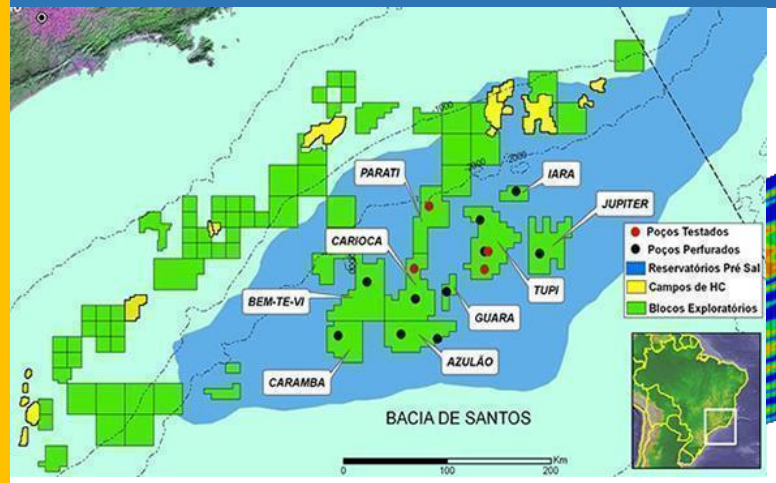
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

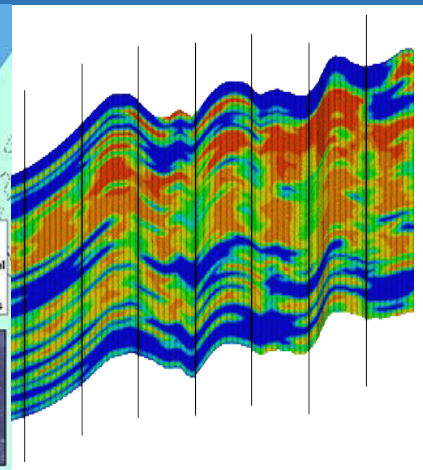
Escola Politécnica

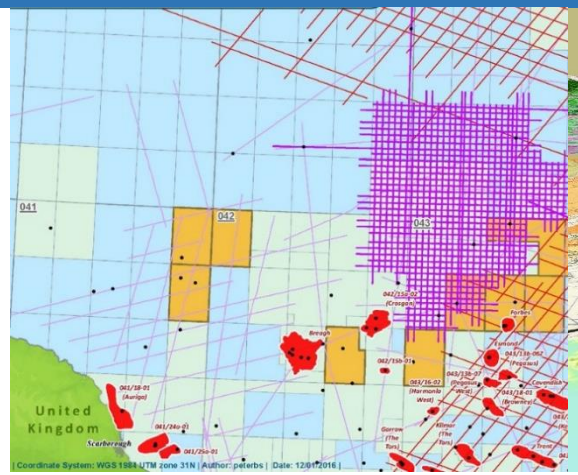
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo – PMI

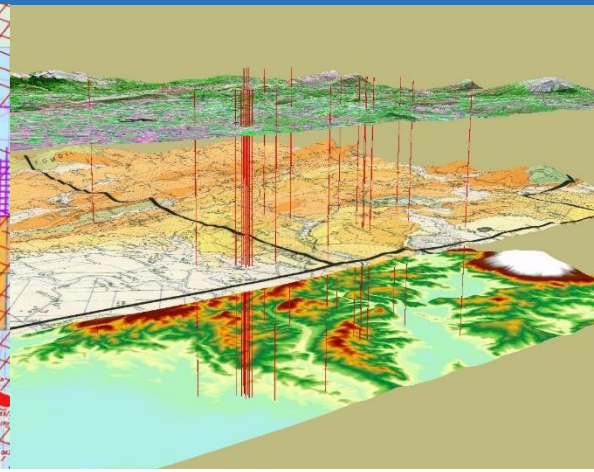
Graduação em Engenharia de Petróleo

PMI 3331 – GEOMÁTICA APLICADA À ENGENHARIA DE PETRÓLEO



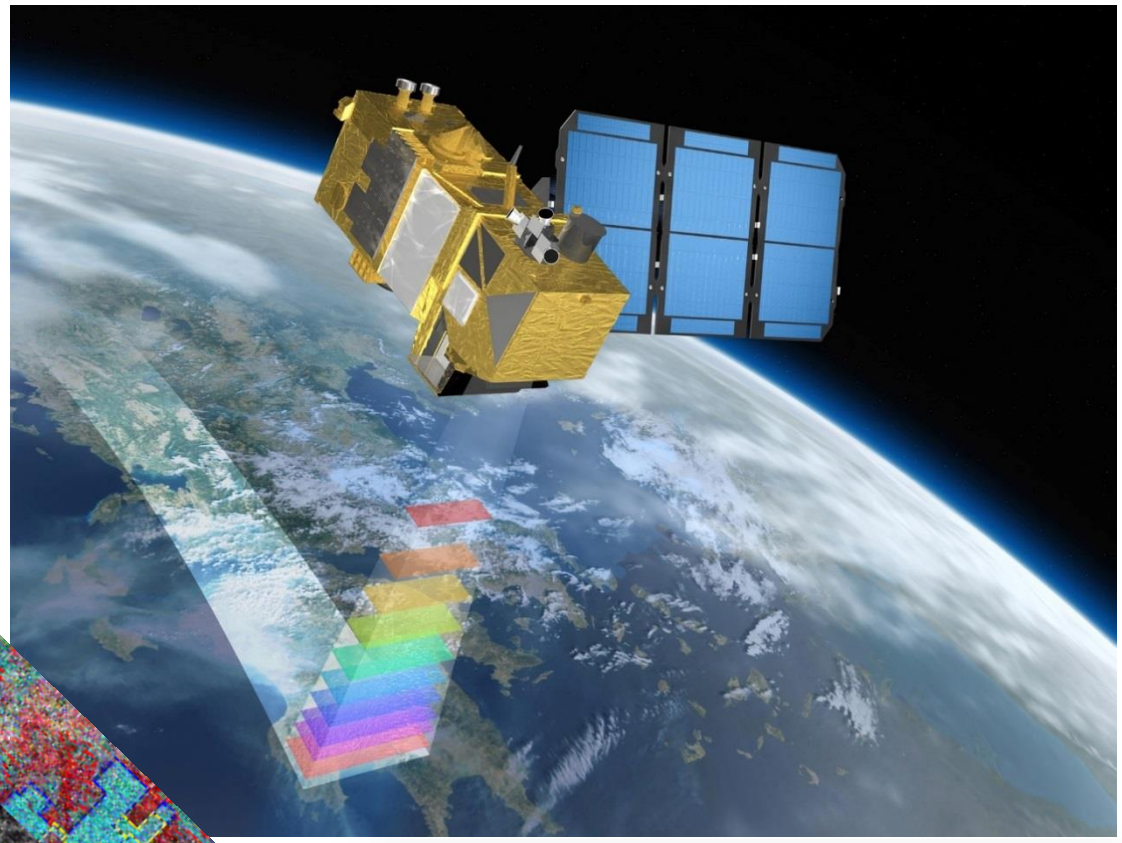


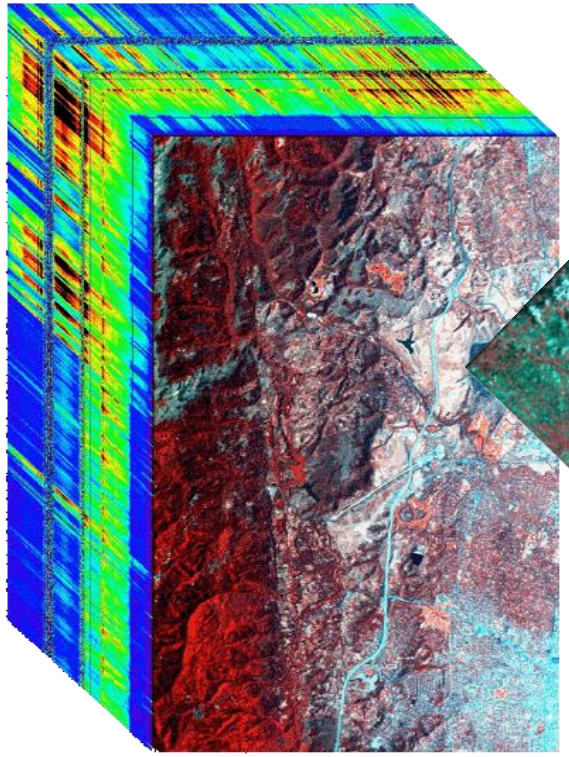


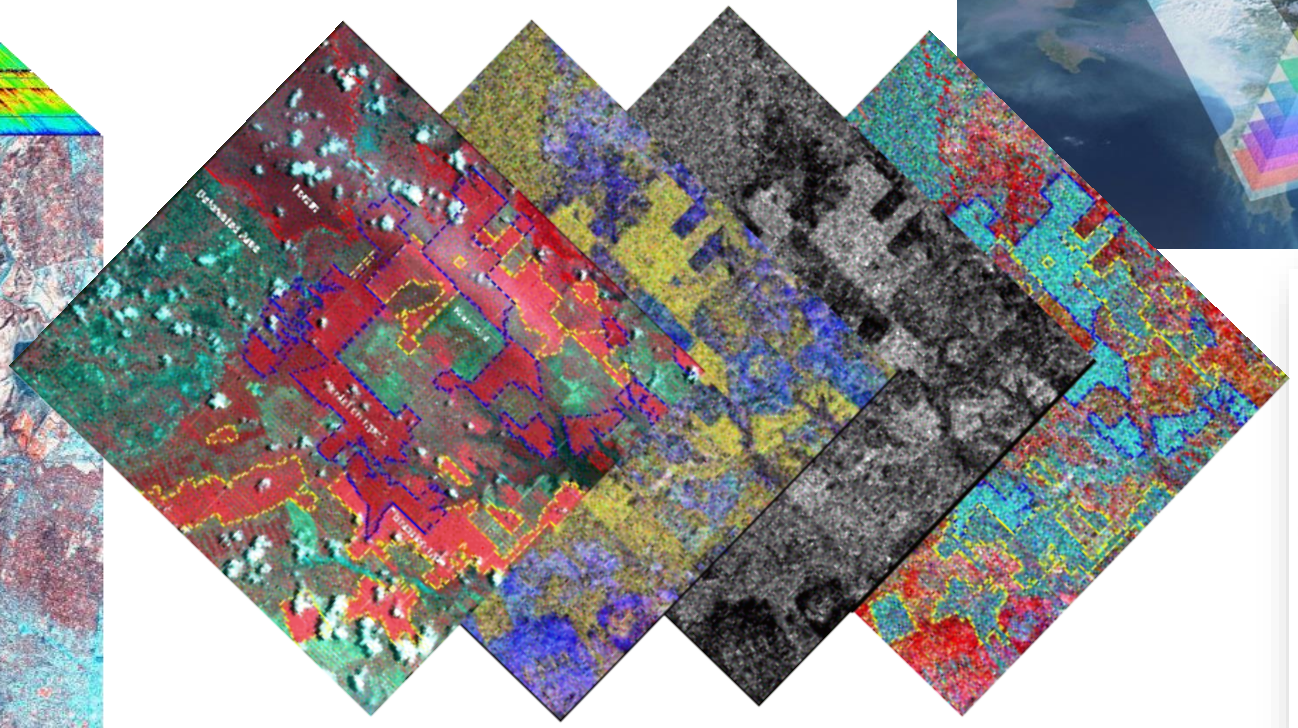


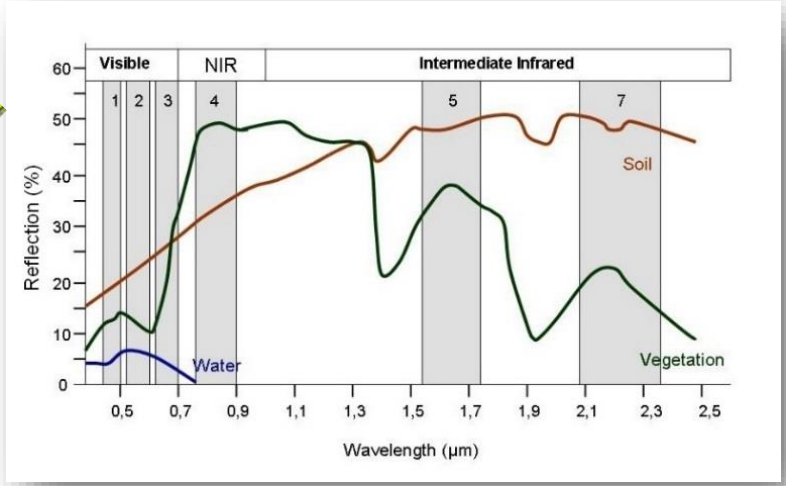
LABORATÓRIO DE GEOMÁTICA

PRINCÍPIOS FÍSICOS DO SENSORIAMENTO REMOTO









© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

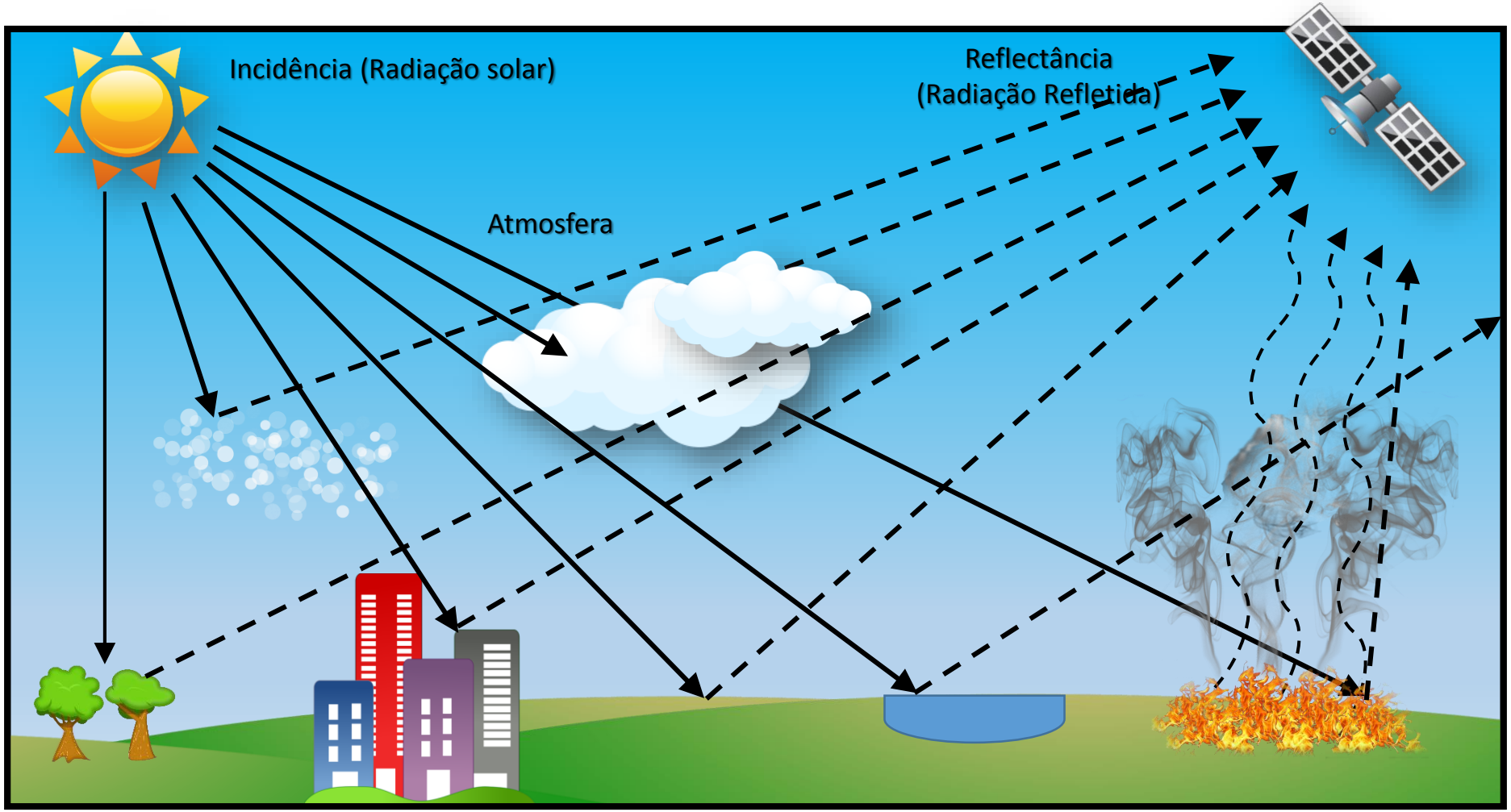
Definições de Sensoriamento Remoto

- Ciência e arte de obter informações sobre um objeto, área, ou fenômeno a partir de dados adquiridos por um dispositivo que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno investigado (Lillesand et al. 2008);

- Tecnologia que utiliza sensores e equipamentos de processamento e transmissão de dados a bordo de aeronaves ou outras plataformas, com o objetivo de estudar fenômenos e processos que ocorrem na superfície da Terra, a partir do registro da radiação eletromagnética (REM) (adaptado de Novo, 2008).

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Definições de Sensoriamento Remoto

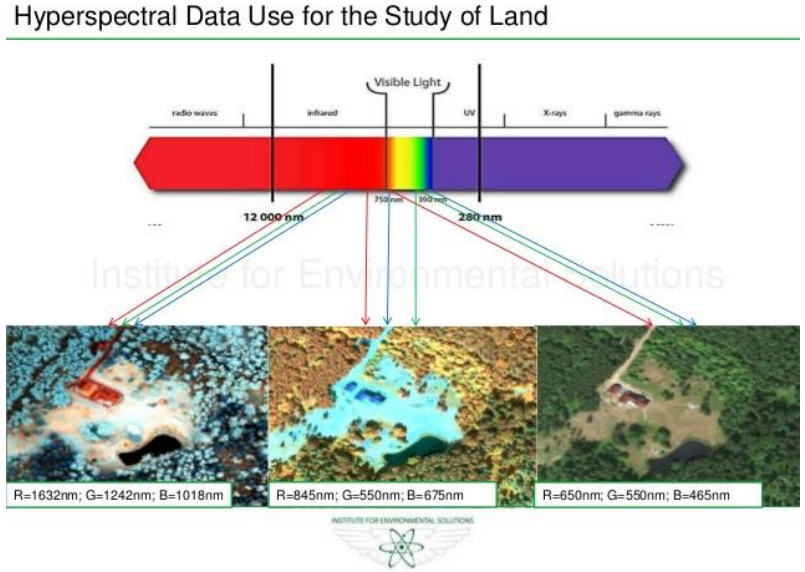


© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Definições de Sensoriamento Remoto

Os sensores de energia eletromagnética, que operam a bordo de plataformas orbitais e aerotransportadas, são dispositivos que nos auxiliam no mapeamento, quantificação e monitoramento dos recursos da Terra.

Estes sensores adquirem dados oriundos da emissão e reflexão de REM a partir de atributos na superfície e sub-superfície terrestre.



Fonte (figura): Palestra "Airborne Remote Sensing" - Institute for Environmental Solutions (Science Institute - NGO, Public Sector, Latvia)

Processos e elementos envolvidos em SR:

- **fonte de energia**
- **propagação da energia através atmosfera**
- **interação da energia com a superfície terrestre**
- **retransmissão da energia pela atmosfera**
- **sensores orbitais e/ou aerotransportados**
- **geração de dados digitais e/ou *"analógicos"***

AQUISIÇÃO DE DADOS

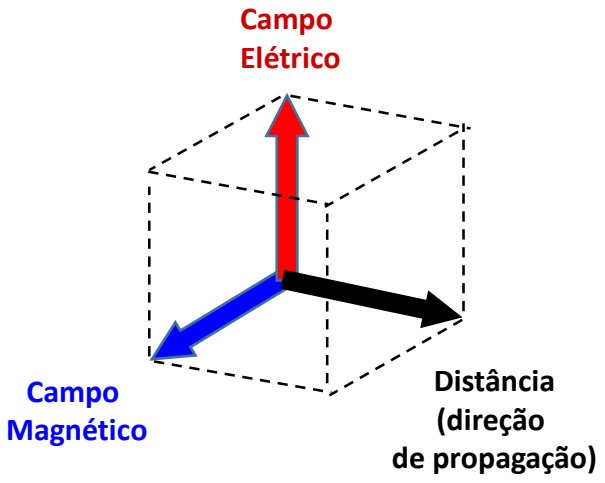
- **exame e interpretação dos dados digitais- *"analógicos"***
- **compilação das informações (mapas, etc) – SIG**
- **produto final apresentado ao "usuário" : decisão.**

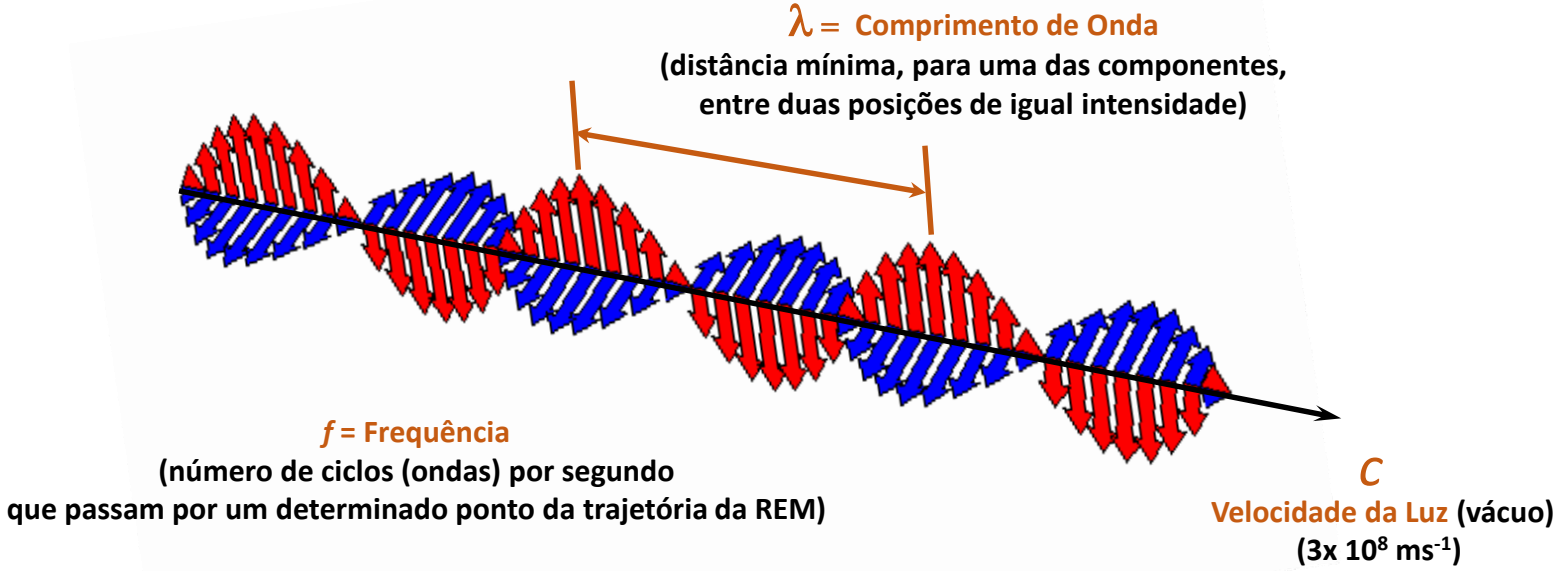
ANÁLISE DE DADOS

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Fontes de Energia e Princípios da Radiação Eletromagnética (REM)

A **Radiação Eletromagnética (REM)** produzida a partir da aceleração de uma partícula é constituída por duas componentes: uma **elétrica (E)** e outra **magnética (M)**.





Componentes da *REM (TEORIA ONDULATÓRIA):*

- **onda elétrica senoidal (E);**
- **onda magnética senoidal (*M*) - ortogonal a (E);**
- **(E) & (M) perpendiculares à direção de propagação;**
- **intensidade de (E) e (M) variam regularmente ao longo da direção de propagação;**
- **(E) e (M) : posição FIXA ou REGULARMENTE VARIÄVEL => onda POLARIZADA (sempre definida com base na posição do campo (E) => (hor., vert., etc))**

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Radiação Eletromagnética (REM)

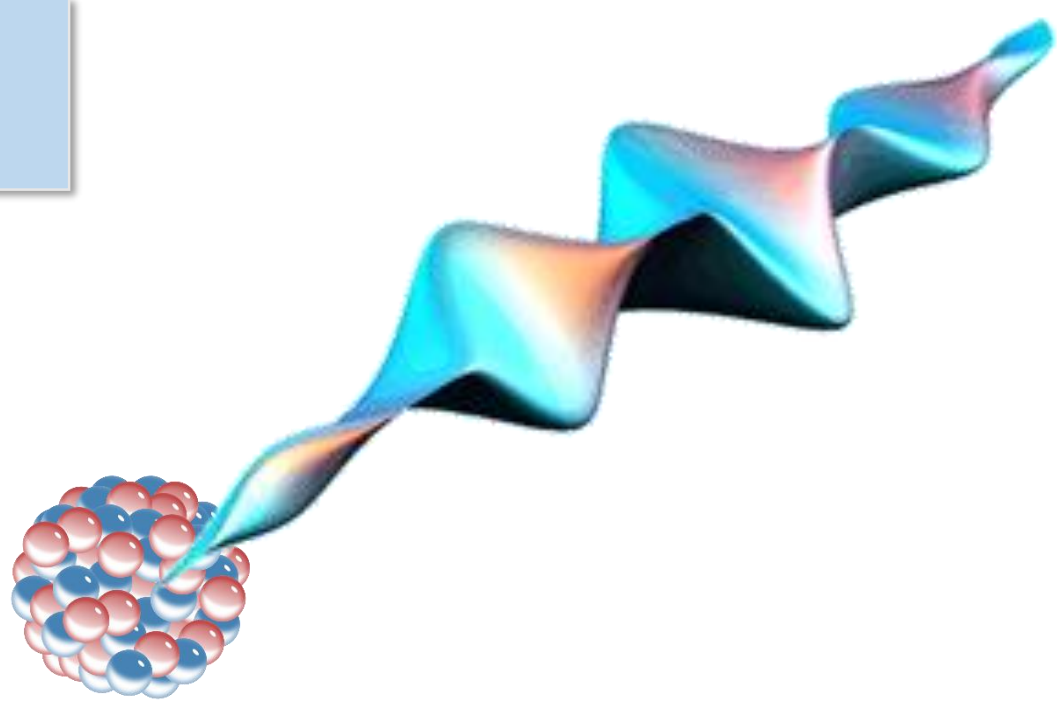
A **Radiação Eletromagnética (REM)** também é descrita por uma teoria RIVAL => A TEORIA CORPUSCULAR => A energia é transferida em unidades discretas (cadeias de partículas) denominadas QUANTA ou FÓTON (Max Planck).

- **FÓTON : correspondente a uma radiação com frequência *f* (partículas/seg), tem uma energia dada por:**

$$E = h \cdot f \quad \text{onde,}$$
$$h = \text{cte. de Planck} = 6.624\ 10^{-34}\ \text{Joules} \cdot s\ (\text{ou } 4{,}141 \cdot 10^{-5}\ \text{eV.s})$$

- **Comparando-se as equações básicas da teoria ondulatória e corpuscular, temos:**

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \qquad e \qquad \lambda = \frac{h \cdot c}{E}$$

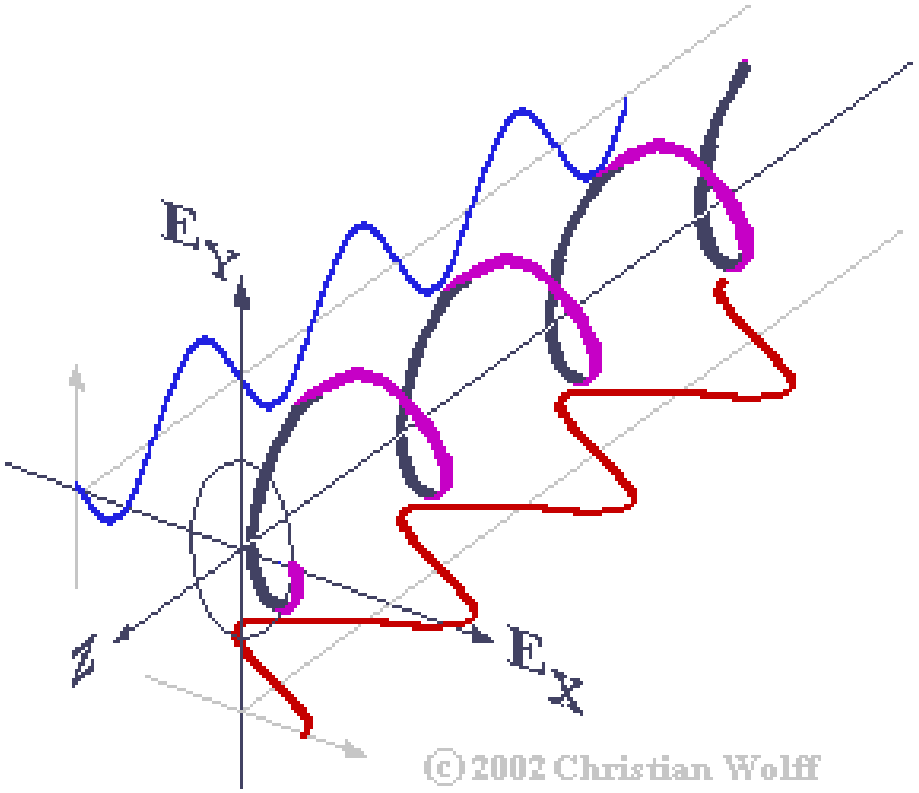


- **PORTANTO:**
  - **a En. de uma REM é diretamente proporcional à frequência;**
  - **a En. de uma REM é inversamente proporcional ao comprimento de onda (λ);**
  - **assim, quanto >> o λ, << a En. e << *f***

***CONCEITUAÇÃO MODERNA: REM é considerada tanto como tendo propriedades ondulatórias** (difração, interferência, polarização) **quanto corpusculares** (interações atômicas e moleculares, efeito foto-elétrico, fluorescência, radiação de corpos negros)*

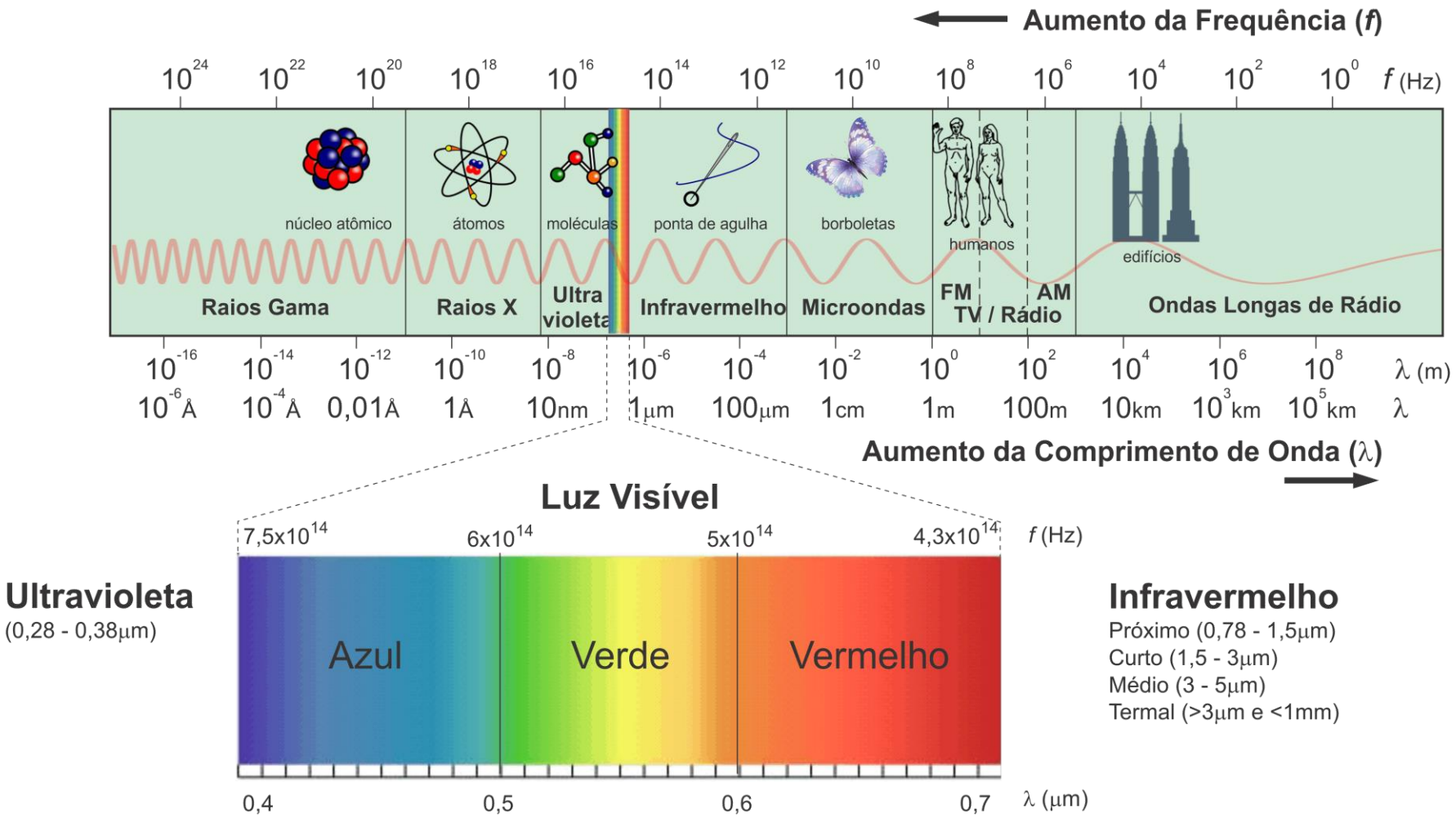
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Espectro Eletromagnético (EEM)



- Ondas caracterizadas por λ, f, En e polarização.
- Em sensoriamento remoto, comumente, as ondas são caracterizadas em função da suas posições no *espectro eletromagnético (EEM)* => *representação contínua da REM em termos de comprimento de onda e frequência (e energia).*
- As unidades de medida mais usadas (mas não únicas) : micron (mm) (1mm = 10-6 m) e o nanômetro (1000nm = 1mm). Faixa microondas e rádio=> frequência (GHz).
- Por razões históricas e tecnológicas: o EEM é subdividido em diversas regiões.
- Regiões: apresentam características similares em termos de processos físicos geradores de energia ou mecanismos físicos de detecção de energia.

Espectro Eletromagnético (EEM)



© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Fontes Naturais e Artificiais de REM

FONTES NATURAIS: ***Sol*, *Terra, radioatividade***
FONTES ARTIFICIAIS: ***Radar, Laser***

En. SOL → interação → substâncias na sup. terrestre → "n" fenômenos (reflexão, absorção, transmissão, aquecimento etc) → TODOS investigados pelo S.R.

FONTES DE REM: **espectro de emissão => (contínuo) ou (distribuído em faixas discretas)**

- **SOL:** emite REM distribuída continuamente da região dos Raios-X até microondas do EEM
- **RADAR ou LASER**: emitem REM concentrada em faixas estreitas do EEM

RADIAÇÃO SOLAR E TERRESTRE: ***natureza complexa; interação de diversos fenômenos físicos***

↓ ***aproximação***

MODELO TEÓRICO IDEAL => RADIAÇÃO DE CORPOS NEGROS

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Fontes Naturais e Artificiais de REM

- **TODA** substância c/ temperatura superior à do **ZERO ABSOLUTO (0°K = - 273°C) EMITE REM** como resultado de suas oscilações atômicas e moleculares.

- **CORPO NEGRO:**
  - radiador ideal e hipotético que absorve toda energia incidente e re-emite toda energia por ele recebida;
  - seu estudo permite a compreensão de como os objetos atuam quando refletem ou emitem energia.

- **Principais LEIS físicas que definem suas propriedades:**
  - Lei de Stefan Boltzman
  - Lei de Deslocamento de Wien
  - lei de Lambert
  - lei de Kirchoff
  - lei de Planck (e derivadas)

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Fontes Naturais e Artificiais de REM

LEI DE STEFAN-BOLTZMAN **=> a quantidade de En que um objeto radia é função da temperatura**

$M = \tau \cdot T^4$ => onde,

M = emitância radiante total (em todo o espectro) ($W\ m^{-2}$)

T = temperatura em °K

τ = cte. de Stefan Boltzmann = $5{,}67 \cdot 10^{-8}\ W.m^2$

- ***"a emitância de um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura"***

LEI DE ('deslocamento') WIEN **=> relação entre λ e T?**

- **$\lambda_{max} = A/T$ =>** onde,

λ_{max} = comprimento de onda -> radiação espectral máxima

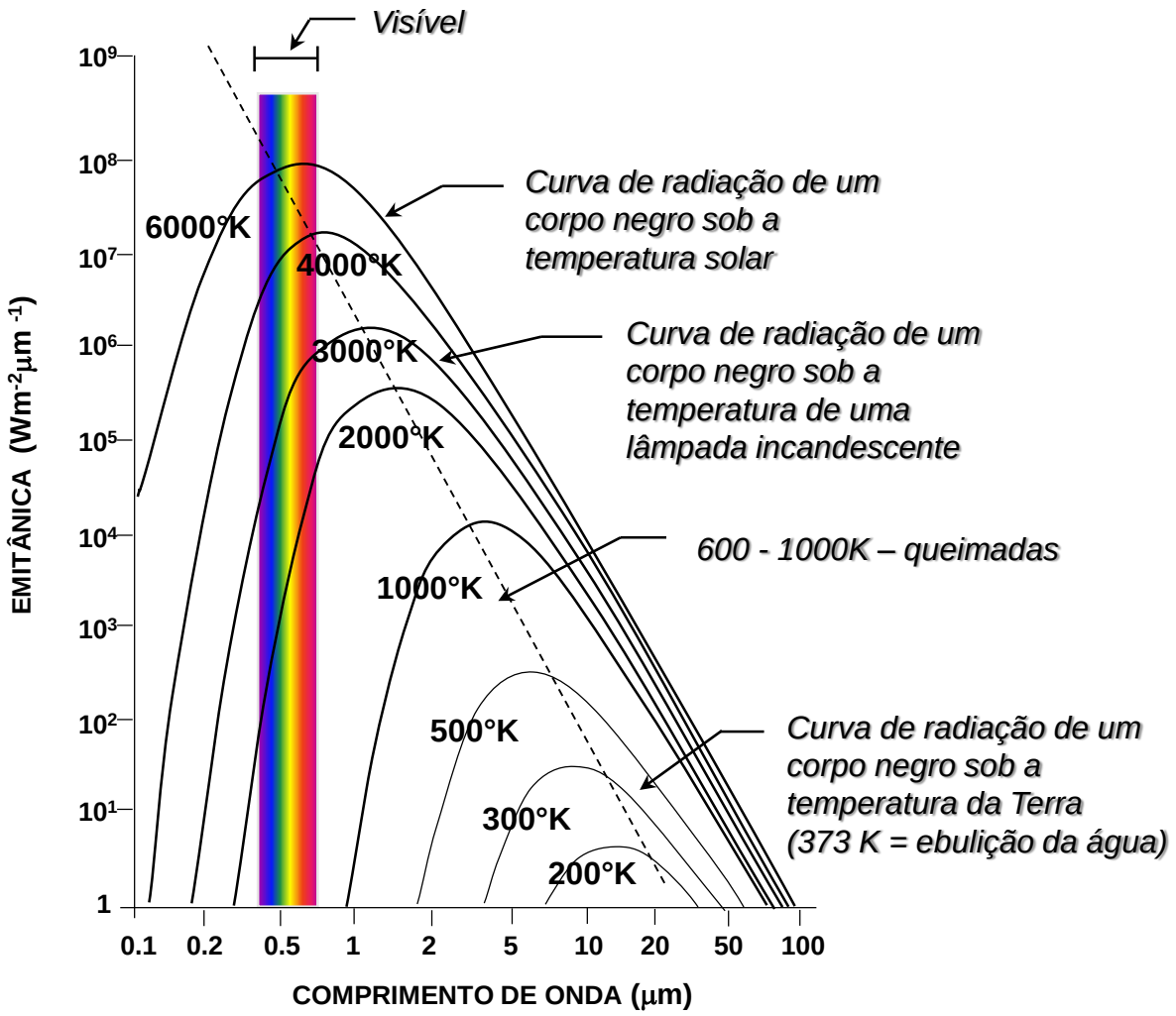
A = 2898 μm . °K

T = temperatura

- ***"o comprimento de onda correspondente à radiação espectral máxima desloca-se em direção aos comprimentos de onda menores, à medida que a temperatura aumenta"***

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

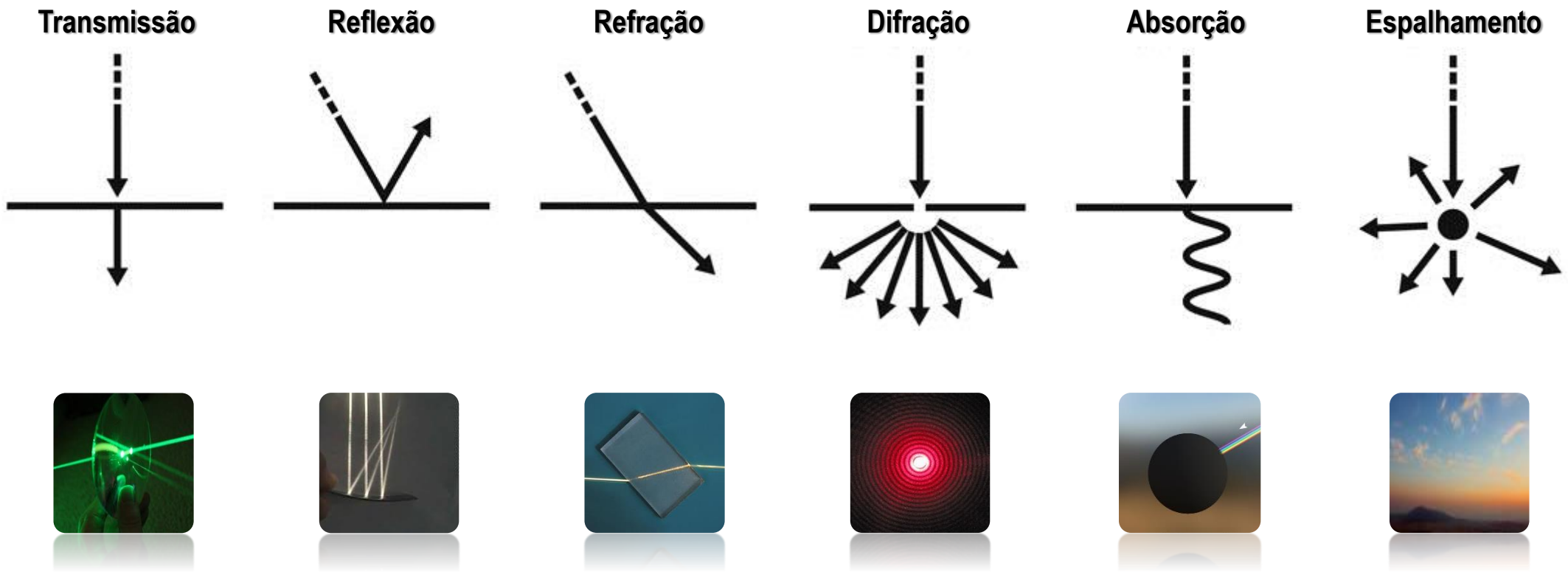
Distribuição de Energia em Corpos Negros a Temperaturas entre 200 e 6000K



- As áreas sob estas curvas são iguais a energia total emitida em todos os comprimentos de onda.
- As curvas ilustram graficamente o significado da ***Lei de Stefan-Boltzmann***: *"Quanto maior for a temperatura do objeto maior será a quantidade de radiação que ele emitirá"*.
- Note que há um deslocamento dos picos de distribuição de radiação dos corpos negros em direção aos comprimentos de ondas mais curtos. Isso ocorre à medida que a temperatura aumenta (***Wien´s Displacement*** - linha tracejada).

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Interação da Luz com a Matéria



© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

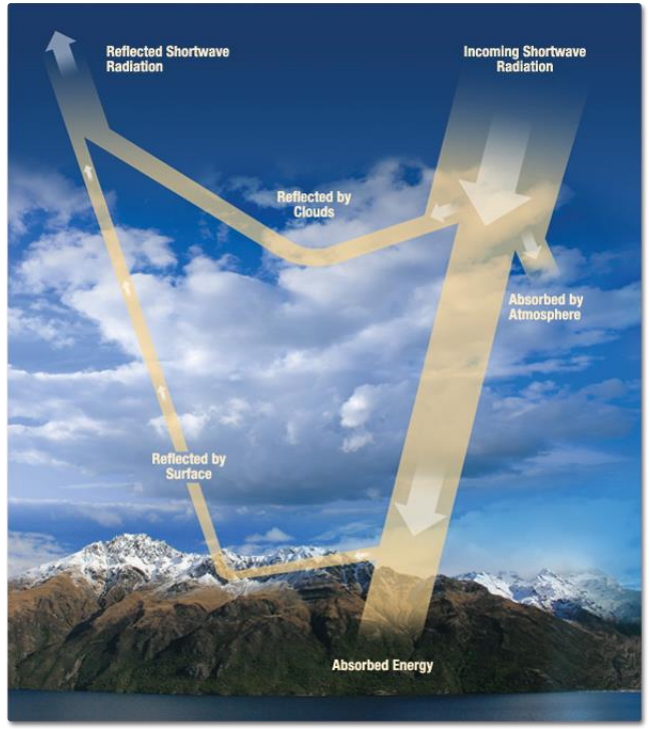
Interação da REM com a Atmosfera e a Superfície da Terra

- Toda a radiação solar detectada por sensores remotos necessariamente **passa pela atmosfera**. A atmosfera é o "meio" dentro do qual a REM viaja do sol para o sensor;

- Por exemplo, antes de ser captada por um sensor a bordo de um satélite que utilize radiação solar refletida, a **radiação solar passa descendentemente pela atmosfera** para então retornar ao sensor (**caminho e interação duplos**: longo e complexo). Um sensor termal aero-transportado por sua vez, detecta a energia emitida diretamente por objetos na superfície da terra (**caminho e interação únicos**: curto e simples);

- O efeito total da atmosfera varia conforme o tipo de caminho percorrido pela REM, a magnitude do sinal sendo imageado, as condições atmosféricas locais e os comprimentos de onda envolvidos;

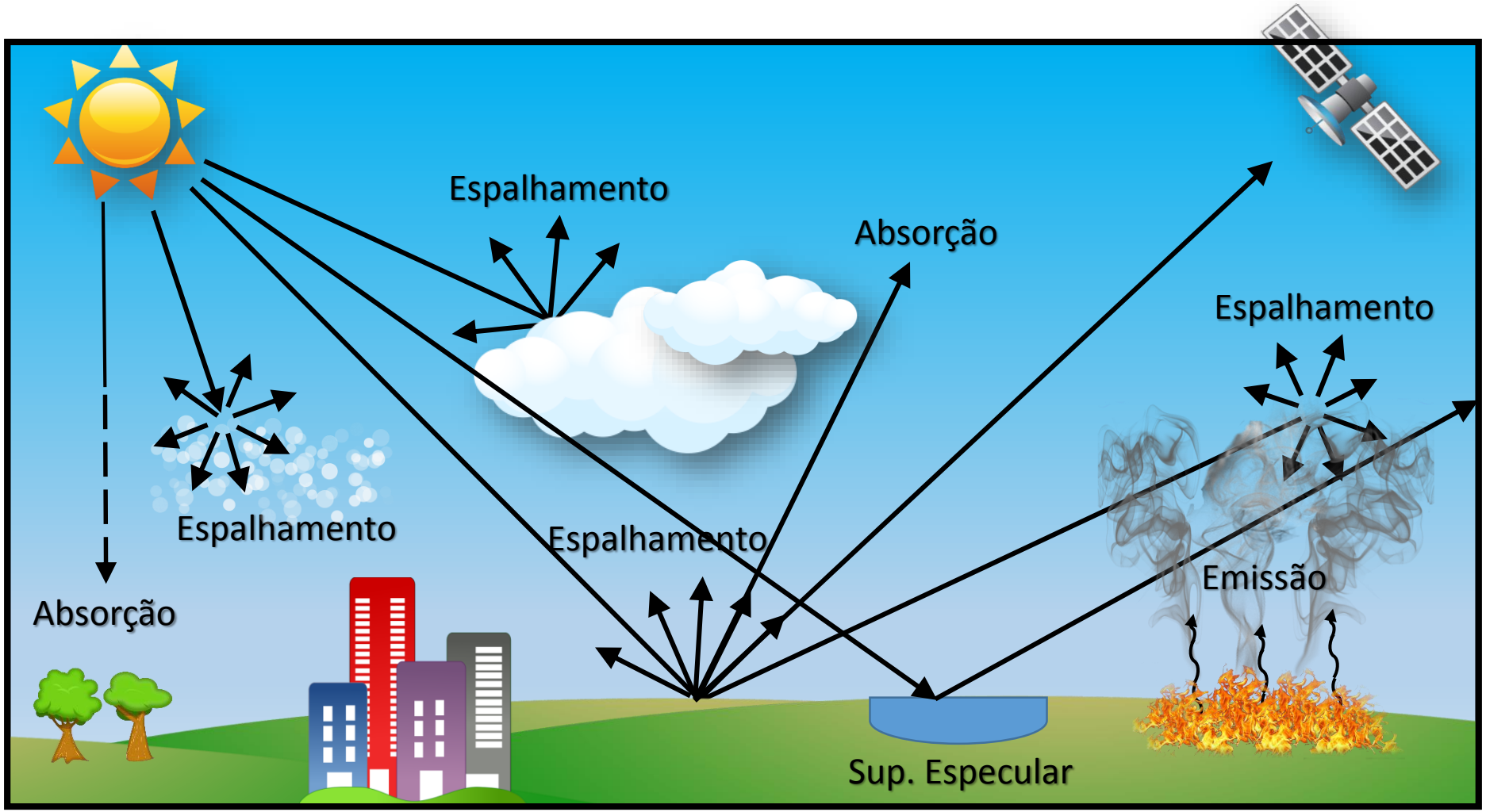
- A atmosfera pode afetar a intensidade e composição espectral da REM disponível para um determinado sensor, principalmente através de mecanismos de *espalhamento, absorção e transmissão atmosférica*. Outros efeitos atmosféricos, que não serão abordados aqui em detalhe, são: efeitos de massas de ar, refração atmosférica, turbulências e emissão atmosférica.



http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson2-1/index.html

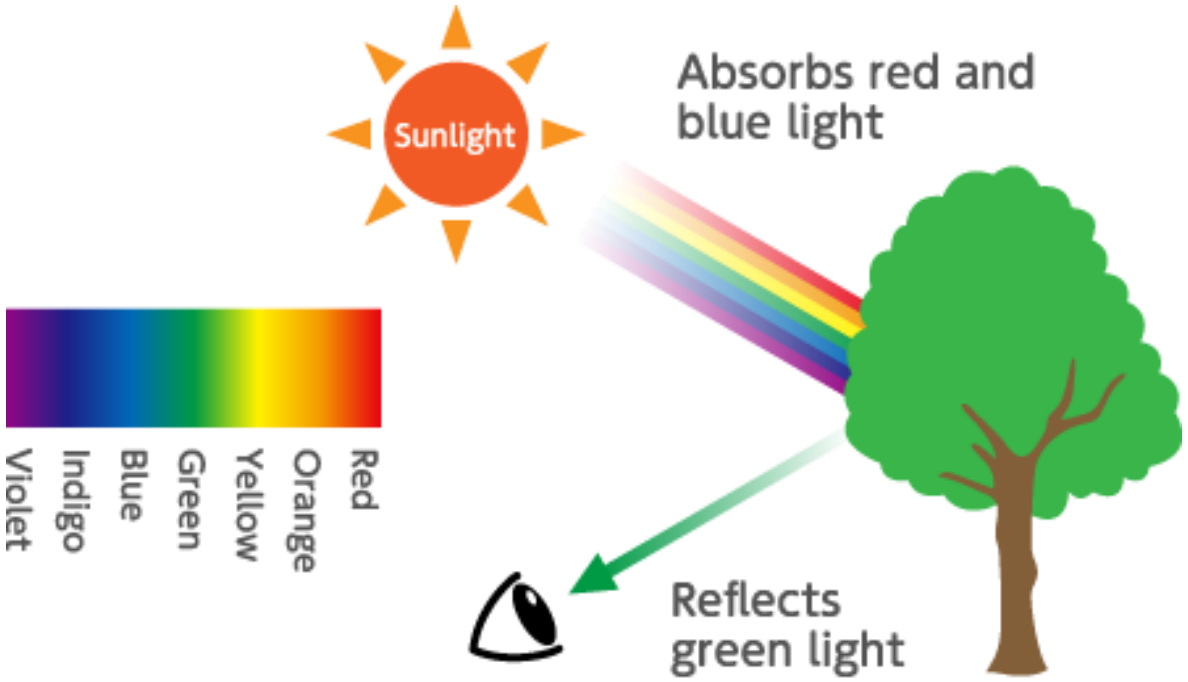
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

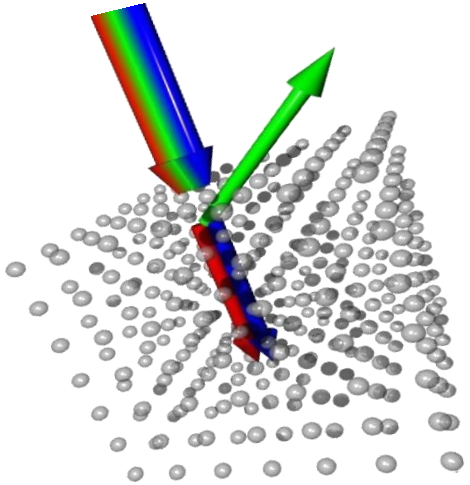
Interação da REM com a Atmosfera e a Superfície da Terra

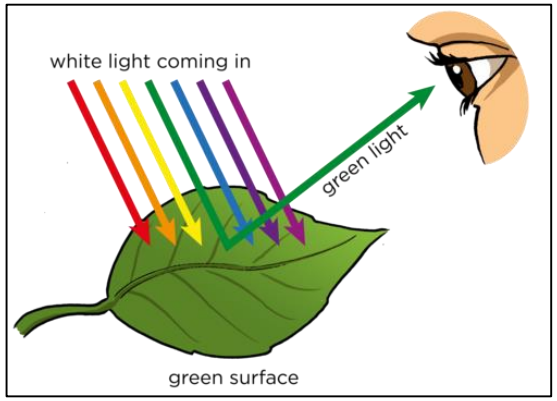


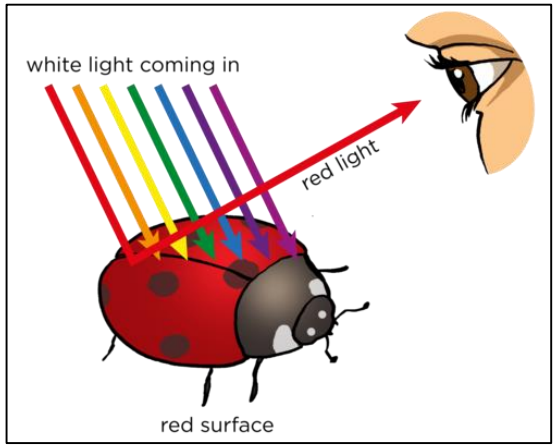
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Interações da REM – Percepção das Cores









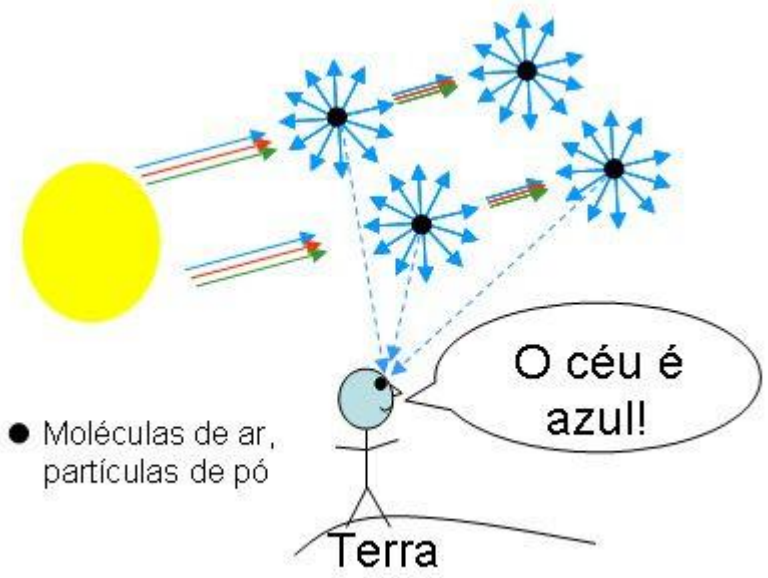
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

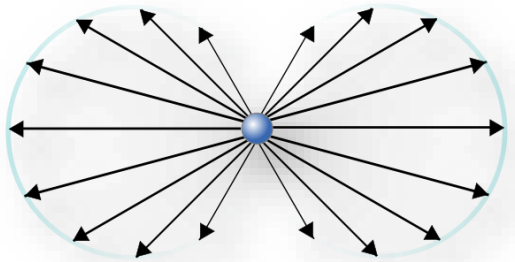
Espalhamento Atmosférico

- Modificação da direção de caminhamento da energia em função da presença de partículas ou moléculas na atmosfera.
- Provoca uma diminuição na qualidade das imagens, assim como induz o aparecimento de *"haze"* (imagem toma um aspecto nublado).
- Os efeitos do espalhamento são mais notáveis nos comprimentos de onda do visível e infra-vermelho.
- Tipos básicos de espalhamento: **Rayleigh**, **Mie** e **Não Seletivo**.

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Espalhamento Atmosférico





ESPALHAMENTO RAYLEIGH (ou MOLECULAR):

- É o mais comum e ocorre quando luz incidente encontra partículas ou moléculas de tamanho inferior ao comprimento de onda da REM;

- Espalhamento é proporcional a $1/\lambda^4$ (quanto menor for o comprimento de onda maior será a quantidade de espalhamento);

- a **LUZ AZUL** é espalhada 6 vezes mais fortemente do que a LUZ VERMELHA;

- este tipo de espalhamento é responsável pela cor azul do céu (a componente azul da luz incidente se espalha mais do que as componentes verde e vermelho).

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Espalhamento Atmosférico

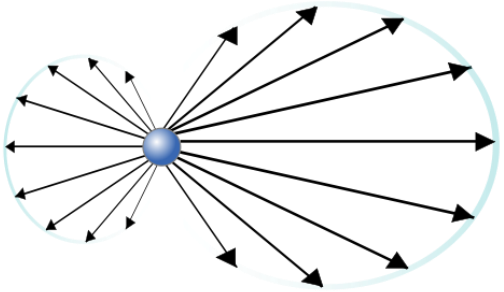
ESPALHAMENTO DE MIE:

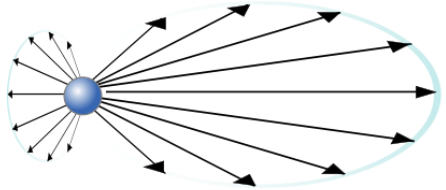
• ocorre quando o comprimento de onda de luz incidente é comparável ao tamanho das partículas ou moléculas encontradas;

• vapor d'água, fumaça e poeira são os principais espalhadores de luz na atmosfera terrestre;

• este tipo de espalhamento afeta comprimentos de onda maiores que a luz azul e pode afetar fortemente imagens obtidas em dias claros, sem nuvens, mas com elevada umidade ou com muita poeira em suspensão;

• processo intermediário entre o espalhamento Rayleigh e o não seletivo.





© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Espalhamento Atmosférico

ESPALHAMENTO NÃO-SELETIVO:

• afeta todos os comprimentos de onda utilizados em sensoriamento remoto de forma semelhante;

• ocorre quando as partículas atmosféricas causadoras do espalhamento (água e poeira) são maiores (tipicamente com dimensões entre 5 e 100 μm) que o comprimento de onda da energia que interage com o meio;

• neste processo, quantidades similares de luz vermelha, verde e azul são espalhadas, o que dá às nuvens e à neblina a cor branca.

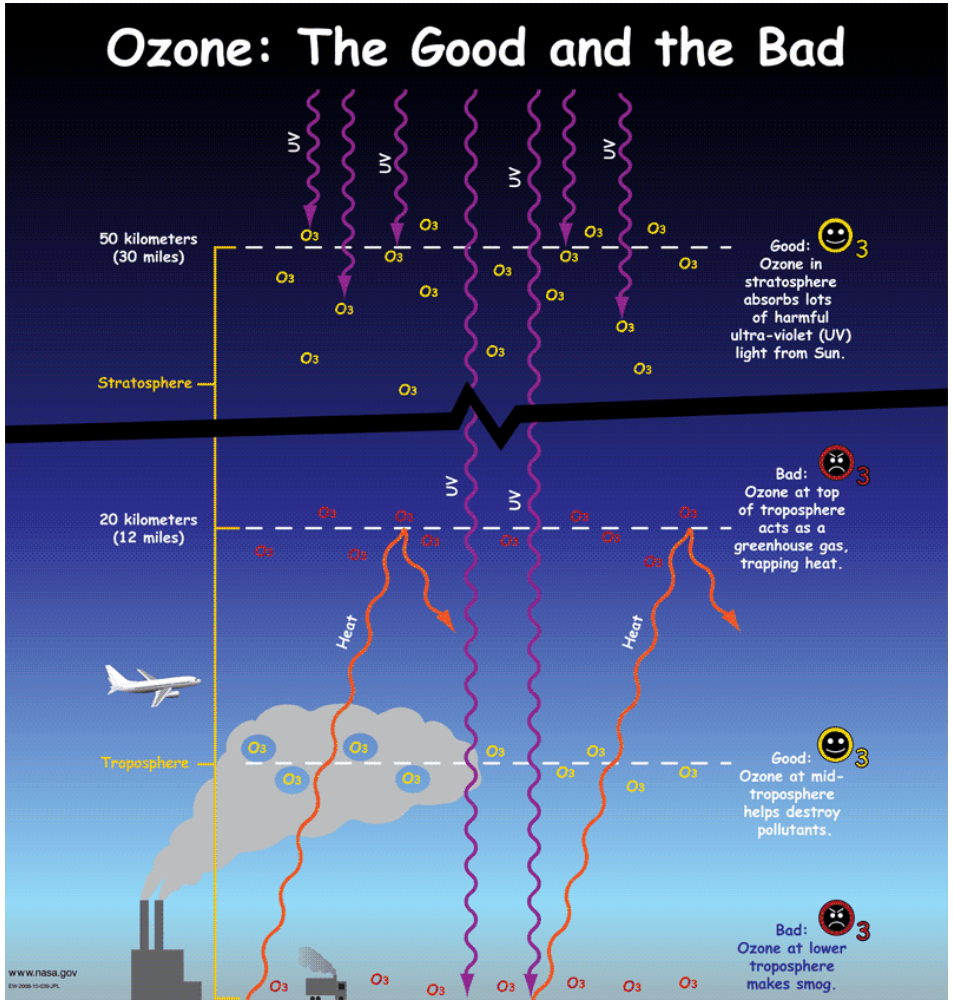
Espalhamento Atmosférico (Síntese)

Processo	Dependência de λ	Tamanho rel. part.	Tipo de part.
Rayleigh	λ^{-4}	$<< \lambda$	moléculas de ar
Mie	λ^{-4} a λ	0.1λ a 10λ	fumaça, bruma, neblina
Não-seletivo	λ	$> 10\ \lambda$	poeira, garoa, nuvem

Partículas	**Variação do diâmetro (μm)**
Fumaça, bruma	0,001 - 0,5
Fumos industriais	0,5-50
Poeira	1,0-5,0
Neblina, nuvens	2,0-30,0
Névoa	20,0-50,0
Garoa	50,0-200,00
Chuva	200,0-2.000,0

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Absorção Atmosférica



- Os constituintes moleculares da atmosfera absorvem radiação solar. Cada tipo de molécula tem seu espectro de absorção próprio (ou seja, intervalos de comprimento de onda onde a radiação é absorvida). Esta radiação absorvida é retida como energia interna ou re-emitida em outros intervalos de comprimentos de onda;

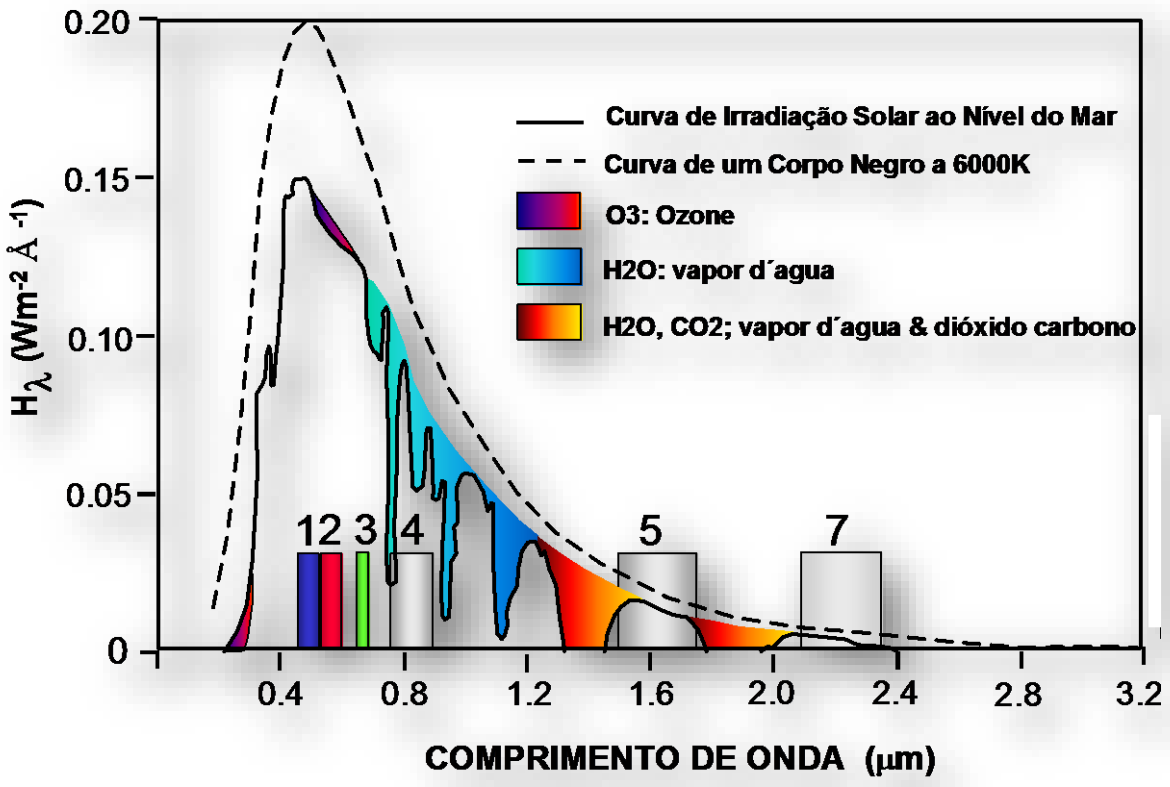
- Ozônio, vapor d'agua, dióxido de carbono e metano (gases), são os absorvedores primários de energia. Oxigênio e nitrogênio, os mais abundantes gases atmosféricos, são os que menos absorvem;

- Energia com comprimentos de onda menores do que 0.3 μm (raios-X e raios gama) são totalmente absorvidos pela camada de ozônio na atmosfera superior;

- Raios ultravioleta também são bastante absorvidos. Somente microondas e intervalos mais longos de comprimentos de onda são capazes de atravessar a atmosfera sem serem absorvidos demasiadamente.

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Absorção Atmosférica



- os comprimentos de onda de raios de luz visível e infravermelha são geralmente transmitidos através da atmosfera;
- essas regiões de alta transmitância, denominados "janelas atmosféricas", são regiões do EEM "de onde partem grande parte dos dados de sensoriamento remoto";
- os intervalos entre as janelas atmosféricas são denominadas "bandas de absorção";
- a absorção do ozônio causa bloqueio da energia em torno de 0.29mm, o que também ocorre de modo menos intenso na parte visível do EEM;
- a absorção na região do infra-vermelho é causada primariamente por vapor d'água e dióxido de carbono.

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

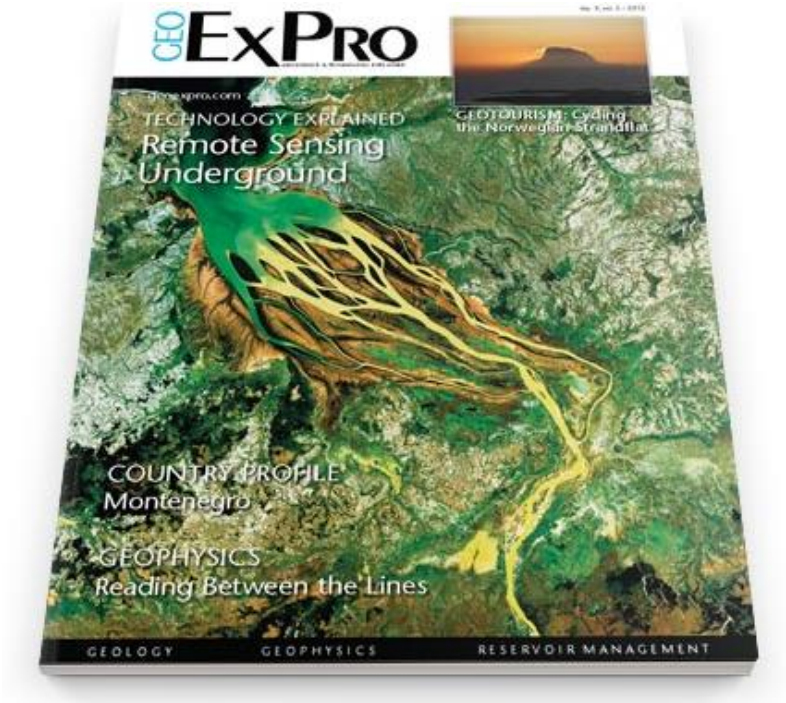
Sensoriamento Remoto Subterrâneo

Dragana Todorovic-Marinic Nexen Inc., Canada

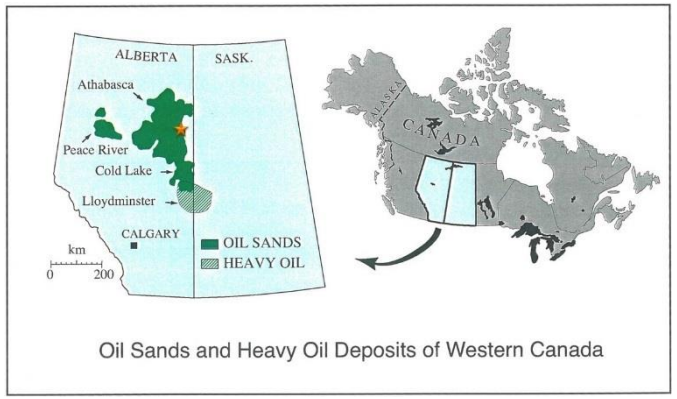
GEO ExPro Magazine Vol. 9, No. 5 - 2013

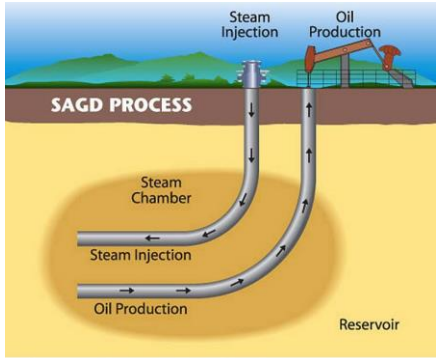
Sensoriamento Remoto utiliza bandas de frequências específicas para revelar detalhes sobre a superfície da Terra. A partir da adaptação desta ideia foi possível aplicá-la à banda larga 3D de dados sísmicos. Assim, heterogeneidades dos reservatórios foram revelados, permitindo a otimização do entendimento do reservatório. Nexen Inc. estão utilizando esta tecnologia para realçar reservatórios de areias petrolíferas canadenses.

http://www.geoexpro.com/articles/2013/02/remote-sensing-underground



Landsat image of the Betsiboka River, Madagascar using bands 3, 2, and 1 to highlight the complex delta features. Using this non-traditional, 'remote sensing' approach to seismic interpretation can reveal spatial detail in geologic heterogeneity that is beyond classic seismic resolution. Source: NASA

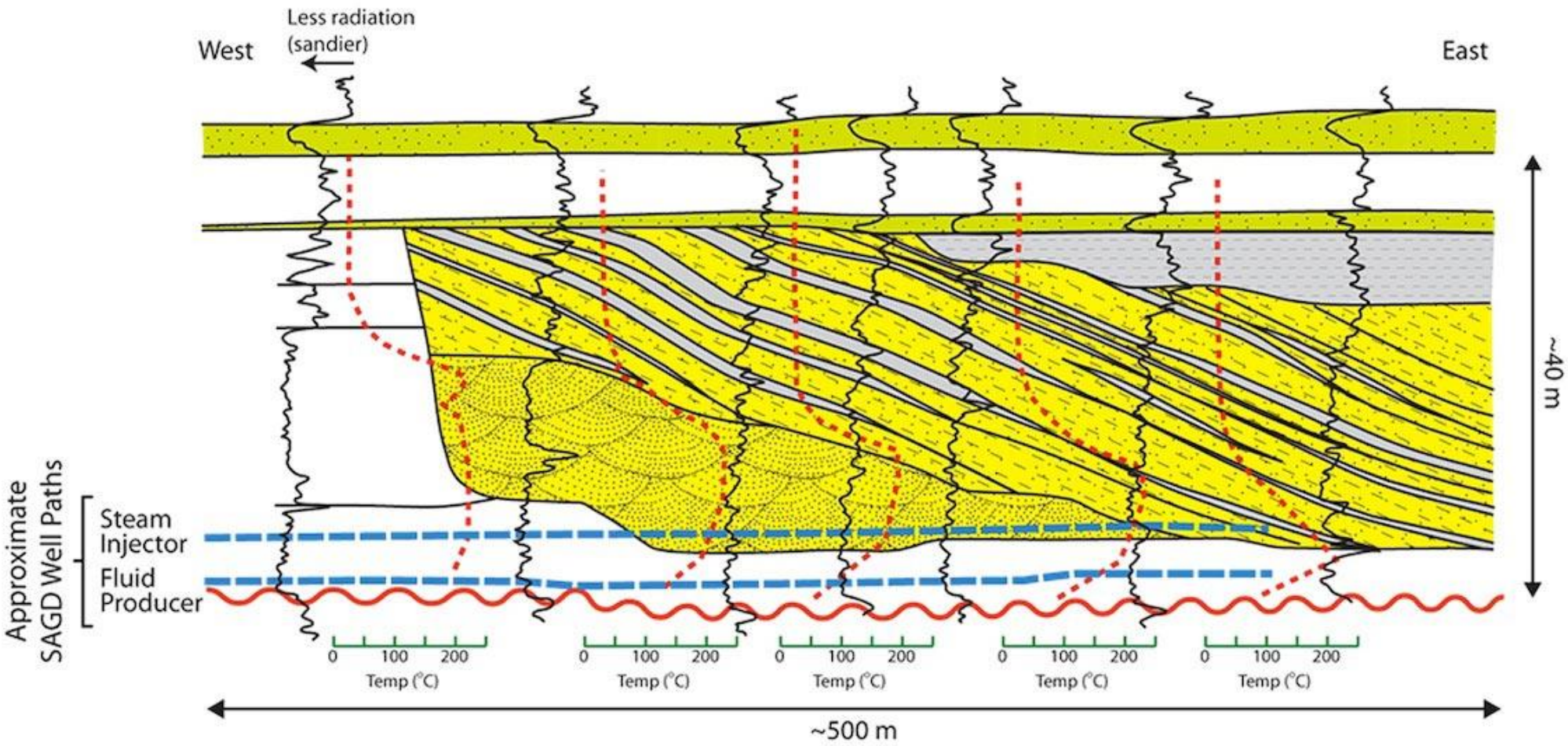




Source: Canadian Centre for Energy Information

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

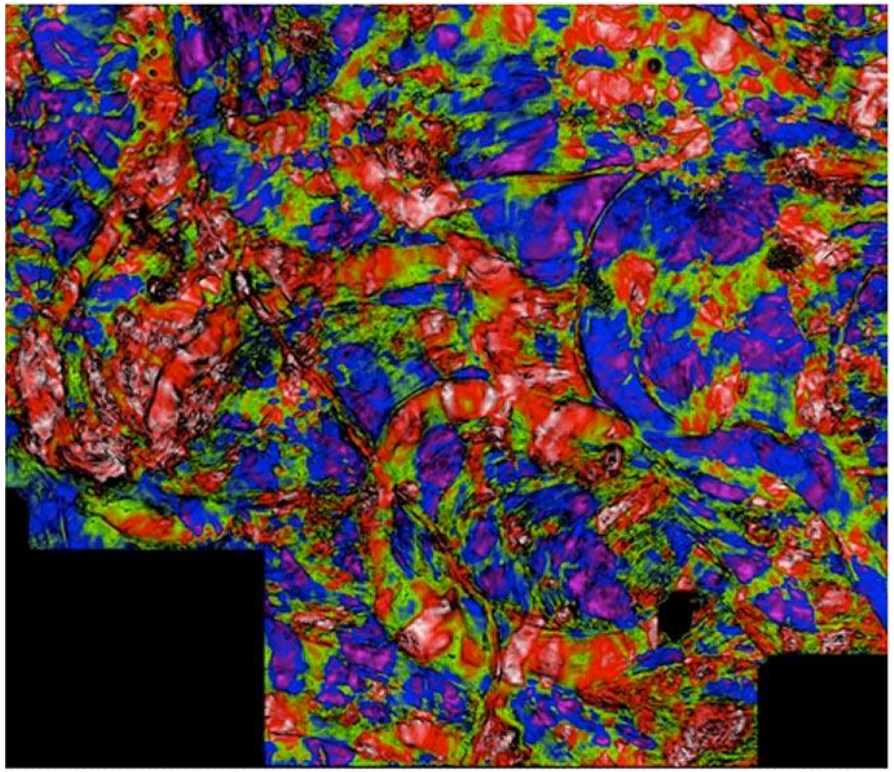
Sensoriamento Remoto Subterrâneo

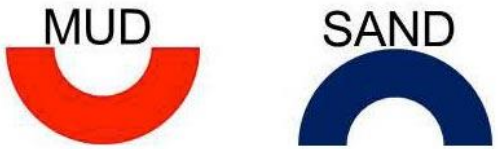


Sensoriamento Remoto Subterrâneo

Revelando a Informação Espectral

- Interpretação sísmica tradicional utiliza **dados sísmicos de banda larga** - a mais ampla faixa de frequência possível;
- Estes dados contém informações detalhadas sobre o reservatório, mas é preciso lembrar que ele fornece uma visão do subsolo cuja tendência reflete a banda de frequência dominante;
- A questão, portanto, consiste em desbloquear a informação espectral importante para revelar detalhes do reservatório que não podem ser vistos com os dados de banda larga;
- Uma analogia útil é considerar técnicas de **sensoriamento remoto da superfície da Terra** a partir de dados de satélite: é possível se obter um entendimento da superfície com a banda larga do espectro de luz visível, mas restringindo a gama de frequências de sub-bandas, vários detalhes podem ser realçados.
- Por exemplo, frequências na sub-faixa azul revelam detalhes para mapear a profundidade dos lagos; frequências na sub-faixa do infravermelho médio são usadas para a detecção de incêndios florestais.



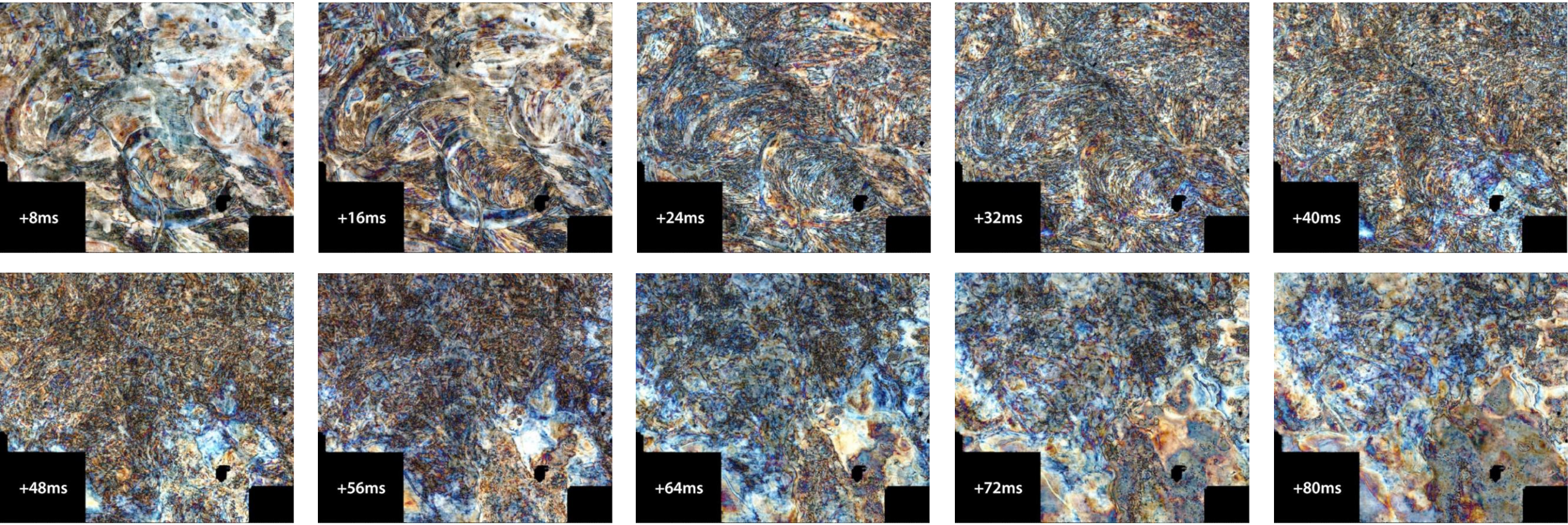


© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo

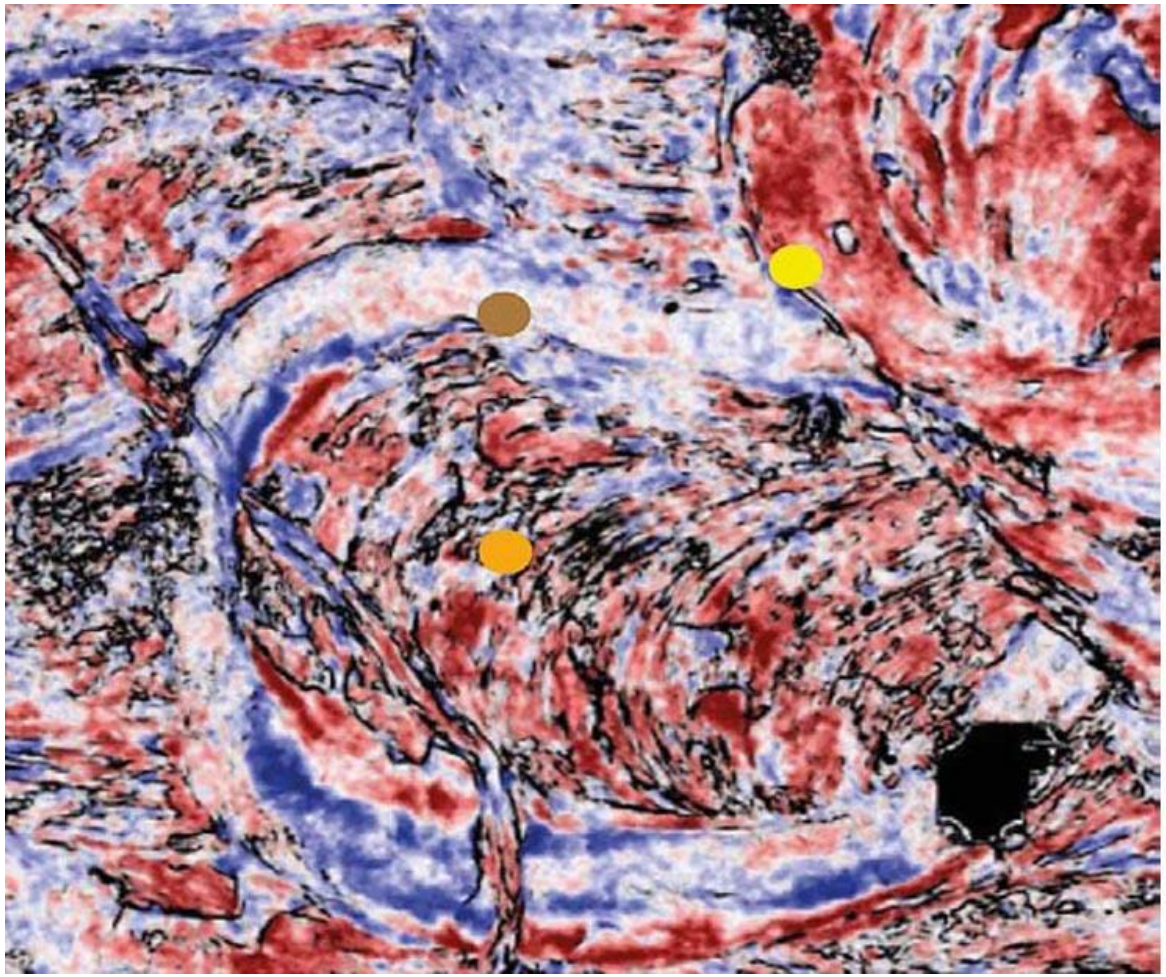
Decomposição Espectral revela Espessamento Relativo e Adelgaçamento

A seguir estão alguns exemplos da maneira em que a aplicação bandas de frequências específicas para a banda larga de dados sísmicos 3D são esclarecedores e adicionando às informações que podem ser obtidas a partir de dados sísmicos.



© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



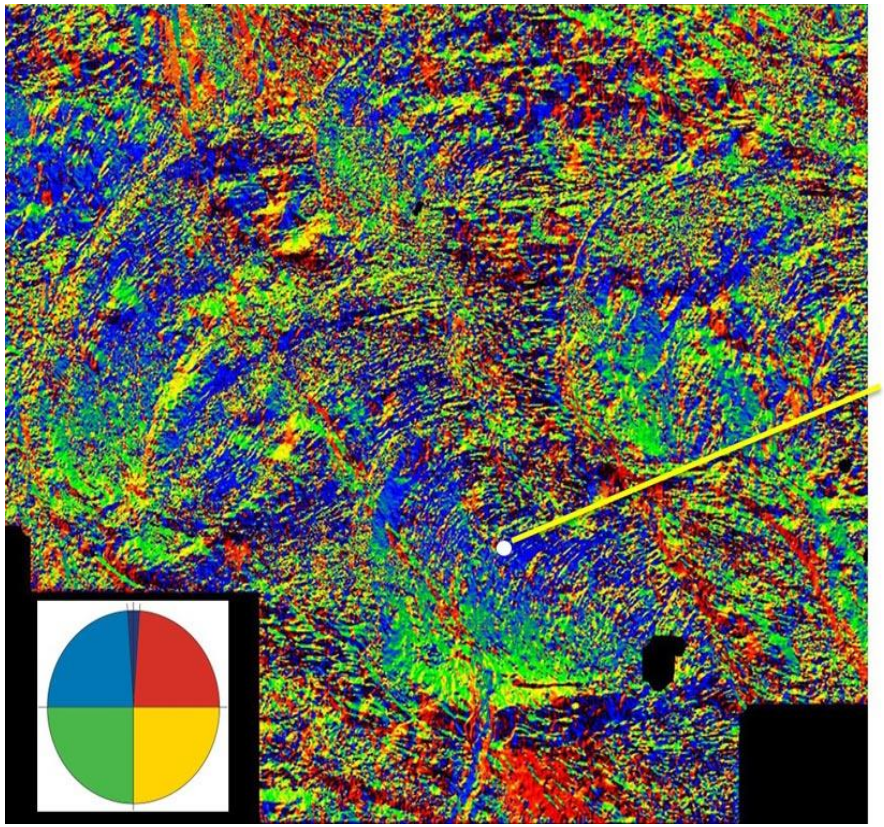
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

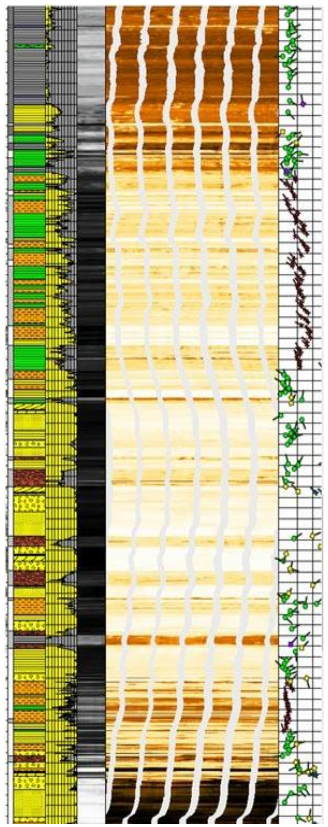
Sensoriamento Remoto Subterrâneo

Inspirado nos métodos espectrais, a equipe desenvolveu uma técnica para detectar o “sweet point” do reservatório. Assumindo que a acumulação de betume está associada com barras de meandros empilhados depositados por rios sinuosos, torna-se possível explorar a relação entre a direção do fluxo de corrente e as depressões na barra de meandro para identificar o tamanho e geometria do canal. Desse modo, é possível inferir que parte da barra provavelmente irá conter a areia limpa.

A partir do paleogeografia desta região, é possível determinar a direção geral fluxo. Para estimar os mergulhos, os volumes de “dip azimute” - estimativas extremamente localizadas de magnitude e direção do mergulho na superfície do McMurray - foram calculados a partir dos dados sísmicos 3D.

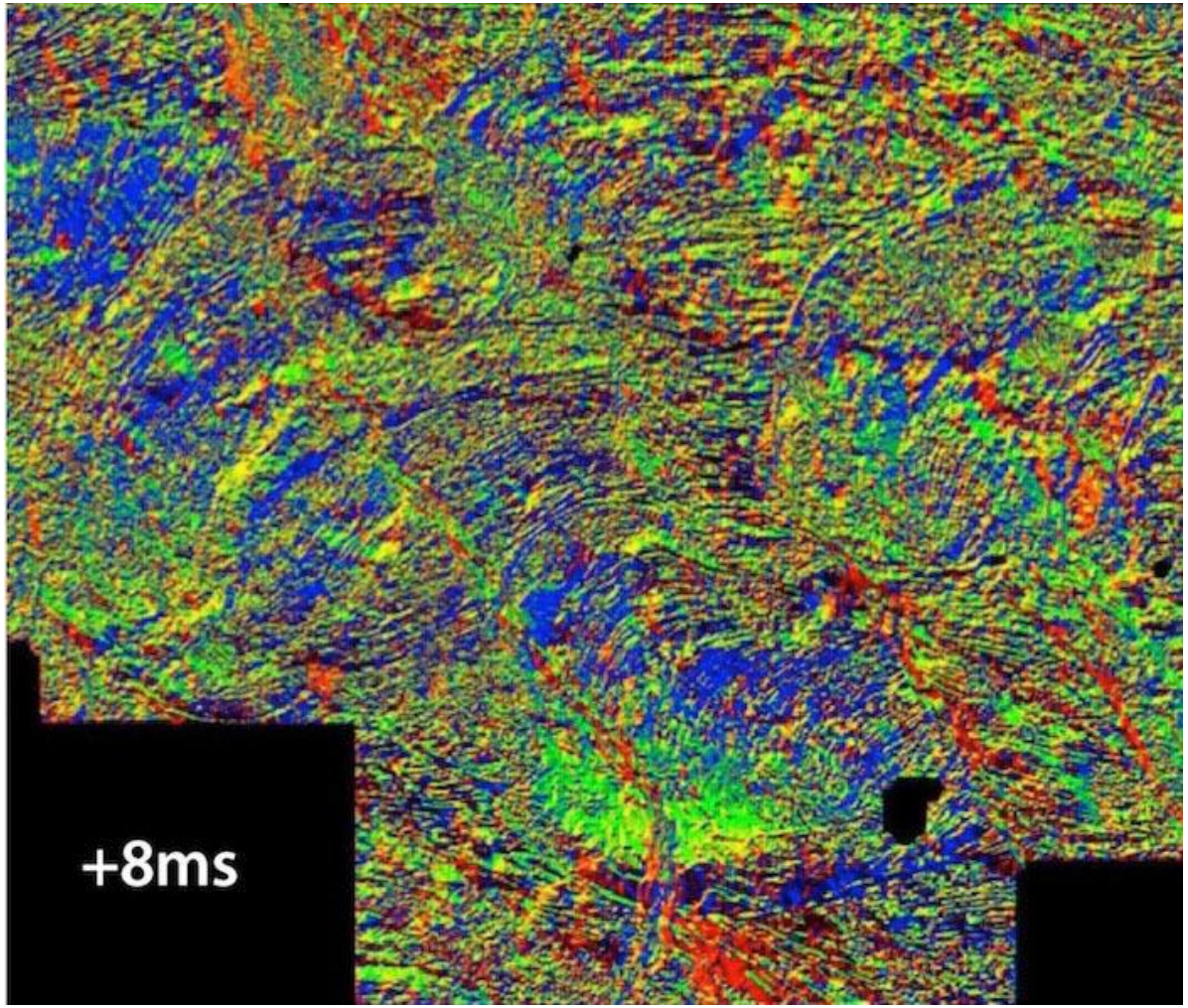
Quando combinado com a descontinuidade espectral, a imagem resultante revela, em detalhe considerável, a estrutura interna dos depósitos de barras de meandros, mostrando o regime de mergulho dentro das sequências depositadas. Camadas de lama contínuas em IHS tipicamente correspondem a acreção lateral: são depositados sobre as curvas no interior de barras de meandros, e se acumulam à medida que migram ao longo da vida do canal sinuoso. Ao montar um 'filme' de fatias “dip azimute”, o intérprete pode investigar a migração a jusante das barras de ponto empilhados ao longo do tempo da paleo-deposição.





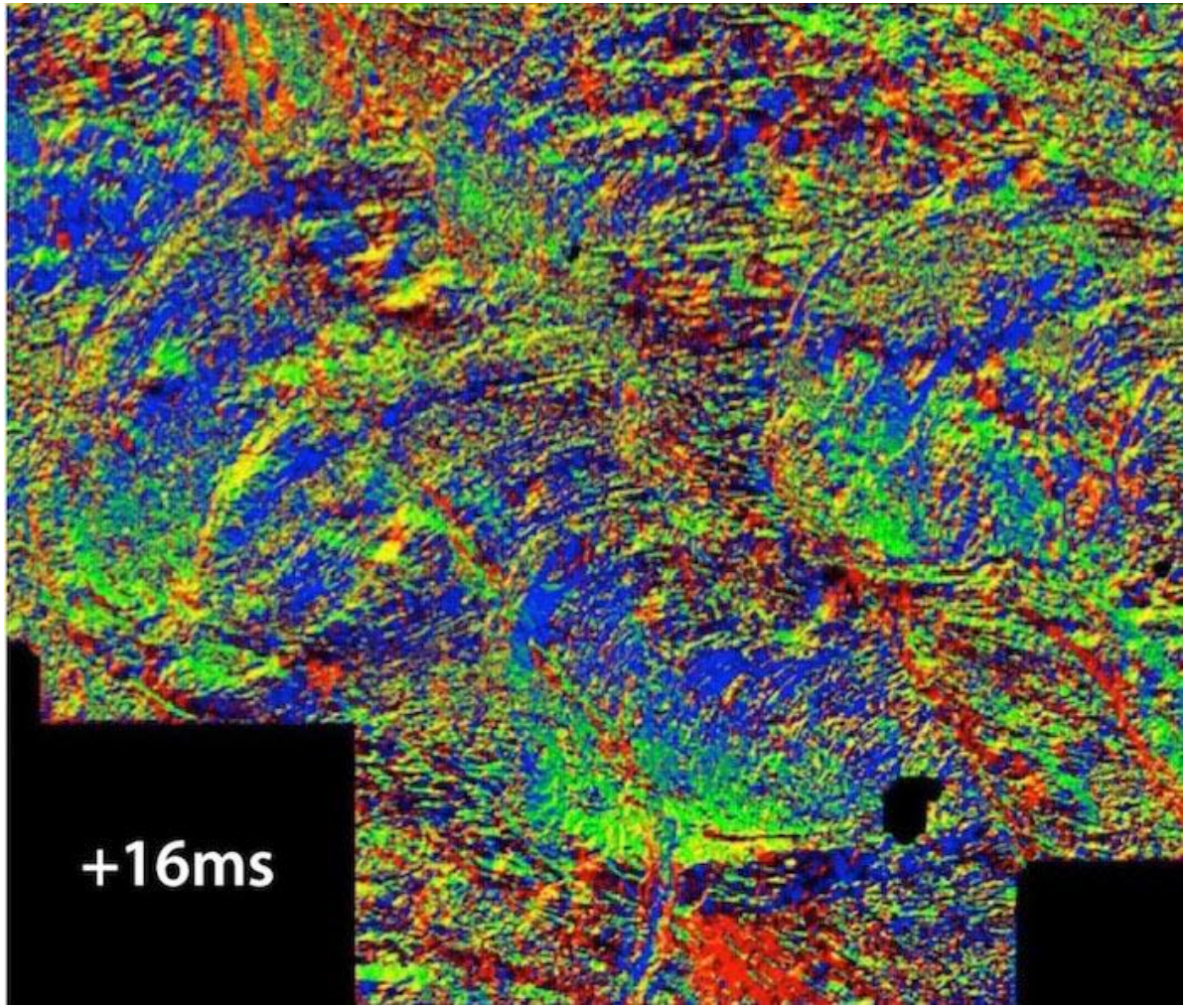
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



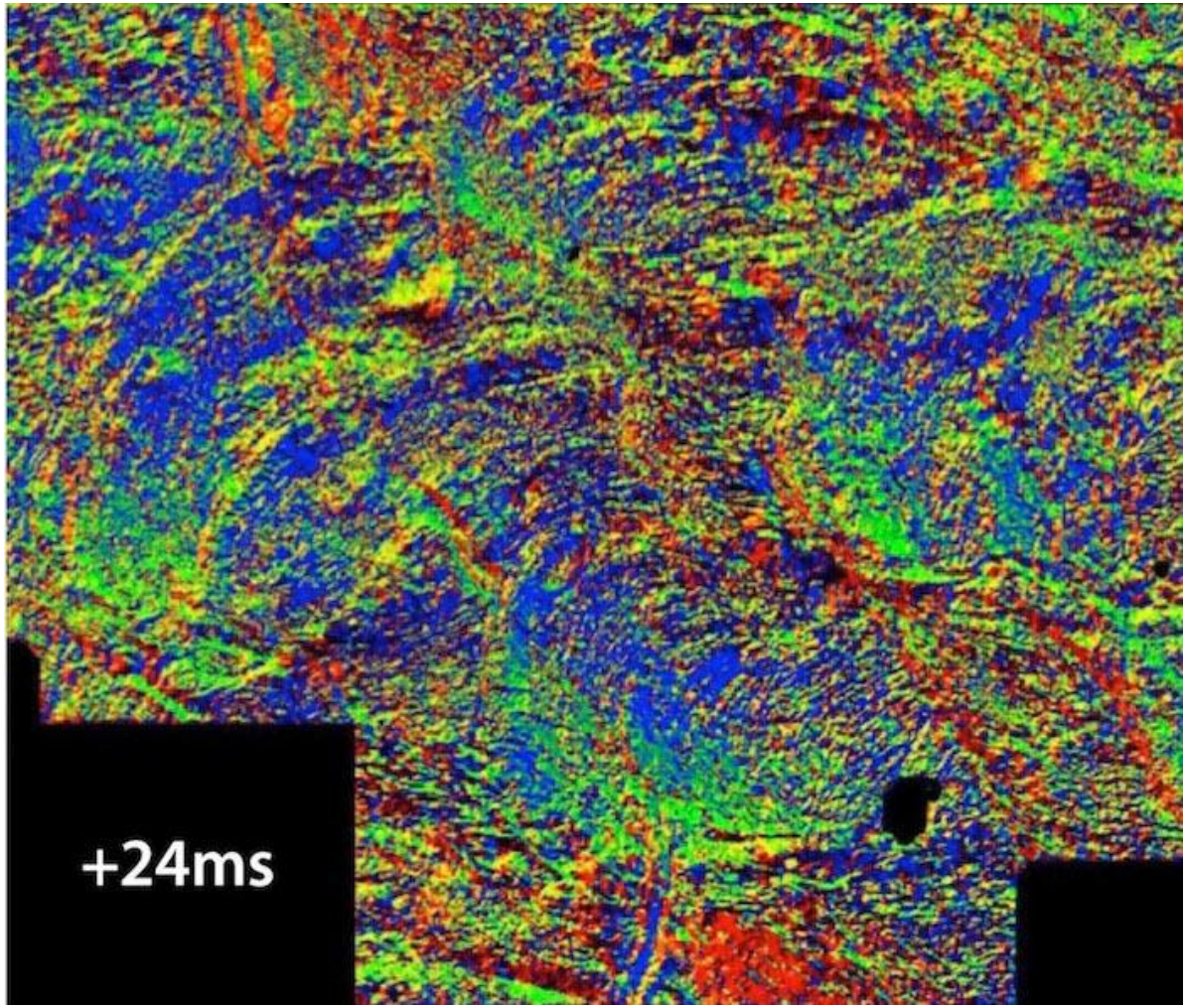
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



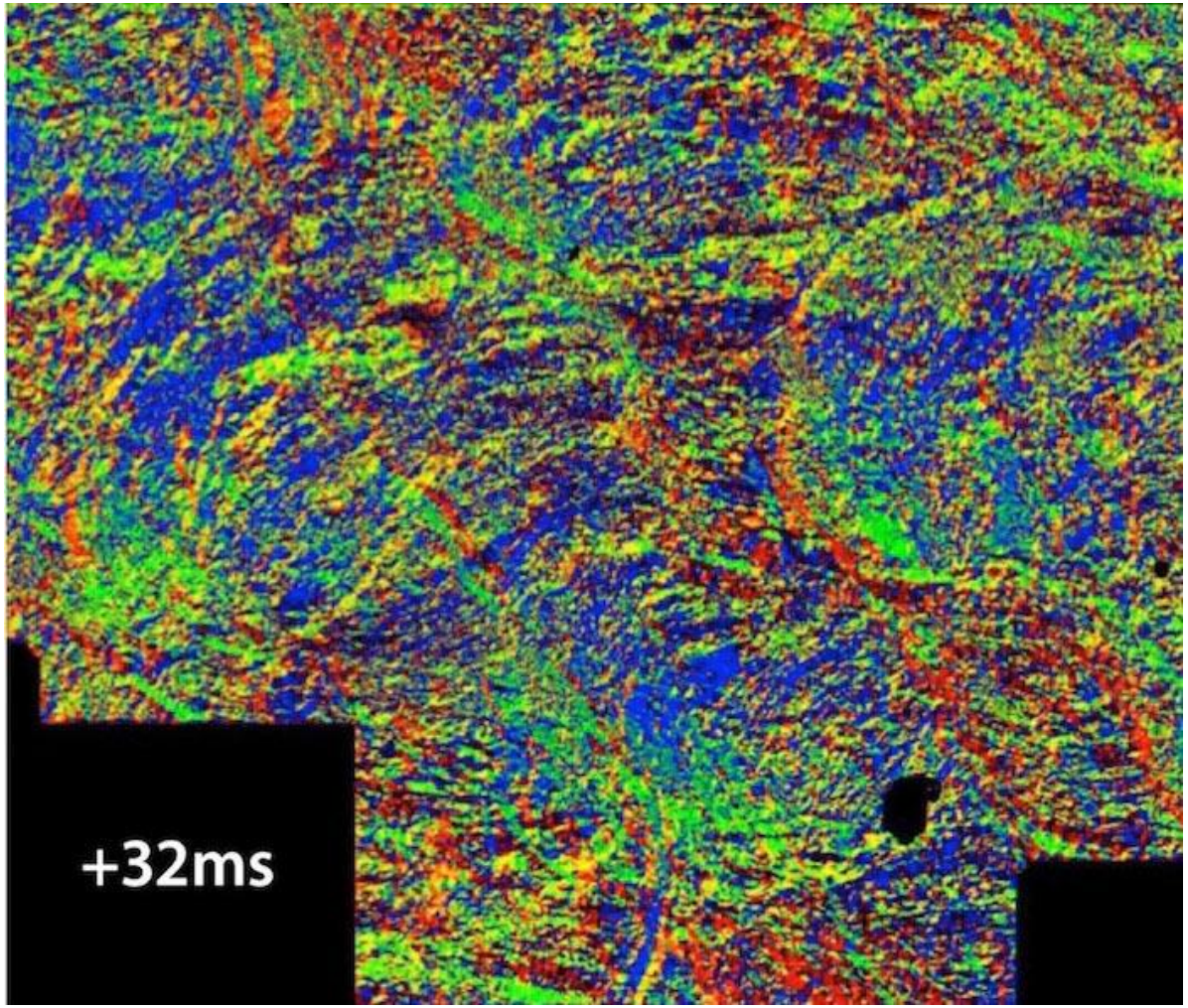
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



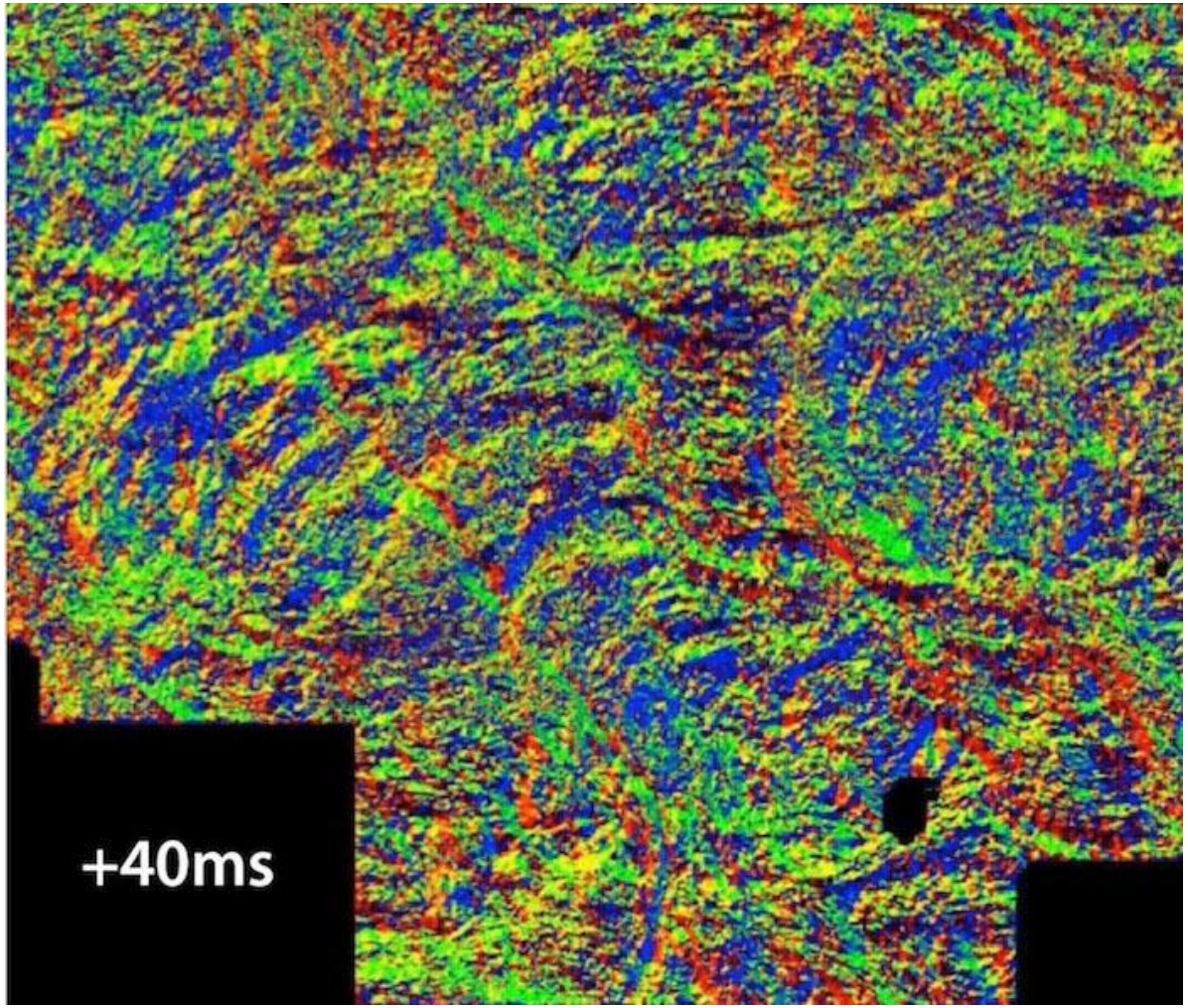
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



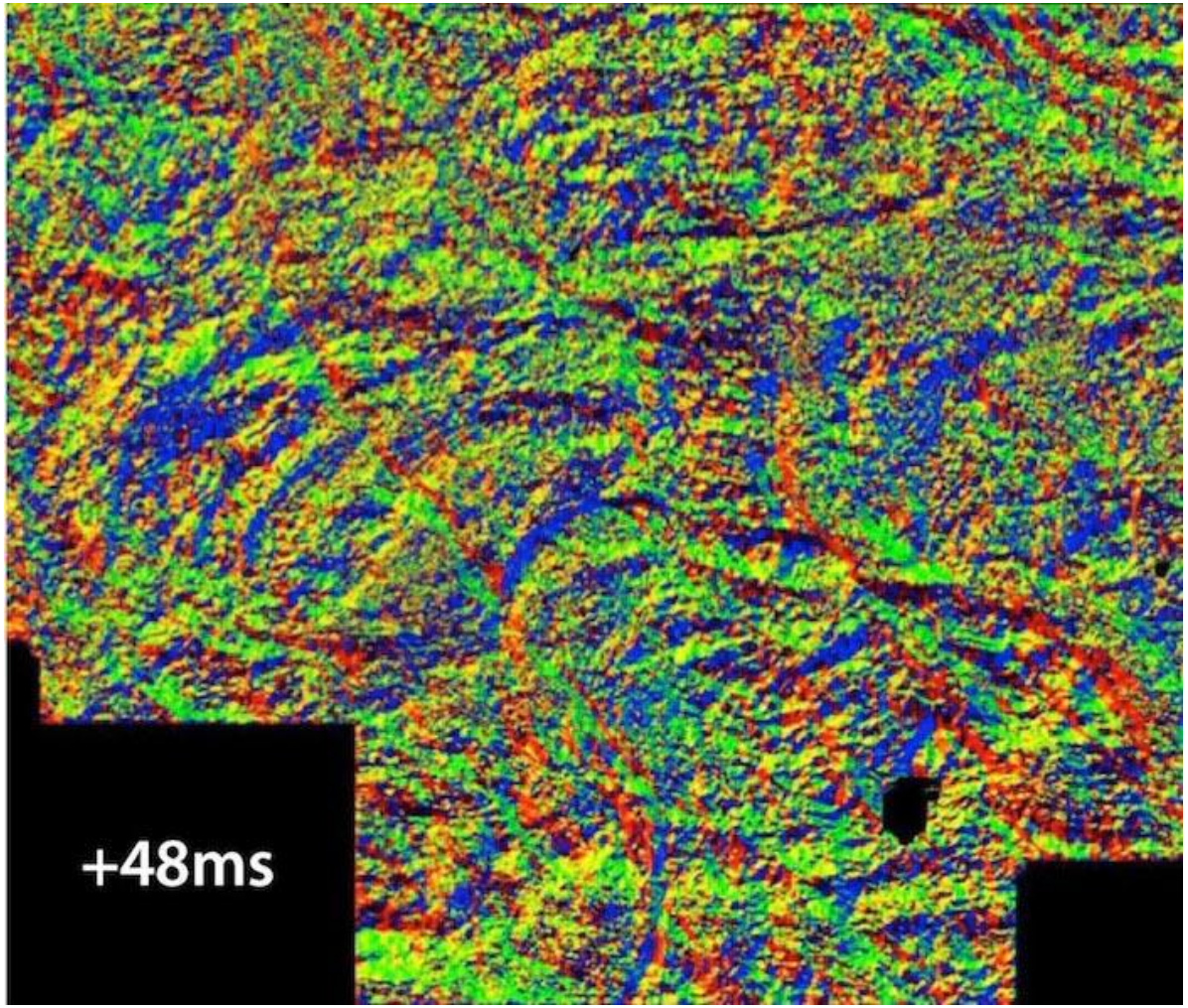
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



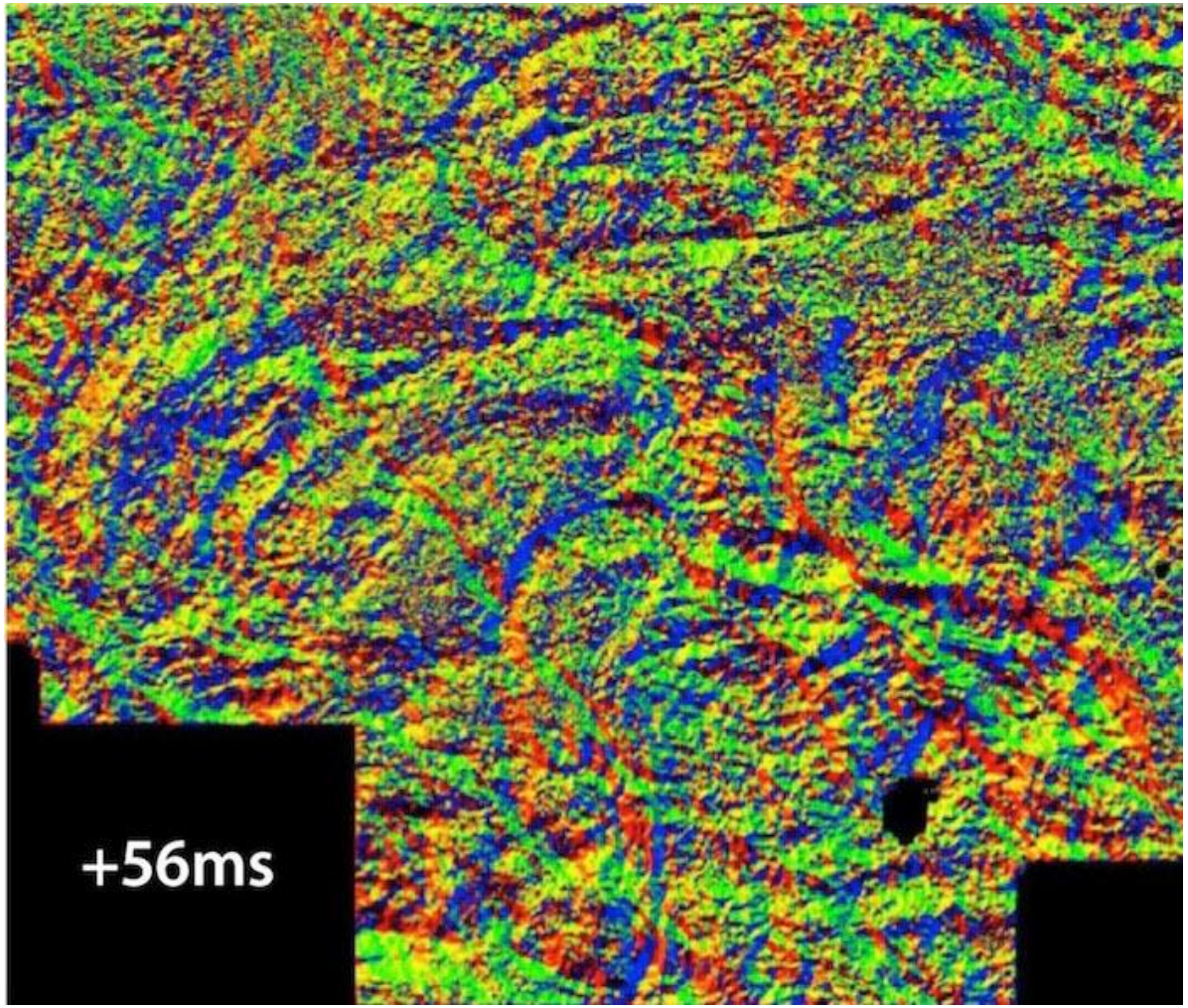
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



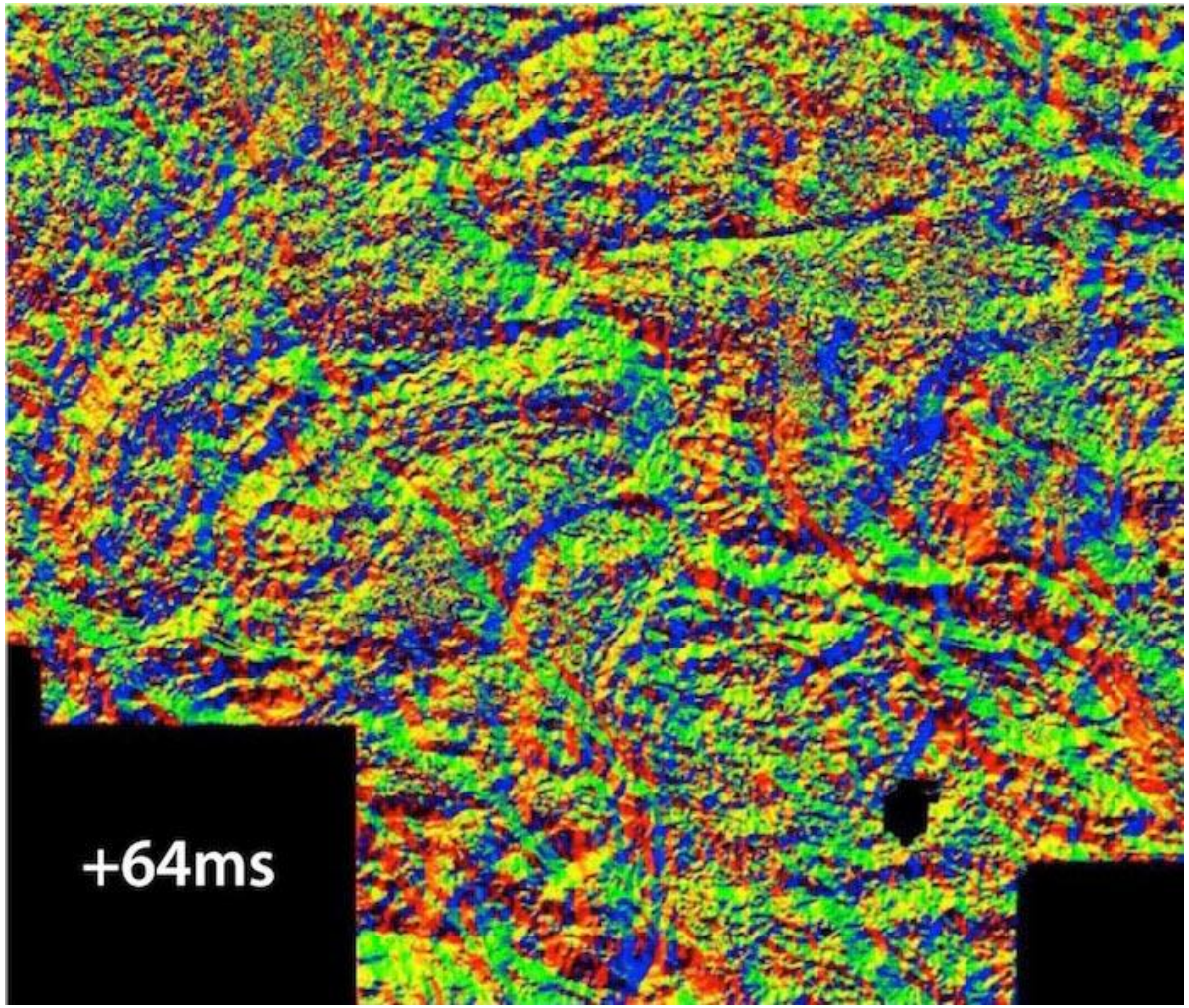
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



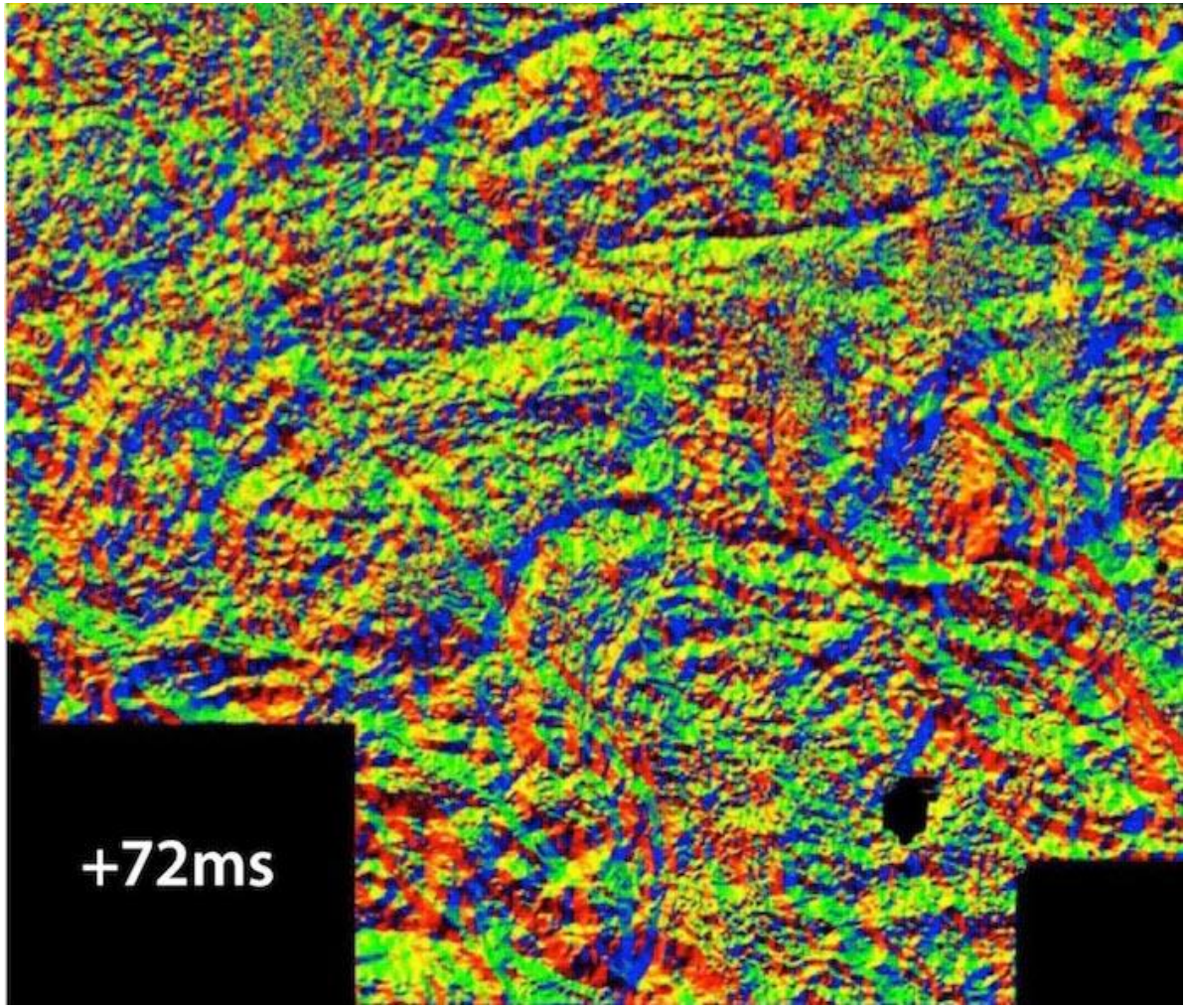
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



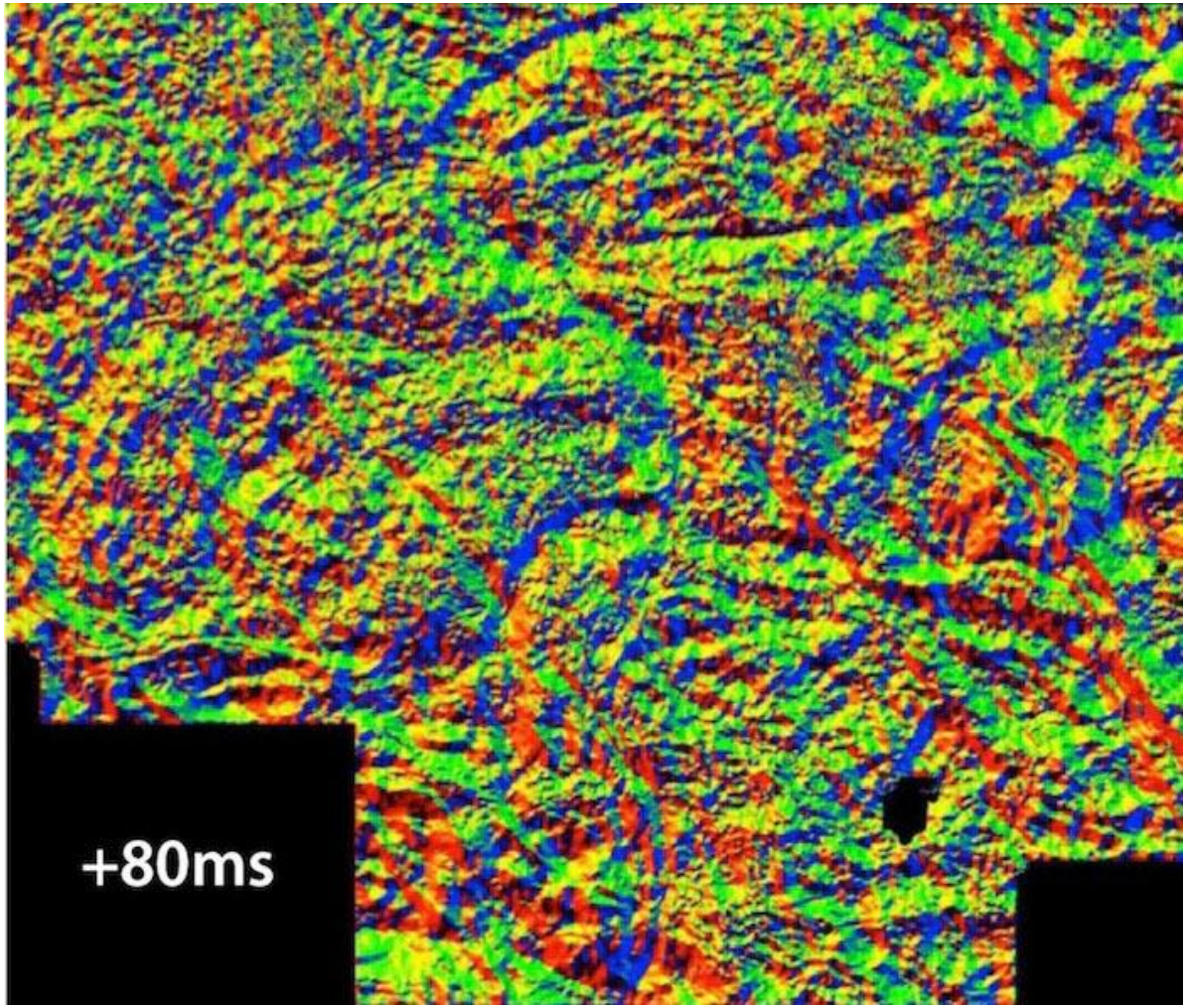
© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Sensoriamento Remoto Subterrâneo



© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP

Referências Bibliográficas

- CRÓSTA, A. P. 2006. Material de aula da disciplina Sensoriamento Remoto e Fotogeologia do IG/UNICAMP (material gentilmente concedido).
- CRÓSTA, A. P. 1992. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, Instituto de Geociências da Universidade de Campinas, 170p.
- JENSEN, John R. Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. 2ª Edição. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W.; Remote sensing and image interpretation. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008. xii, 756p.
- MORAES NOVO, Evlyn L.M. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. 3ª Edição. São Paulo: Blucher, 2008.
- QUINTANILHA, J.A Processamento de imagens digitais. In: GEOPROCESSAMENTO, 1, São Paulo, 1990. Anais. São Paulo: EPUSP, 1990. p 37-52
- RICHARDS, J. A; JIA, X. Remote sensing digital image analysis: an introduction. 3th ed. Berlin; New York: Springer-Verlag, 2005. xxiv, 4-25p.
- TODOROVIC-MARINIC, D., 2012, Remote Sensing Underground, GeoExPro, Vol. 9, No. 5, 20-24.

© Copyright 2016 Laboratório de Geomática / PMI / EPUSP – Santos, SP