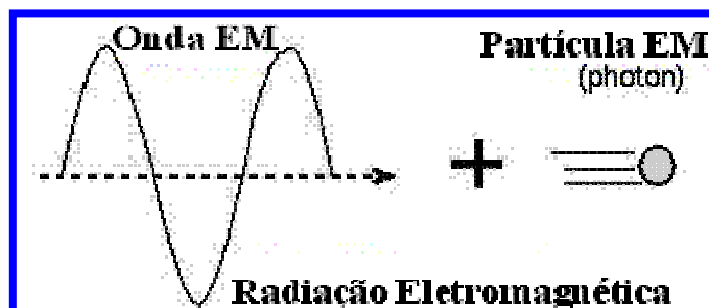


Figura 5. Esquema mostrando a emissão de fótons.

- **Radiação eletromagnética (ondas de rádio, luz, etc):** Consiste da interação, de campos elétrico e magnético que se propagam no vácuo com uma velocidade de **299.792 km por segundo**. São gerados por meio de excitação termal, processos nucleares (**fusão ou fissão**) ou por **bombardeamento** através de outra radiação. A REM não necessita de um meio para se propagar.
- **Reações termonucleares:** responsáveis pelas **cores das estrelas**, incluindo o sol, fornece a energia das estrelas, primariamente na forma de REM. Essas ondas

são emitidas e formadas por diferentes frequências e comprimentos de ondas de uma larga de faixa do espectro eletromagnético. O raio do sol é um exemplo de REM que é emitida naturalmente.

- **Teoria ondulatória:** a radiação eletromagnética se propaga na forma de onda, à velocidade da luz, segundo um campo elétrico (E) e um campo magnético (M), ortogonais entre si, de modo harmônico e com uma trajetória senoidal (Figura 6).

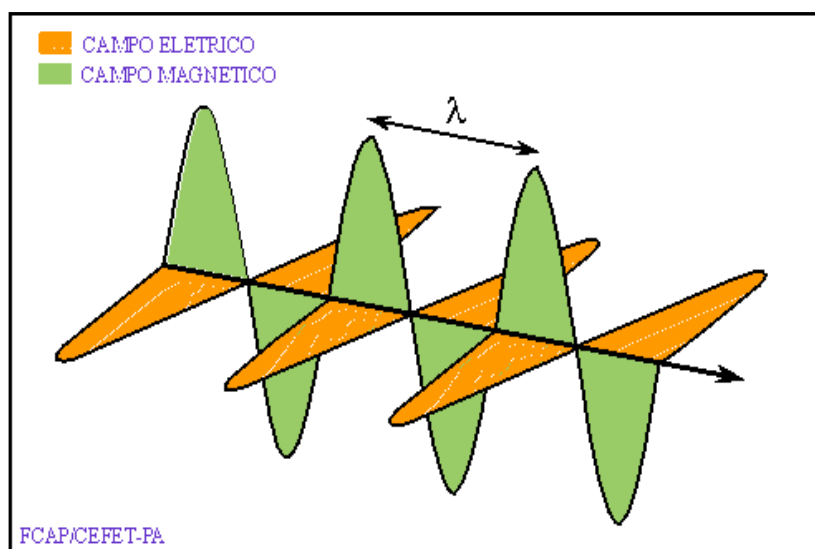


Figura 6. Esquema mostrando uma radiação eletromagnética, com a presença de 2 campos: um elétrico e outro magnético ortogonais entre si.

- **Fluxo radiante:** razão no qual os fótons chegam a superfície sendo medida em watts (quantidade de energia chegada na superfície em unidades de tempo). É o fluxo que deixa a superfície e é registrada pelos sensores.
- **Irradiância:** É o fluxo radiante por unidade de área (watts por metro quadrado) recebido.
- **Corpo negro:** hipoteticamente entende-se como um corpo que absorve toda energia, reflete nenhuma, emite energia com perfeita eficiência.
- **Leis de Stefan – Boltzmann:** define as relações entre o total da radiação emitida (E) em watts/cm² e a

temperatura (T) expressa em graus kelvin (K) (Figura 7).

$$E = \sigma T^4 \quad (\text{eq. 7})$$

Em que:

E = radiação total emitida pela superfície (W/m^2);

σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5,6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$;

T = temperatura em Kelvin emitida pelo material.

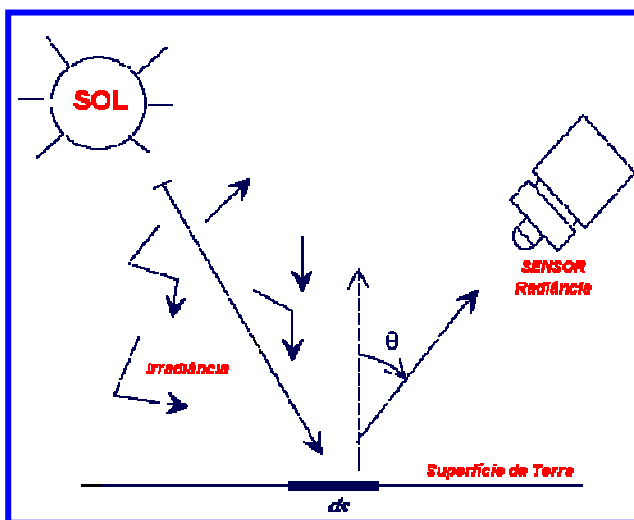


Figura 7. Esquema mostrando a radiação emitida pela superfície.

O Sol tem uma temperatura maior que a do planeta Terra, seu pico de emissão está entre **0,4 e 0,7 μm** , que é a parte visível do espectro eletromagnético. A máxima emissão de energia eletromagnética da Terra encontra-se em torno de **9 μm** . Outras estrelas, como a **Sirius** e a **Veja**, tem emissão máxima na região do **ultravioleta** (Figura 8).

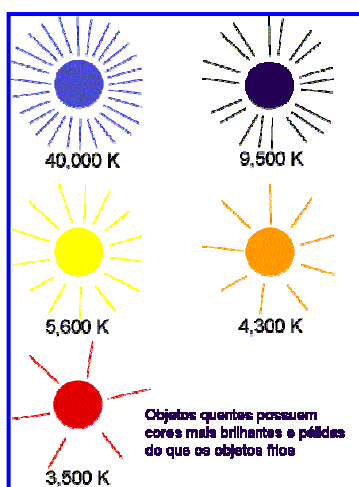


Figura 8. Emissão máxima de algumas estrelas.

3.0. O espectro eletromagnético

A radiação natural forma um espectro contínuo, que contém comprimentos de ondas de fenômenos até dezenas de quilômetros. Entretanto, divide-se o espectro em diversas faixas, denominadas de **bandas espectrais** (Figura 9 e 10).

A **banda espectral do visível (VIS)** representa apenas uma pequena janela do espectro. Se estende de **0,4 a 0,7 μm** . Neste estreito intervalo se encontram as faixas relativas ao **azul, verde e vermelho**.

Em seguida vem o **infravermelho (IV: IR – “Infra Red”)**, compreendendo uma larga faixa que cobre do **0,7 até 1.000 μm** . O infravermelho pode ser dividido em duas faixas:

- **Infravermelho próximo ou reflexivo (IVP: NIR – “Near Infra Red”)**: vai de 0,7 a 3,0 μm ;
- **Infravermelho distante ou emissivo (IVD: FIR – “Far Infra Red”)**: vai de 3,0 a 1.000 μm .

Alguns autores dividem o infravermelho em três faixas: **NIR**, compreendendo a faixa de 0,7 a 1,3 μm , o **infravermelho médio (IVM: MIR – “Mid Infra Red”)**, que vai do 1,3 a 3,0 μm e o **FIR**, cobrindo a faixa de 3,0 a 1.000 μm .

Sucedendo o infravermelho distante tem-se o intervalo das **microondas**, que cobrem a faixa de **1 a 1000 mm**, incluindo as regiões correspondentes às bandas C, L e X.

A intensidade máxima de radiação solar ocorre próxima ao comprimento de onda de **0,47 μm (azul – visível)**, apresentando uma queda acentuada em direção à região do ultravioleta, enquanto que em direção à região do infravermelho a queda é bem atenuada.

Observando o espectro eletromagnético do ponto de vista do sensoriamento remoto, os sistemas ópticos passivos utilizam, com maior frequência, a faixa do espectro que se estende do **ultravioleta (UV) até o infravermelho distante (IVD)**, correspondendo aos comprimentos de onda de **0,2 a 12 μm** . Já os sistemas

ativos de radar utilizam com maior frequência a faixa do espectro correspondente ao das **microondas**, variando de **1 a 50 cm**.

4.0. Fontes de radiação eletromagnética

O Sol é a principal fonte de radiação eletromagnética disponível para o sensoriamento remoto da superfície terrestre. Quando observado como fonte de energia eletromagnética, o Sol pode ser considerado como uma esfera de gás aquecido pelas reações nucleares de seu interior. A energia irradiada pela superfície aparente do Sol é a principal fonte de radiação eletromagnética no Sistema Solar. Tal energia é denominada fluxo radiante.

Para fins de sensoriamento remoto, o Sol pode ser visto como um corpo negro com temperatura equivalente a **5.900° K**. O conceito de corpo negro é de um objeto que irradia a uma taxa máxima por unidade de área, e por comprimento de onda, numa determinada temperatura. Da mesma forma que um corpo negro irradia toda energia que possui, ele é capaz de absorver toda energia que nele incide. É claro que na natureza não há corpos negros. Este conceito é concebido para melhor compreensão do processo de radiação.

Conforme visto anteriormente, o máximo de energia disponível na superfície da Terra encontra-se na faixa de **0,4 a 0,7 μm** , correspondente à região do **visível** do espectro eletromagnético. Por outro lado, existem regiões do espectro eletromagnético para as quais a **atmosfera é opaca**, não permitindo a passagem da radiação eletromagnética. Estas regiões são conhecidas como **“bandas de absorção da atmosfera”**. Já as regiões transparentes à radiação eletromagnética são denominadas **“janelas atmosféricas”**.

As janelas atmosféricas têm grande importância porque **possibilitam a reflexão da radiação pela Terra** e podem ser aproveitadas pelos sistemas sensores passivos. Além de toda a faixa do visível, as janelas mais importantes

localizam-se no infravermelho: de 0,7 a 3,5 μm (NIR); de 3,5 a 4,0 μm e de 8,0 até 12,0 μm (FIR).

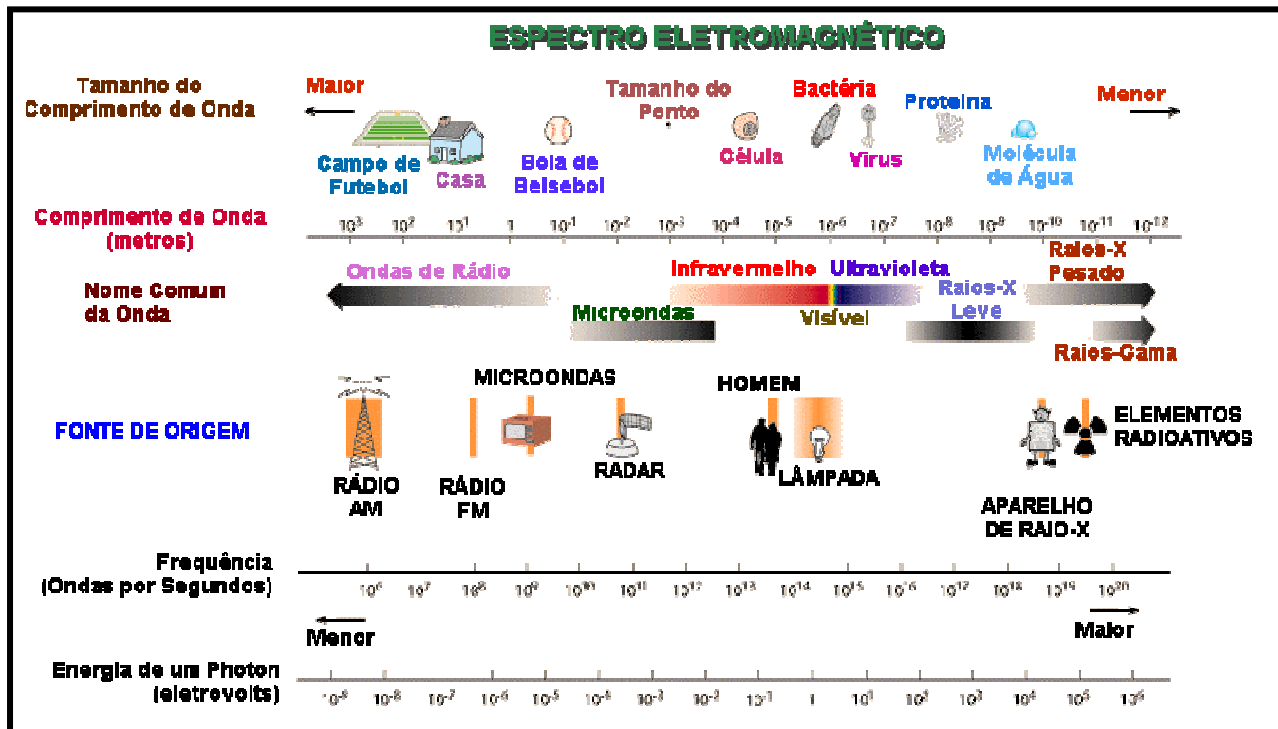


Figura 9. Esquema do espectro eletromagnético.

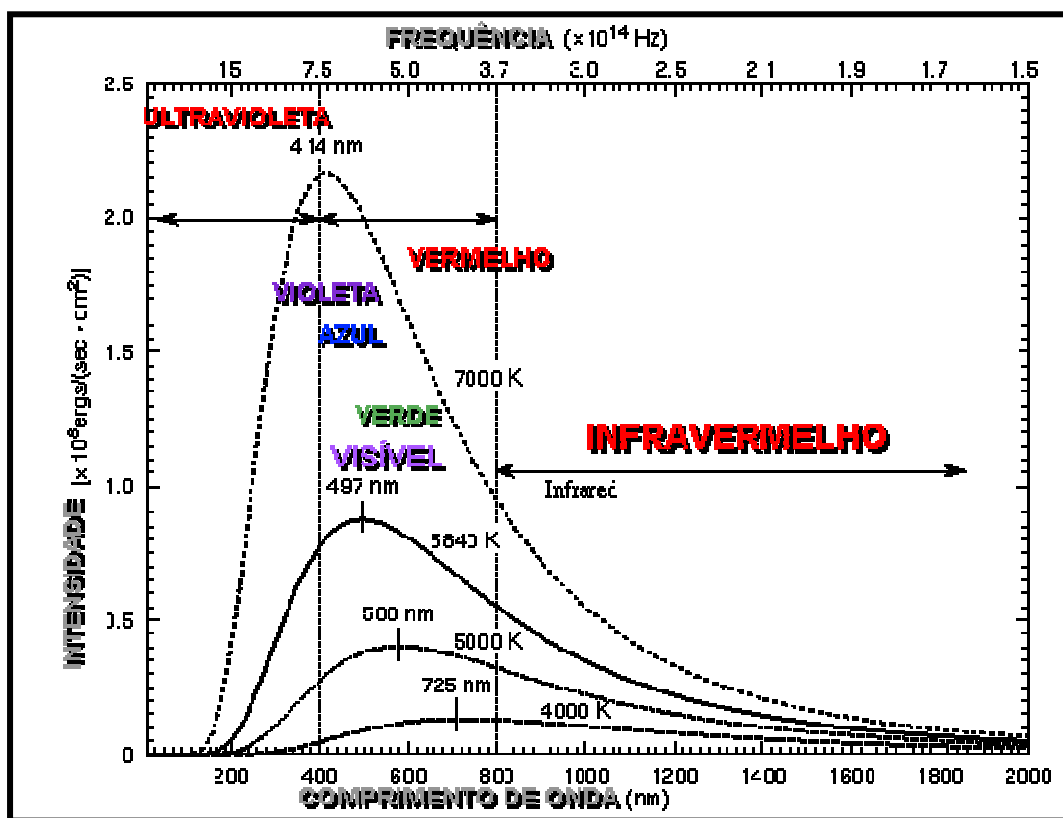


Figura 10. Relação do comprimento de onda com a intensidade de radiação.

Durante o percurso através da atmosfera, o fluxo radiante sofre dois tipos de alterações, quais sejam: o **espalhamento e a absorção**. Dessa maneira, se I_o for a intensidade inicial do fluxo radiante e I_i a intensidade do fluxo após ter sofrido o espalhamento e a absorção pelo meio, é fácil verificar que $I_o > I_i$. Esta redução, provocada tanto pela absorção quanto pelo espalhamento é chamada de **atenuação atmosférica**.

Esta atenuação da radiação solar pela atmosfera faz com que, em sensoriamento remoto, denomina-se a radiação eletromagnética acima de $6 \mu\text{m}$ de **fluxo termal emitido pela superfície da Terra, pois a partir desta região a atenuação atmosférica torna-se inviável a utilização do fluxo solar**. O fluxo solar com comprimento de onda superiores a $6 \mu\text{m}$ que atinge a superfície da Terra é desprezível. De modo semelhante, as regiões referentes a **comprimentos de onda inferiores a $0,3 \mu\text{m}$ (raios gama, X e ultravioleta) também se comportam como janelas opacas**, com pouca energia chegando à superfície terrestre.

Os principais constituintes atmosféricos responsáveis pela absorção da radiação solar são **gases e aerossóis**. A Tabela 1 apresenta os principais gases e as bandas de absorção correspondentes.

Tabela 1. Bandas de absorção da atmosfera terrestre.

Gás	Bandas de absorção
O ₂ (oxigênio)	0 – 0,3 μm
O ₃ (ozônio)	5,0 – 9,5 μm
H ₂ O (vapor d'água)	0,7 – 0,8; 3,3; 5,5 – 7,5; 11,9 μm
C ₂ O (gás carbônico)	2,7 – 2,9; 4,1 – 4,2; 9,4; 12,6; 14,0 μm

5.0. Medidas radiométricas

Em sensoriamento remoto o que se registra, basicamente, é o **fluxo radiante** que deixa a superfície em direção ao sistema sensor. O que interessa é conhecer como esse fluxo radiante se modifica espectral e

especialmente numa determinada área. Como o fluxo que deixa uma superfície é medido durante um breve intervalo de tempo (intervalo de exposição ou integração), o que é realmente registrado é a **energia (potência x tempo)**. Geralmente os intervalos de exposição ou integração são constantes, o que faz com que diferenças de cena para cena sejam devidas a modificações no fluxo radiante registrado. Os principais fatores causadores destas modificações são a **condição atmosférica e o ângulo de incidência do fluxo radiante**.

A Tabela 2 mostra as principais grandezas radiométricas e suas unidades de medida.

Tabela 2. Principais grandezas radiométricas e suas unidades de medida.

Grandeza Radiométrica	Unidade de Medida	Conceito
Energia Radiante	Joules (J)	Energia transportada em forma de REM
Fluxo Radiante	Watt (W)	Taxa de variação de energia radiante no tempo
Irradiância	Watt por metro quadrado (Wm^{-2})	Fluxo incidente sobre uma superfície por unidade de área
Excitância	Watt por metro quadrado (Wm^{-2})	Fluxo radiante deixando uma superfície por unidade de área
Emissividade	Adimensional	Razão entre a Excitância de um material pela excitância de um corpo negro à mesma temperatura
Absortância	Adimensional	Razão entre o fluxo absorvido e o fluxo incidente numa superfície
Reflectância	Adimensional	Razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente numa superfície
Transmitância	Adimensional	Razão entre o fluxo transmitido e o fluxo incidente numa superfície
Energia luminosa (Quantidade de luz)	Lumen – segundo (talbot) lms	Energia na faixa do visível em função da eficácia luminosa da radiação
Iluminância	Lux ($lm\ m^{-2}$)	Fluxo luminoso incidente sobre uma superfície por unidade de área

6.0. Estudo das radiações de interesse para o sensoriamento remoto

6.1 Radiação ultravioleta

A radiação **ultravioleta** ou **UV** é a porção do espectro eletromagnético das radiações de **comprimento de ondas pequenos**, no qual são usualmente utilizados em sensoriamento remoto (Figura 11). Esta radiação antecede a porção violeta da radiação do visível, por este motivo tem esse nome. Alguns materiais na superfície da Terra, principalmente **minerais e rochas**, fluorescem e emitem luz visível quando expostos a radiação ultravioleta.

Ex: Luz negra nas casas de shows fluorescem as roupas de cor branca (principalmente).

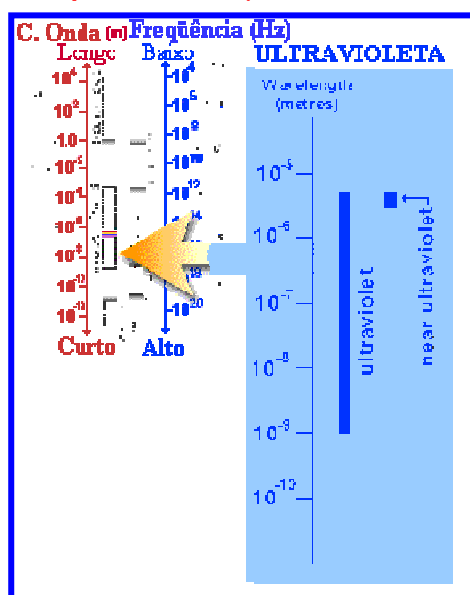


Figura 11. Localização da radiação ultravioleta.

6.2. Radiação visível

É a radiação que nossos olhos, ou melhor, nosso sensor pode detectar do espectro eletromagnético (EEM). Apesar de ser uma porção do EEM muito pequena, mais é a mais importante para o ser humano, já que as outras radiações são invisíveis para os nossos olhos, porém, as outras radiações podem ser detectadas através de outros sensores especiais produzidos pelo homem. A radiação visível cobre um faixa aproximada de **0,4 até 0,7 μ m** (Figura 12 e 13) . A radiação do visível varia de um

comprimento de onda pequeno (**violeta**) ao de maior comprimento (**vermelho**). Apenas uma parte da radiação do visível o homem é capaz de visualizar.

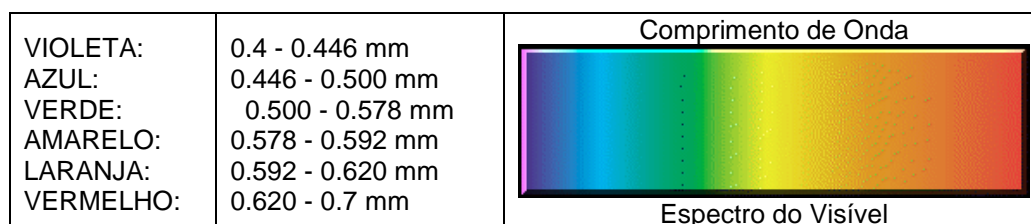


Figura 12. Cores correspondentes à radiação do visível.

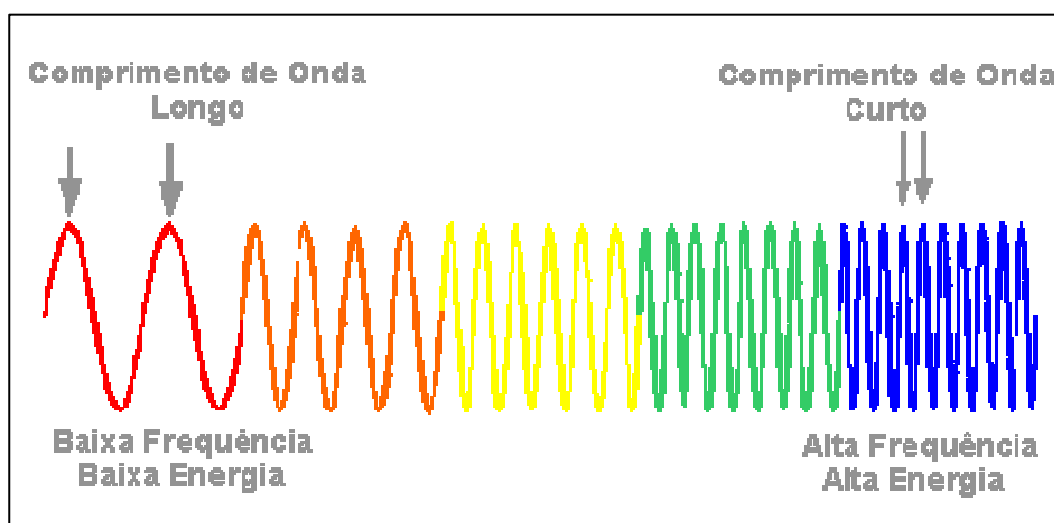


Figura 13. Comprimento de onda das cores do visível.

Azul, verde e vermelho são as cores primárias ou ondas de comprimentos do espectro do visível. São definidos pelo fato de não poderem ser criadas a partir de duas outras cores primárias, porém, todas as outras cores podem ser geradas a partir das 3 cores primárias.

A radiação proveniente do sol é composta por **REM uniformes e homogêneas**, na verdade a radiação que chega na superfície da Terra é formada principalmente por radiações **ultravioleta, visível e infravermelho**. A porção visível da radiação pode ser verificada quando a luz proveniente do sol atravessa um **prisma** onde a luz é diferenciada de acordo com seu comprimento de onda (Figura 14).

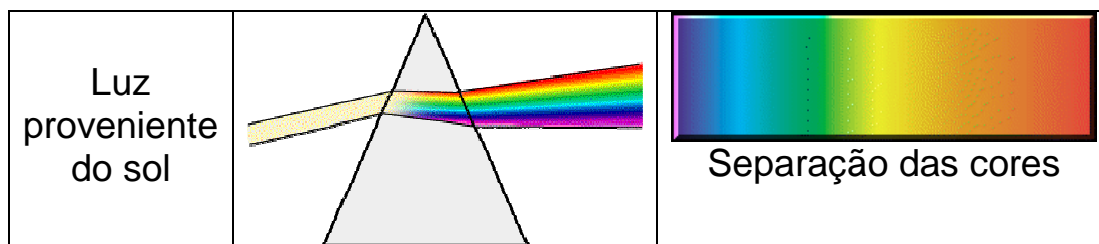


Figura 14. Decomposição da luz branca.

Esse fenômeno ocorre na natureza gerando o arco-íris (Figura 15). As gotas d'água funcionam como um prisma.

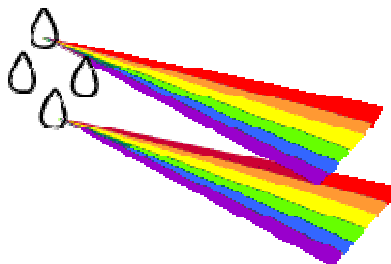


Figura 15. Formação do arco-íris.

A Figura 16 mostra a localização da radiação visível no espectro eletromagnético.

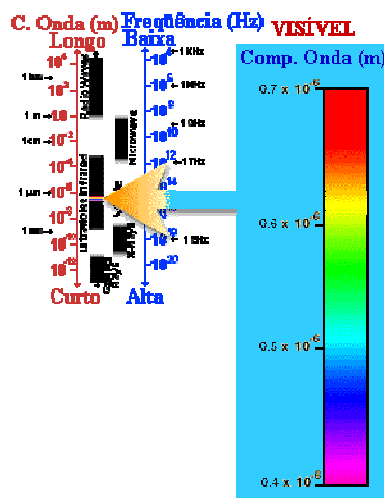


Figura 16. Localização da radiação visível no espectro eletromagnético.

6.3. Radiação infravermelho

A **radiação infravermelho (IV) ou IR (infrared)** cobre uma faixa de comprimento de onda que varia de **0,7 mm até 100 mm**, representando uma faixa mais 100 vezes maior que a região do visível (Figura 17). A região do infravermelho pode ser dividida em duas categorias baseado nas propriedades de suas radiações: O Infravermelho Refletido e o Infravermelho Termal.

A radiação no IV Refletido é usada no sensoriamento remoto por ser muito parecida com a radiação do visível. Essa radiação cobre um faixa que vai de **0,7 mm até 3,0 mm**.

A **radiação IV Termal** é totalmente diferente da radiação do visível e da radiação do IR Refletido, pois como essa energia é essencialmente a radiação que é emitida da superfície da terra na forma de calor. A radiação IV Termal é uma faixa de comprimento de onda de **3,0mm até 100mm**.

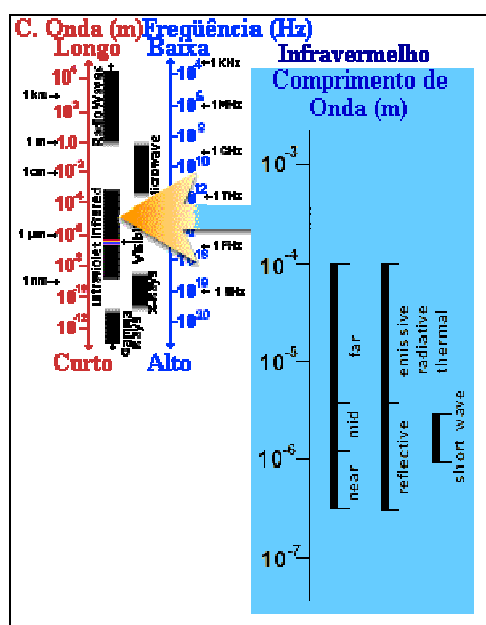


Figura 17. Localização da radiação infravermelho.

6.4. Radiação microrondas

Esta parte do espectro eletromagnético é a porção que está havendo um maior interesse para aplicações de sensoriamento remoto recentemente. As radiações de Microondas possuem comprimentos de ondas que variam de **1mm até 1 m** (Figura 18). Essa faixa é usada em sensoriamento remoto. A porção desta radiação de **comprimentos de ondas mais curtos** possuem propriedades similar a radiação do infravermelho termal, enquanto, as de maiores comprimentos de ondas são usadas para **transmissão de rádio e TV**.

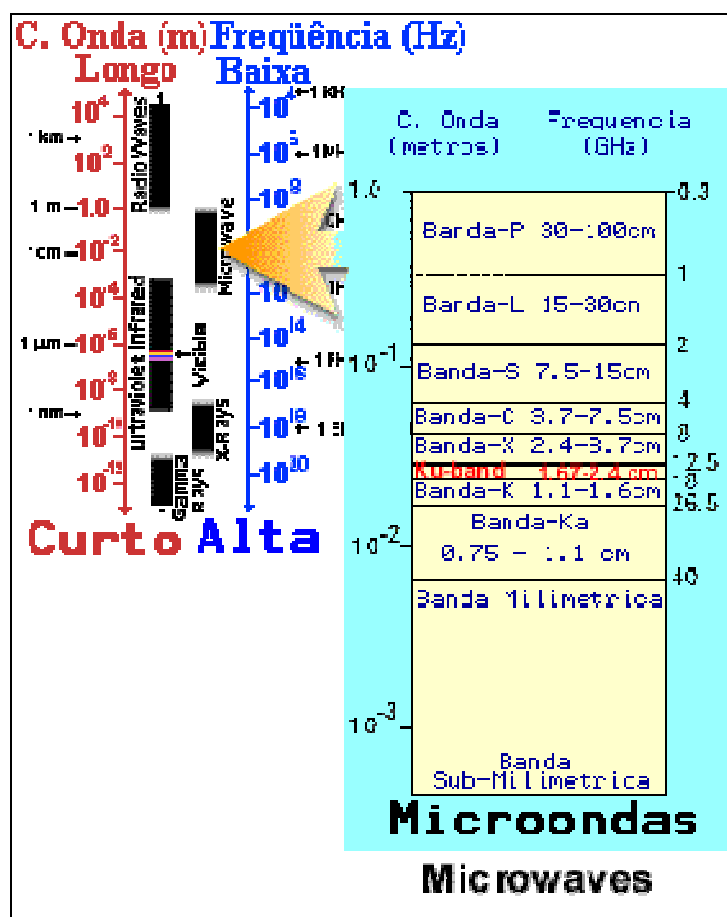


Figura 18. Localização da radiação imicrorondas.

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

