

Medição de Irradiâncias

Meteorologia Física II



Por que medir?

- **Transformação de energia** no sistema Terra-atmosfera e sua variação espaço-temporal
- **Balanco de radiação** na superfície e ao longo da atmosfera
- **Balanco de energia à superfície**

- Análise das propriedades e distribuição de **constituintes da atmosfera**
- Verificação de medições realizadas a bordo de **satélites artificiais** e seus algoritmos

Principais grandezas medidas

- Espectro solar ($\sim 0,3$ a $4,0 \mu\text{m}$):
 - Irradiância solar global incidente sobre uma superfície plana horizontal
 - Global \Rightarrow radiação provém de todo hemisfério

Radiação solar

- Dois componentes:

- Direta: transmissão decresce com

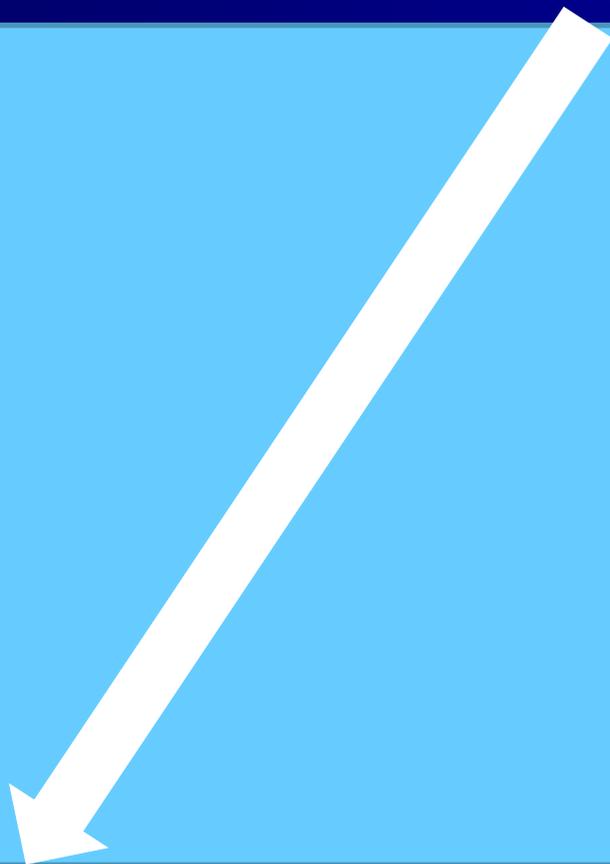
- o aumento do ângulo zenital solar (aumento do caminho óptico) 

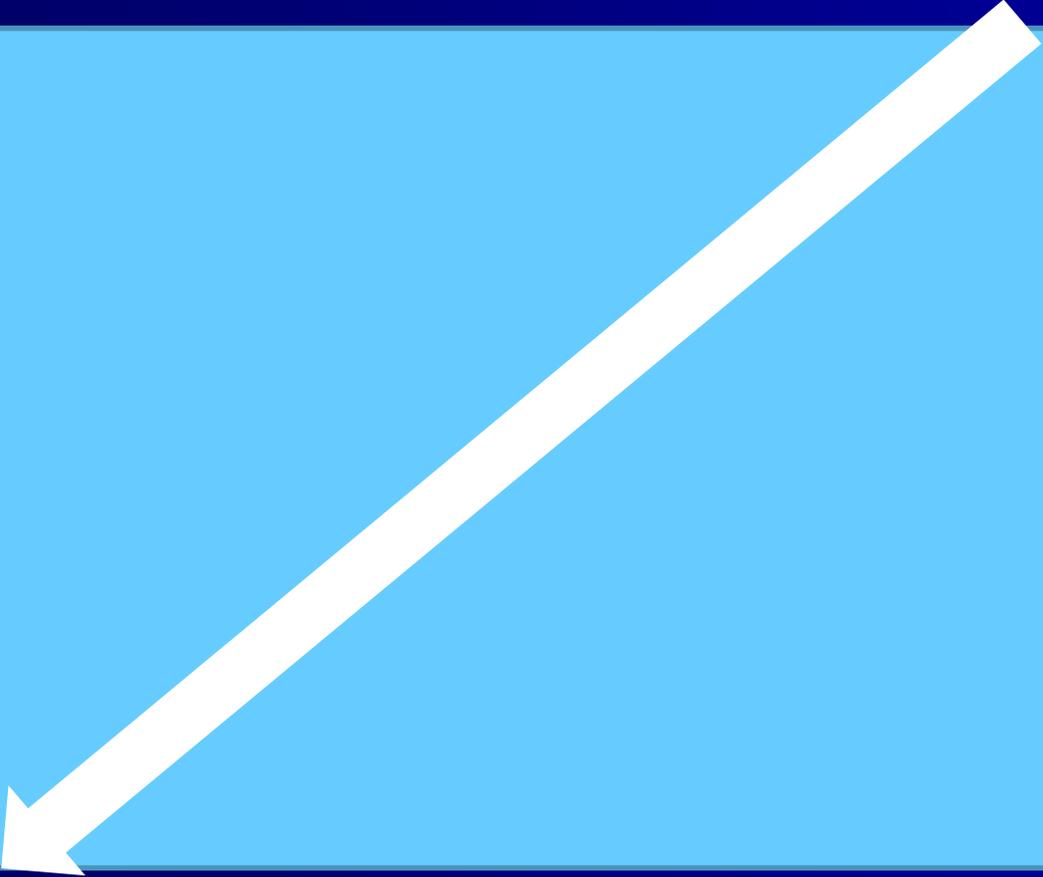
- Aumento da concentração dos constituintes atmosféricos **opticamente ativos** (partículas de aerossol, gases, nuvens, cristais de gelo)

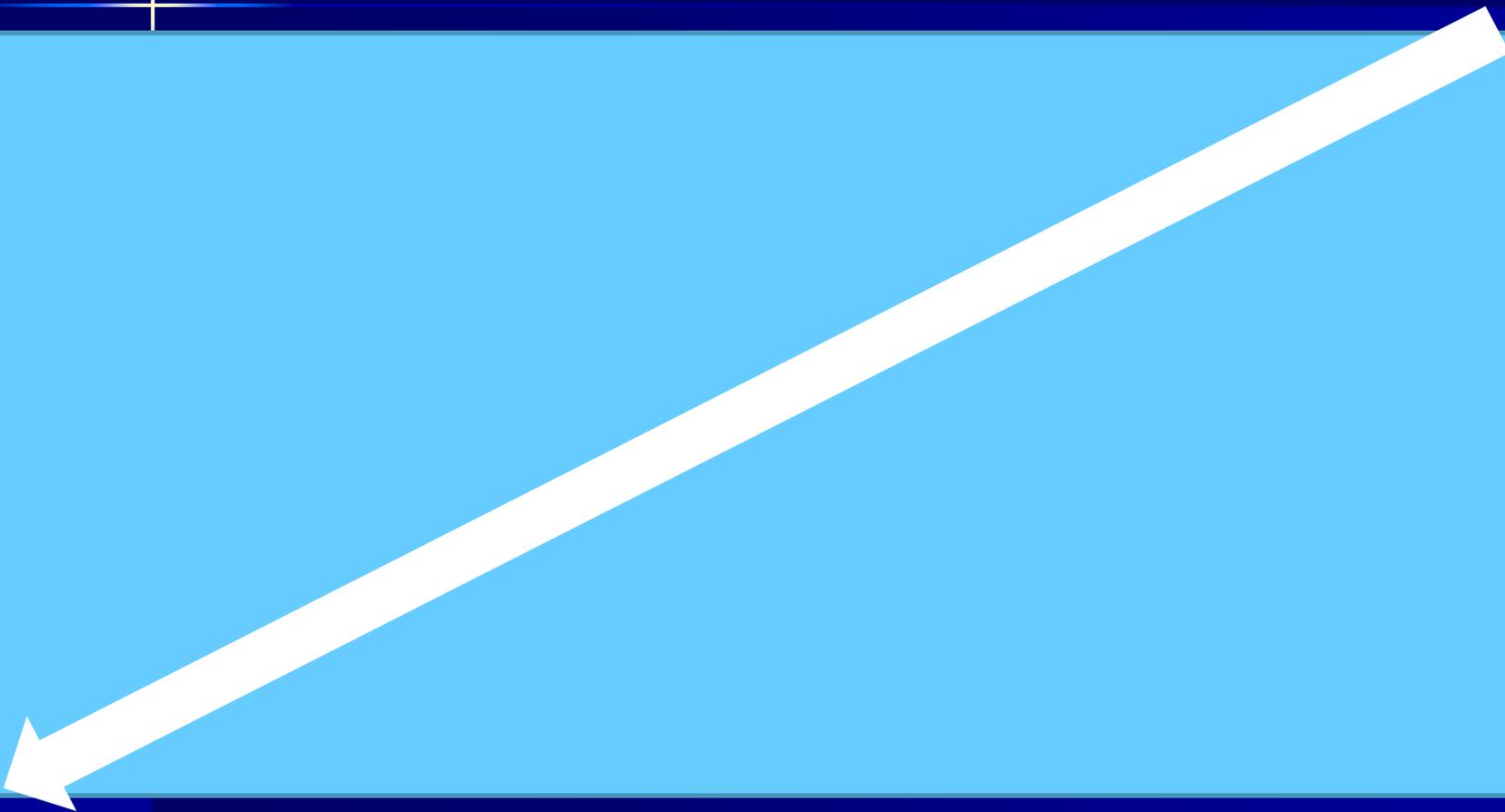
=> aumento de atenuação!





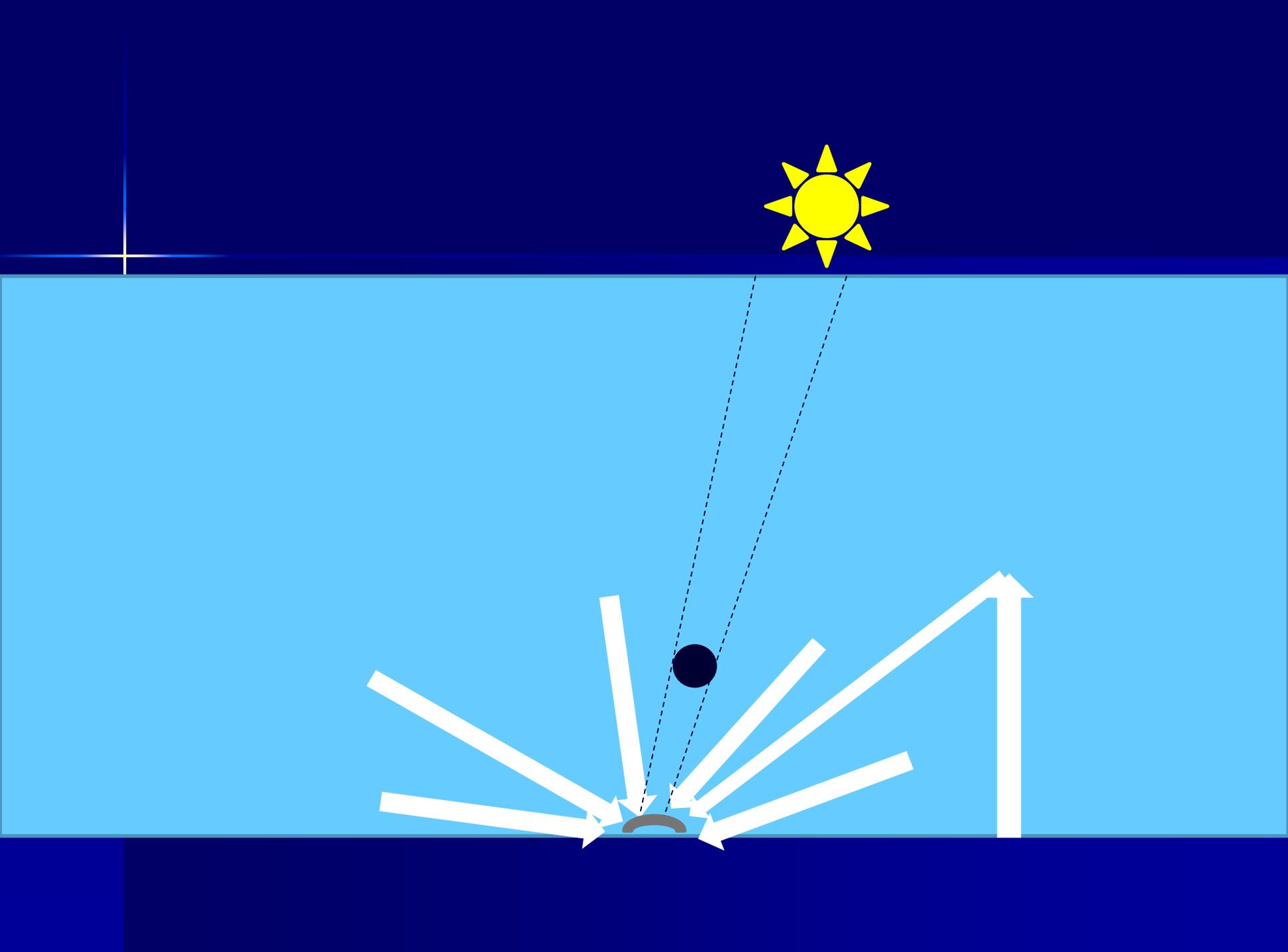






Radiação solar

- Dois componentes:
 - Difusa: proveniente de todo o céu
 - É resultante do espalhamento de radiação solar pelas moléculas de gases, partículas de aerossol, nuvens
 - Exclui-se a região do disco solar
 - Inclui-se a contribuição da reflexão da superfície que é novamente espalhada pela atmosfera ou por outras superfícies vizinhas



- A distribuição espectral dos dois componentes é diferente
- A parte difusa é mais rica de radiação com comprimento de onda mais curto que a direta. A explicação será apresentada em aula futura! Não perca!!!

■ Irradiância solar global:

$$\epsilon_g = \epsilon_s + \epsilon_{\text{dif}} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_o t_{\text{Dir}} \quad (4.2)$$

Onde t_{Dir} é ???

a transmitância direta (fração do feixe incidente que não sofreu interação ao atravessar a atmosfera)

e ϵ_o é a irradiância solar incidente no topo da atmosfera

Para radiação monocromática:

$$t_{\text{Dir}}(\lambda) = \exp(-\delta(\lambda)) = \exp(-\tau(\lambda)/\cos\theta_0) \quad (4.3)$$

$\delta(\lambda)$: espessura óptica de extinção ou de atenuação da atmosfera no comprimento de onda λ

$\tau(\lambda)$: profundidade óptica de extinção da atmosfera no comprimento de onda λ

θ_0 : ângulo zenital solar

Espectro terrestre (~ 4 a $100 \mu\text{m}$)

- Em geral: irradiância isotrópica e difusa
- Emitida por todo o sistema Terra-atmosfera
- Medem-se, em particular:
 - Irradiância emitida pela superfície
 - Irradiância emitida pela atmosfera

Radiação Total

- Soma da radiação solar com a radiação terrestre
- Cobre todo o intervalo espectral desde 0,3 a 100 μm

Medidas em bandas espectrais estreitas

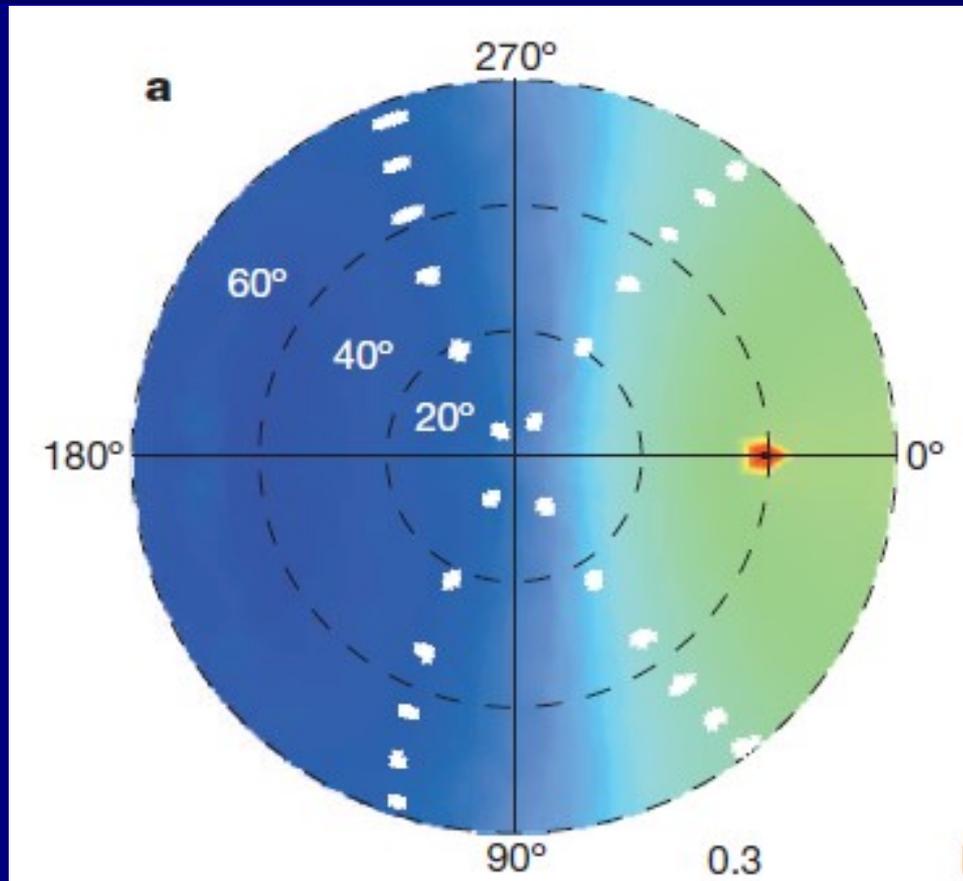
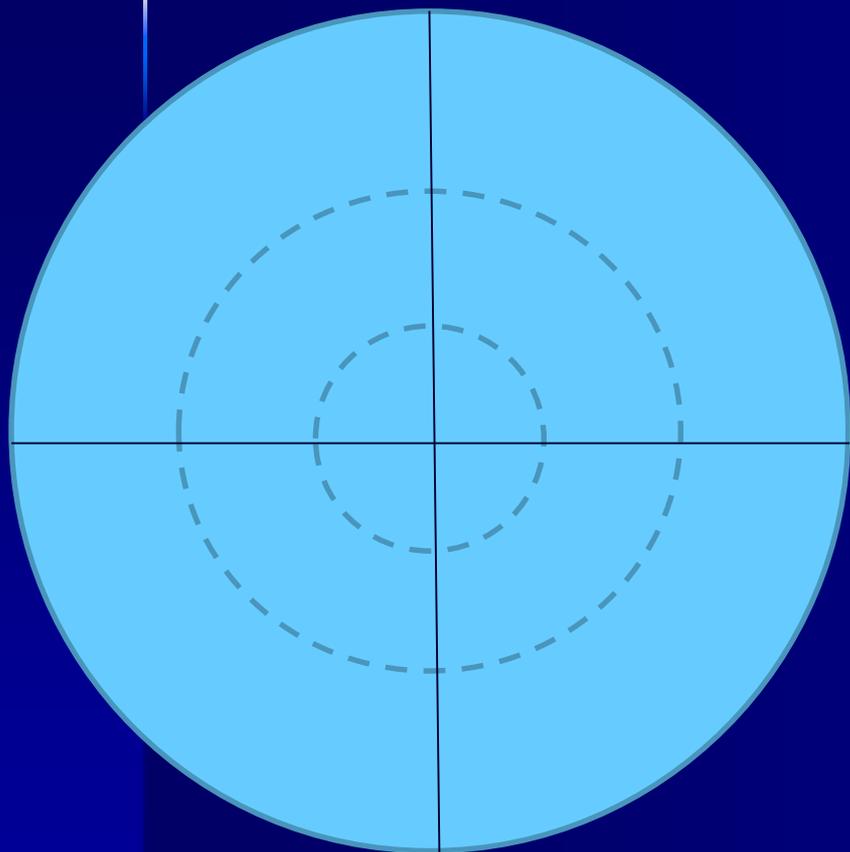
- Uso de filtros especiais
- Utilizadas para determinar a concentração de constituintes da atmosfera
- Exemplos: ozônio no UV, partículas de aerossol no visível, vapor d'água no NIR

Medidas direcionais em ângulos sólidos pequenos

- Obtenção de radiâncias em diferentes orientações
- Estudo do espalhamento de radiação pelos constituintes atmosféricos e reflexão pela superfície

Superfície

- Lambertiana – reflexão isotrópica
- Não lambertiana – depende da geometria



Instrumentos Convencionais

Princípios Físicos

- Pergunta: o que “sentimos” quando estamos expostos à radiação?
- Do que uma calculadora precisa para funcionar?
- Calculadora com painel solar

Princípios Físicos

- Os mais aplicados:
 - Térmicos
 - Fotoelétricos ou fotodetectores

Detectores térmicos

- Elemento absorvedor de radiação com capacidade térmica
- Transformação de energia radiante para energia térmica => **aumento de temperatura**
- Resposta para radiação total absorvida => **não seletivo espectralmente**
- Como não há CN perfeito, absortância varia => controle da variabilidade espectral é difícil

Principais tipos:

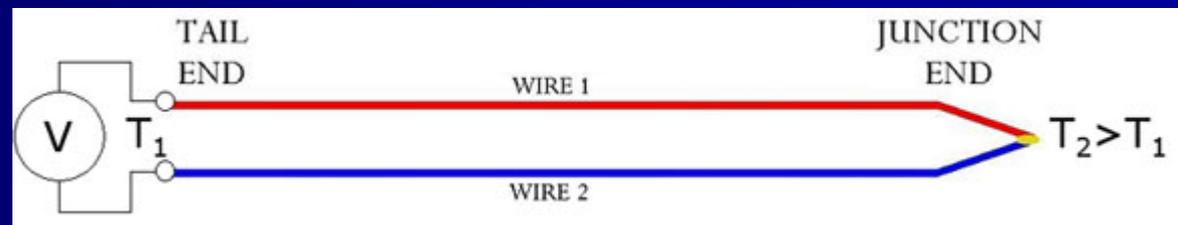
- Calorímetros
- Termopares ou termopilhas
- Bolômetros

calorímetro

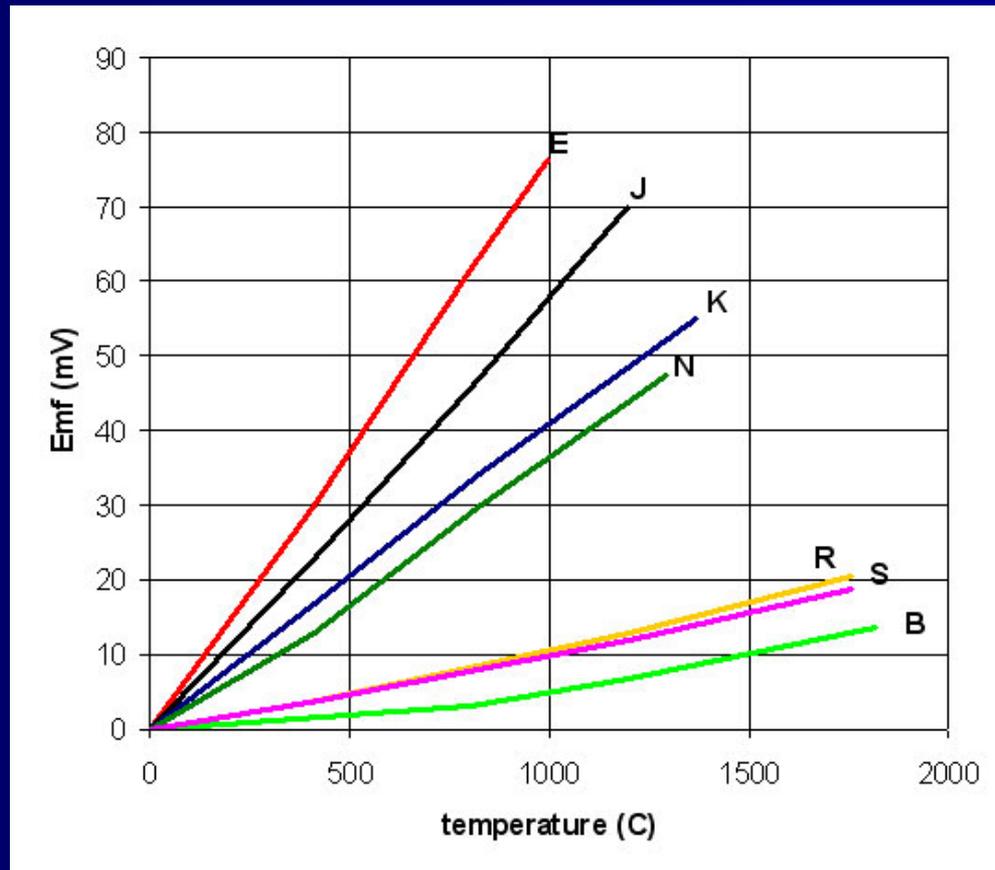
- Radiação absorvida é determinada por variações de temperatura
- Vantagem: simplicidade
- Desvantagem: relativamente insensível e de resposta lenta

Termopares e termopilhas

- dois metais distintos unidos em uma das extremidades.
- diferença de temperatura entre a extremidade unida e as extremidades livres => diferença de potencial ou **força eletromotriz**



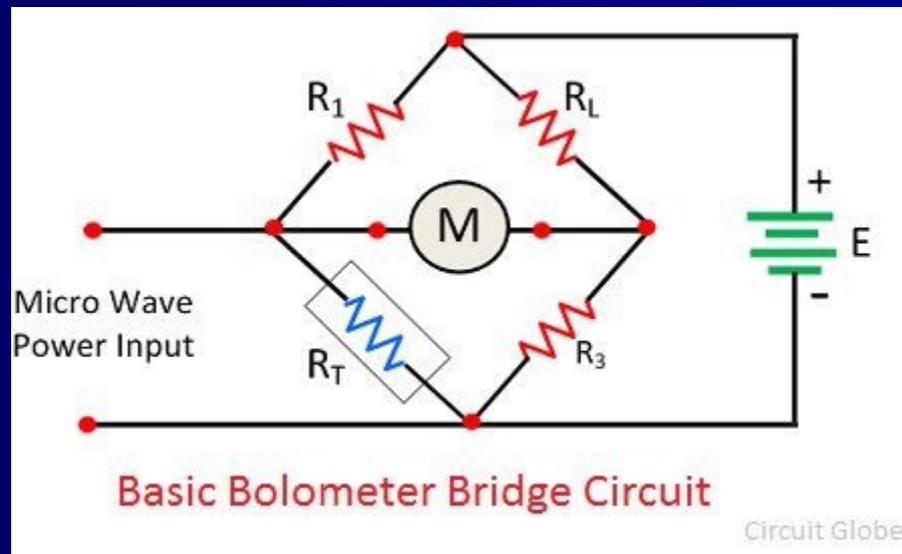
- Resposta depende dos tipos de metais



- Único termopar => pouca sensibilidade
- Termopares em série => aumento da sensibilidade => termopilha
- Vantagem: é fácil monitorar a tensão de saída; é aproximadamente não seletivo espectralmente

Bolômetro

- Variação da resistência de um metal ou semicondutor com a temperatura



- Vantagem: resposta rápida

Fotodetectores

- Sensor é ativado pela detecção de fótons (quântico)
- Respostas mais rápidas e maior sensibilidade
- Seletividade espectral

Principais tipos

- Fotovoltaicos
- Fotocondutores
- Células fotoemissivas

fotovoltaicos

- Produzem corrente elétrica quando iluminados por radiação visível ou UV próximo
- Mais simples

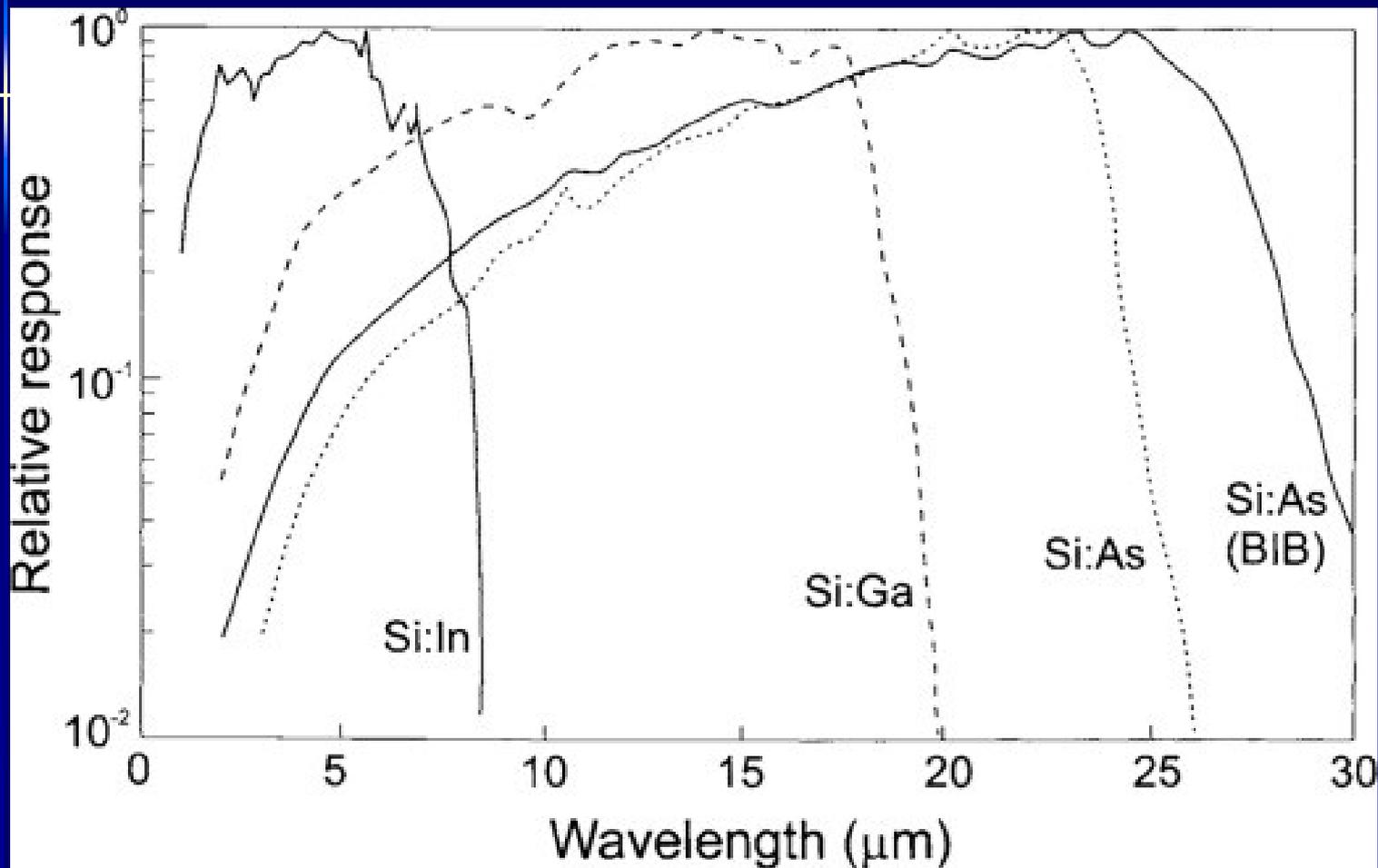
- Painéis solares



<https://www.pexels.com/photo/silver-and-black-solar-panels-on-snow-covered-ground-159160/>

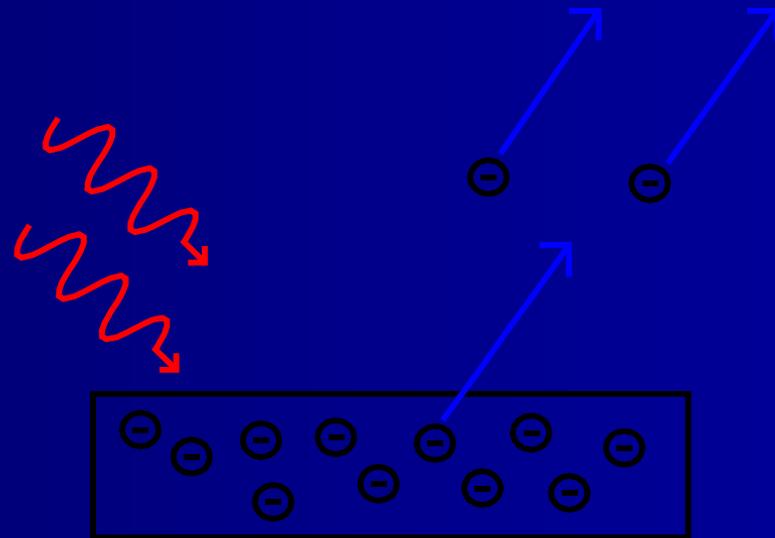
fotocondutores

- Variação da condutividade elétrica do material semicondutor ao absorver radiação
- Região do infravermelho



fotoemissivos

- Efeito fotoelétrico
- UV, visível e NIR



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.svg

Calibração

- Conversão das grandezas medidas (tensão, corrente, diferença de temperatura) em irradiância
- Fontes: sol, lâmpadas, cavidade de CN

Sol

- Atmosfera limpa e estável => topo de montanhas

lâmpadas

- Radiância espectral
- Irradiância espectral
- Irradiância total

Cavidades de corpo negro

- Alta temperatura: 1000 a 3000 K
- Baixa temperatura: -80°C a 150°C

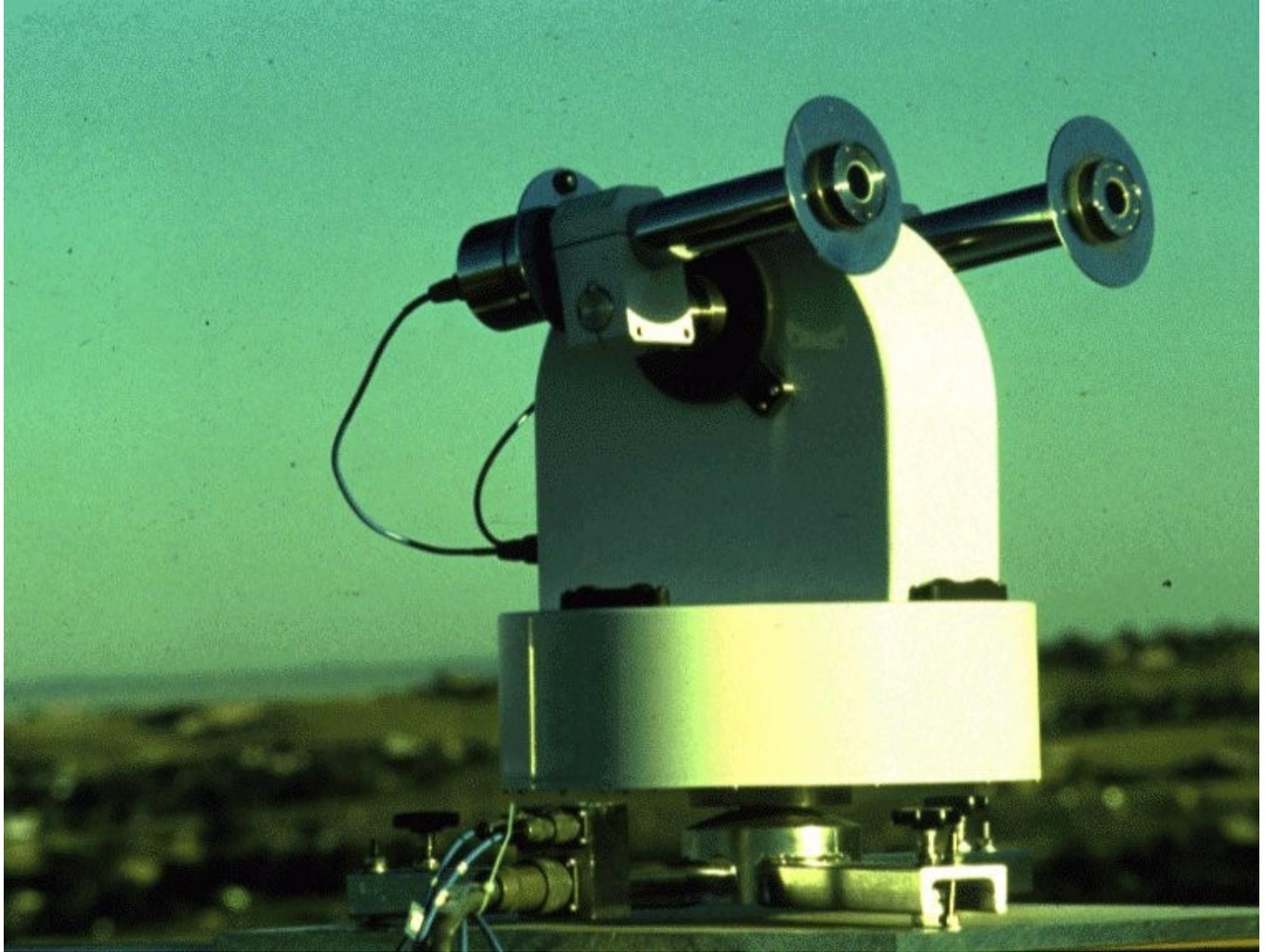
- Denominação geral: **Radiômetros**
- Outras:
 - Fotômetro (região do visível)
 - Pireliômetro
 - Piranômetro
 - Pirgeômetro

Cuidados experimentais

- Nivelamento
- Alinhamento
- Desobstrução do campo de visão
- Degradação dos sensores (sujeira, umidade):
 - Calibração
 - Limpeza dos sensores

Pireliômetro

- Radiação solar direta em incidência normal
- Instrumento com campo de visão estreito (colimador, com abertura entre 5 a 8°), montado em um sistema automático que acompanha o movimento do sol
- Detetores: calorímetros ou termopilhas

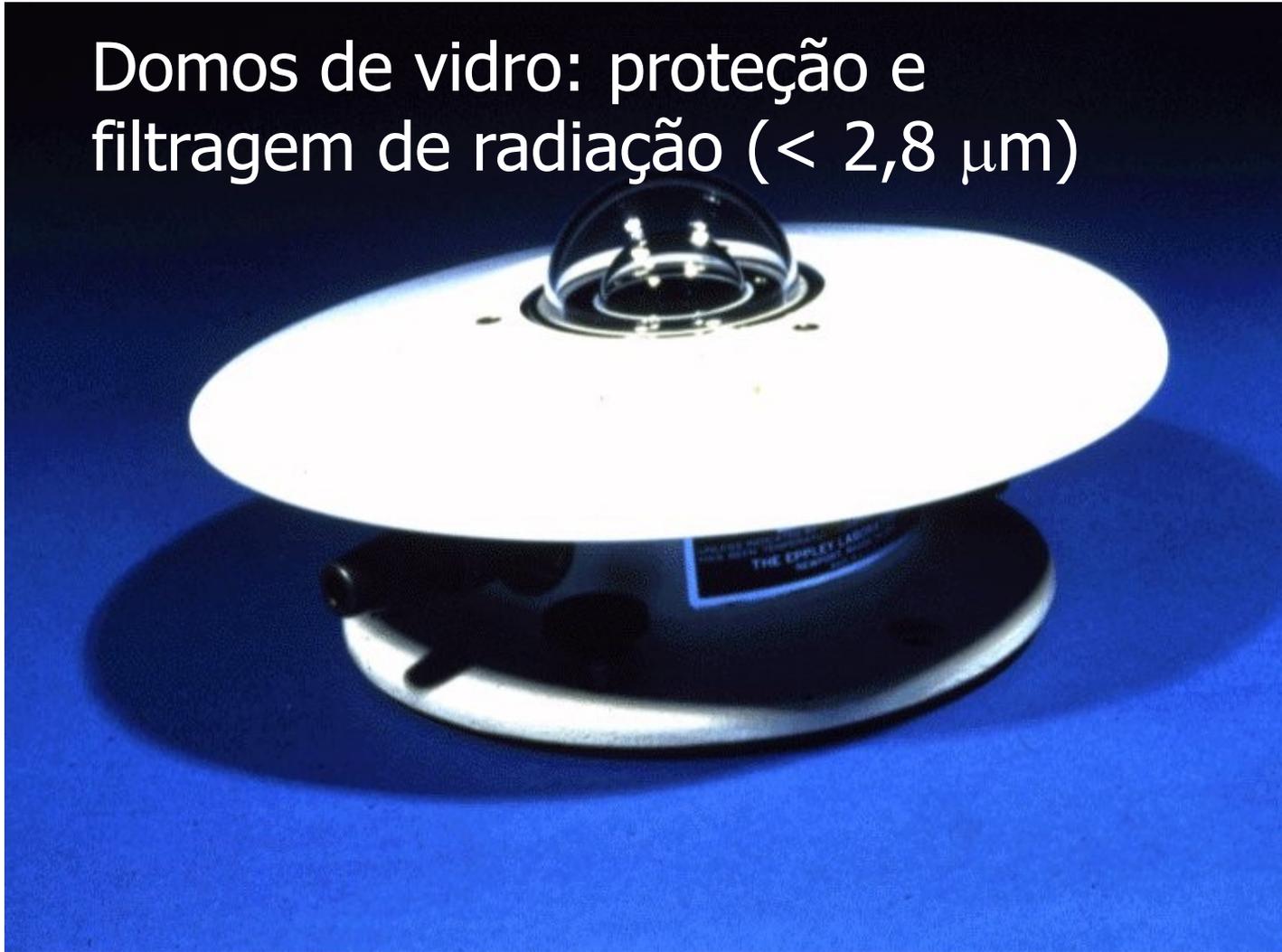


<http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/>

Piranômetro

- Irradiância solar global proveniente de todo um hemisfério
- A superfície deve ser perfeitamente plana e horizontal
- Detetores: calorímetros, termopilhas ou fotodiodos (sensores do tipo fotovoltaicos)

Domos de vidro: proteção e
filtragem de radiação ($< 2,8 \mu\text{m}$)



<http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/>

Actinógrafo bimetálico

- Totalmente mecânico
- Uma lâmina bimetálica negra, exposta à radiação solar e duas outras brancas mantidas à sombra
 - Negra: deforma-se por variação de temperatura e absorção de radiação solar
 - Brancas: deformam-se apenas por variação de temperatura
 - acoplamento mecânico para compensar efeito térmico da lâmina negra
 - deformação resultante = efeito da radiação, é transmitida a uma pena registradora



Piranômetro

- Com o auxílio de um sistema de sombreamento, pode-se medir a irradiância solar difusa
- Em geral utiliza-se faixa de metal curva, cuja inclinação é ajustada para acompanhar o movimento aparente do sol na abóbada celeste





<http://eko-eu.com/products/solar-radiation-and-photonic-sensors/solar-monitoring-stations/sms-directdiffuseglobal>

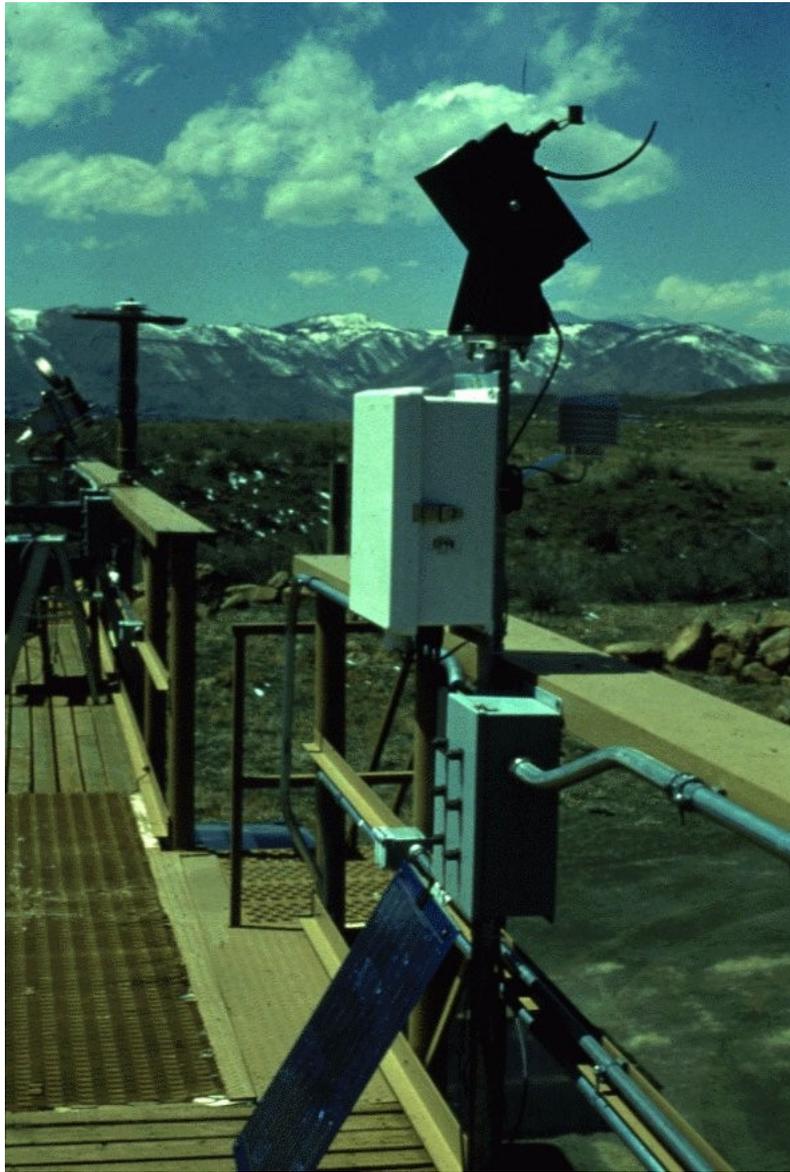
Regiões espectrais específicas

- UV-A e UV-B
- PAR (radiação fotossinteticamente ativa) ou visível



Espectrais

- Multifilter Rotating Shadowband Radiometer (MFRSR) – medidas em determinados intervalos espectrais (centrados em 415, 500, 615, 673, 870 e 940 nm) de irradiância global e difusa
- Aerossol
- 415 e 500 nm: ozônio
- 940 nm: vapor d'água



Espectrais e direcionais

- Radiômetro solar/celeste:
 - irradiância espectral solar direta em incidência normal – fotômetro solar
 - irradiância espectral solar difusa celeste proveniente de diversas direções da abóbada celeste
- bandas espectrais: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 e 1020 nm



https://www.youtube.com/watch?v=i_CJW3JsBI4

Pirgeômetro

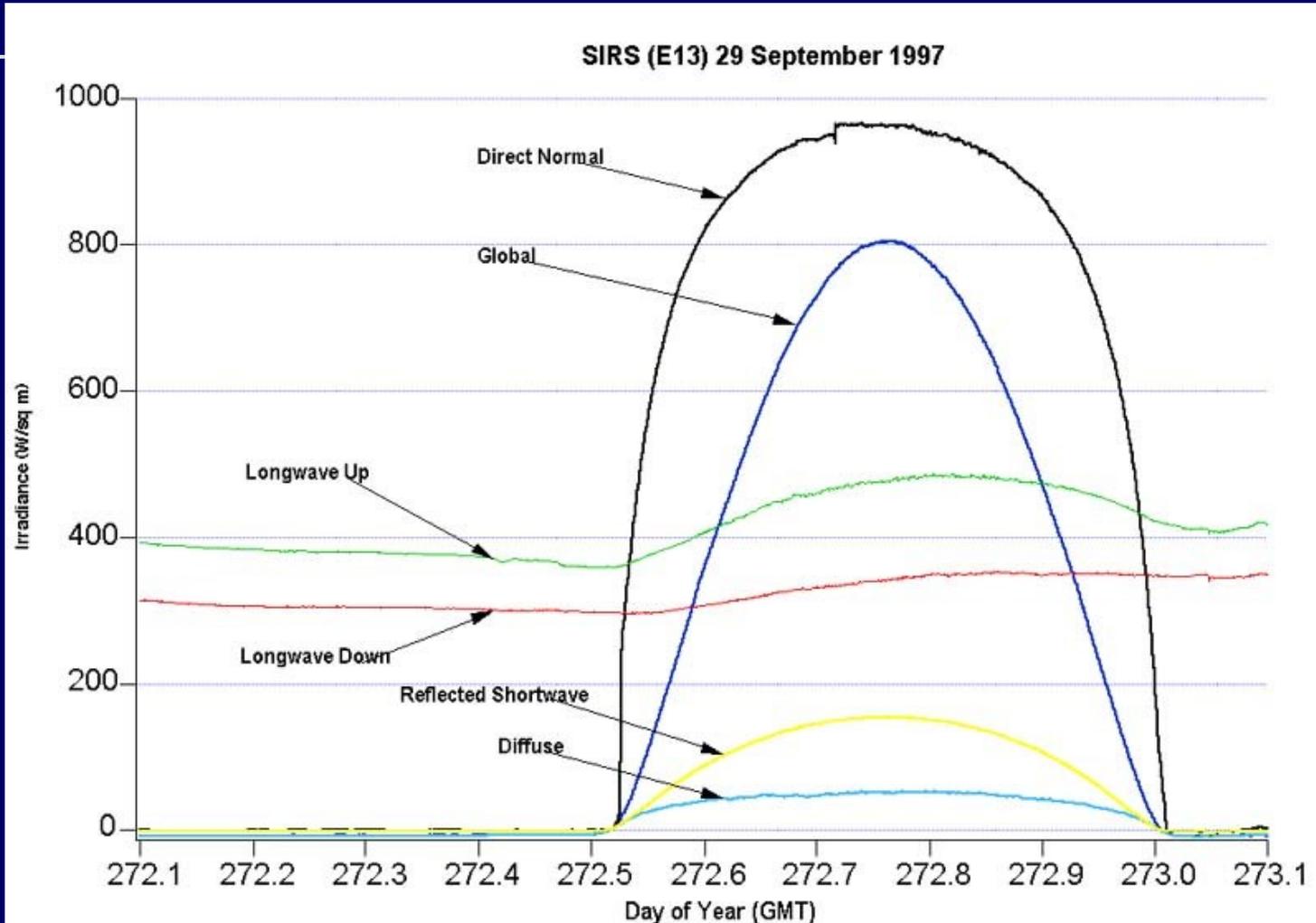
- Irradiância de onda longa proveniente de todo um hemisfério
- Em geral possui um domo de silício para filtrar radiação solar
- Detetores: termopilhas

<http://www.cmdl.noaa.gov/star/instfset.html>



<http://www.kippzonen.com/image/common/cg1big.jpg>

Exemplo – ciclo diurno



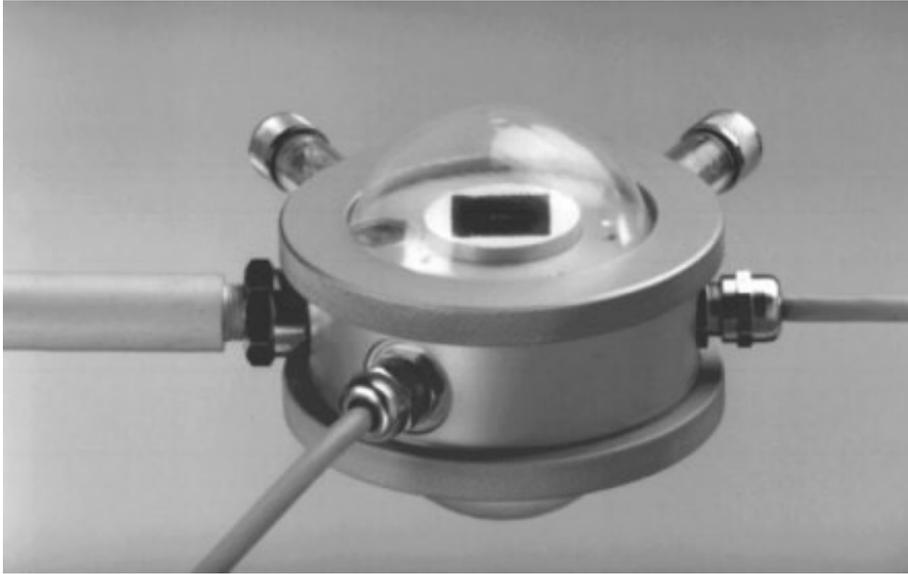
Aplicações

- Irradiância solar incidente e a refletida
 - ➡ refletância ou albedo da superfície
- Irradiância solar incidente, refletida, irradiâncias descendente e ascendente onda longa
 - ➡ balanço de radiação à superfície (ou saldo de radiação)

Pirradiômetro

- Medidas do saldo de radiação total (onda curta mais onda longa) em um hemisfério
- Quando composto por sensores apontados para cima e para baixo – “net pirradiômetros”
- Detectores: termopilhas

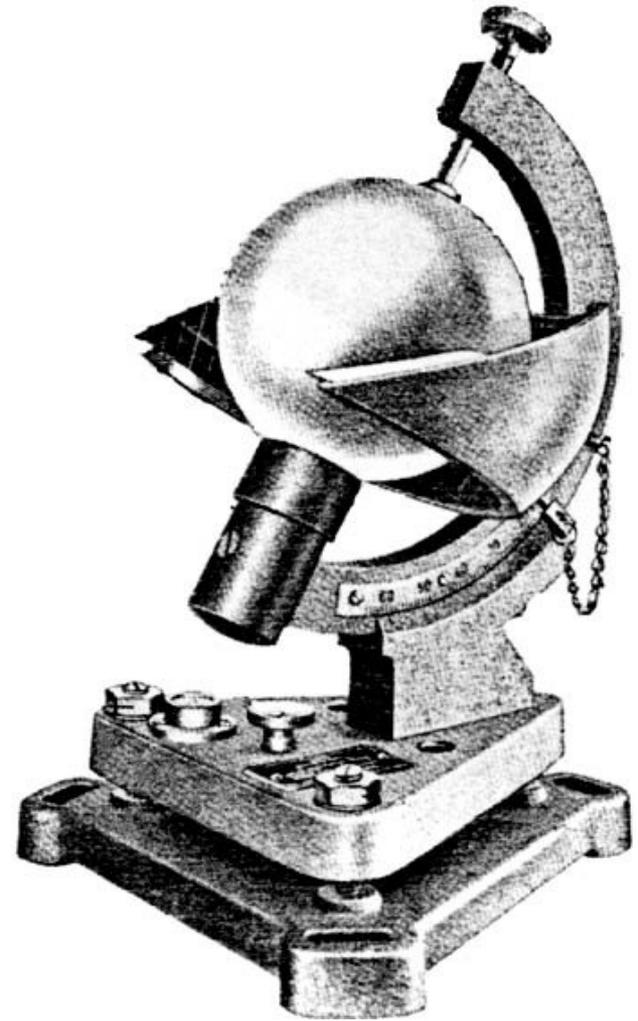
<http://www.telecom.at/schenk/8111.html>



<http://www.kippzonen.com/product/cnr1.html>

Heliógrafo

- Medida de insolação: intervalo de tempo em que o disco solar permanece visível, entre o nascimento e o ocaso do Sol.
- Esfera de vidro focaliza os raios solares em uma tira de papel especial (heliograma), onde há uma escala de tempo impressa
- Raios focalizados queimam o heliograma



Heliógrafo de Campbell-Stokes

Terra

- Características de alguns sensores a bordo do satélite

(<http://terra.nasa.gov>)

CERES – Clouds and the Earth's Radiant Energy System

- Bolômetro termistor de varredura em banda larga
- Bandas espectrais:
 - onda curta: 0,3-5,0 μm – radiação solar refletida
 - onda longa: 8-12 μm – radiação térmica emitida pela Terra na janela atmosférica
 - total: 0,3 a >200 μm – radiação total

- Calibração “on-board” com o auxílio de um difusor de radiação solar, uma lâmpada de Tungstênio e um par de cavidades de corpo negro que podem ser controladas para diferentes temperaturas

MISR – Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer

- Radiômetro espectral com câmeras CCD para medir radiâncias em 9 ângulos diferentes
- Bandas espectrais: 446, 558, 672 e 866 nm
- Monitoramento da concentração e tipo de partículas de aerossol
- Quantidade, tipos e alturas de nuvens
- Distribuição da cobertura da superfície da terra

MODIS – MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer

- Radiômetro (fotodiodos) de varredura com filtros espectrais de interferência
- Intervalo espectral: 0,4 a 14,4 μm
- Determinar:
 - temperatura da superfície (continente e oceano) e detecção de pixels de fogo;
 - cor dos oceanos;
 - mapas globais de vegetação
 - características de nuvens
 - concentração das partículas de aerossol e suas propriedades

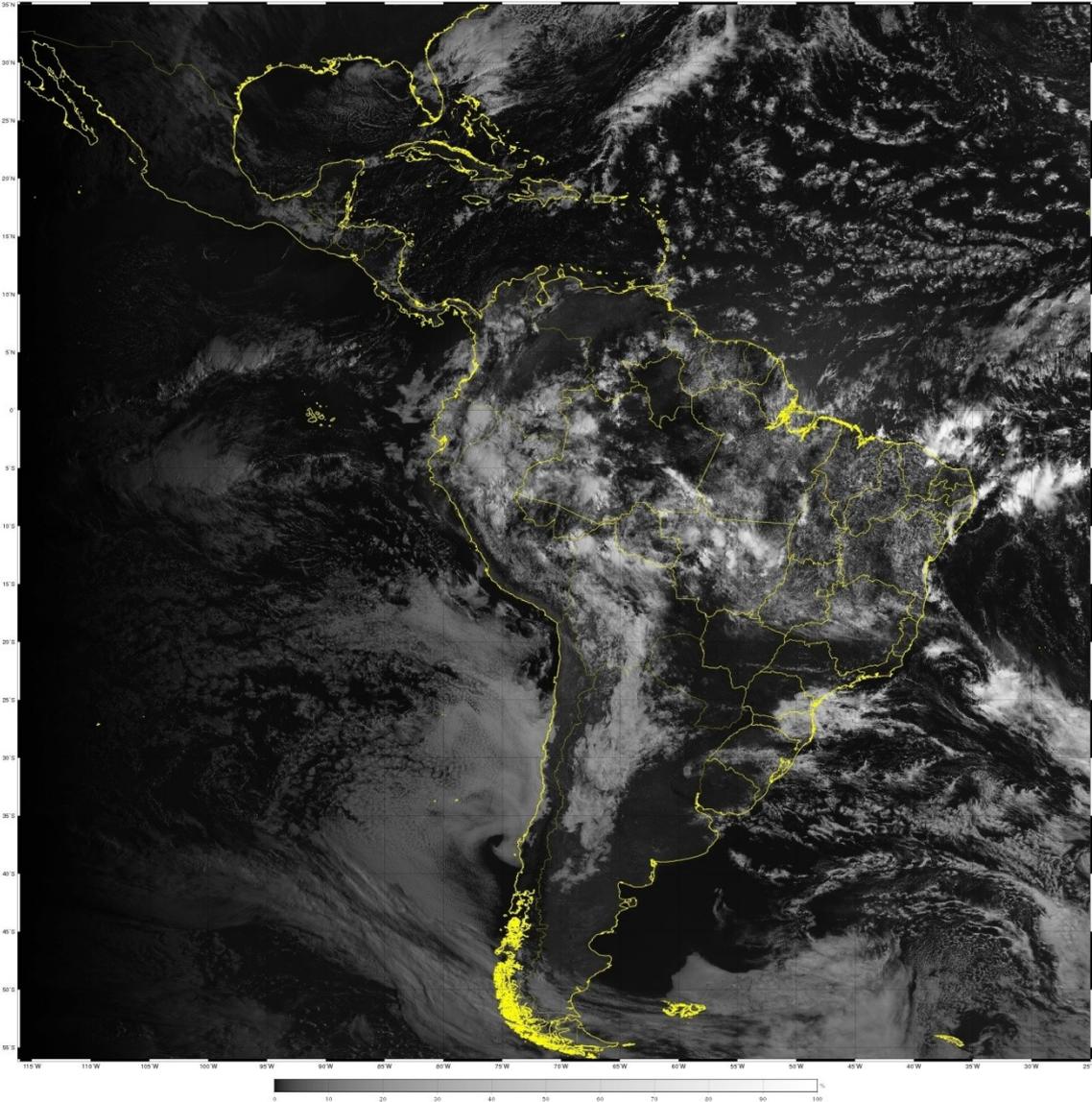
MOPITT – Measurements Of Pollution In The Troposphere

- Radiômetro de varredura – radiação infravermelha em três bandas de absorção do CO e do CH₄
- Bandas espectrais: 2,3 (CH₄), 2,4 (CO) e 4,7 μ m (CO)
- Calibração é realizada no próprio satélite com uma cavidade de corpo negro de alta temperatura

Sensoriame

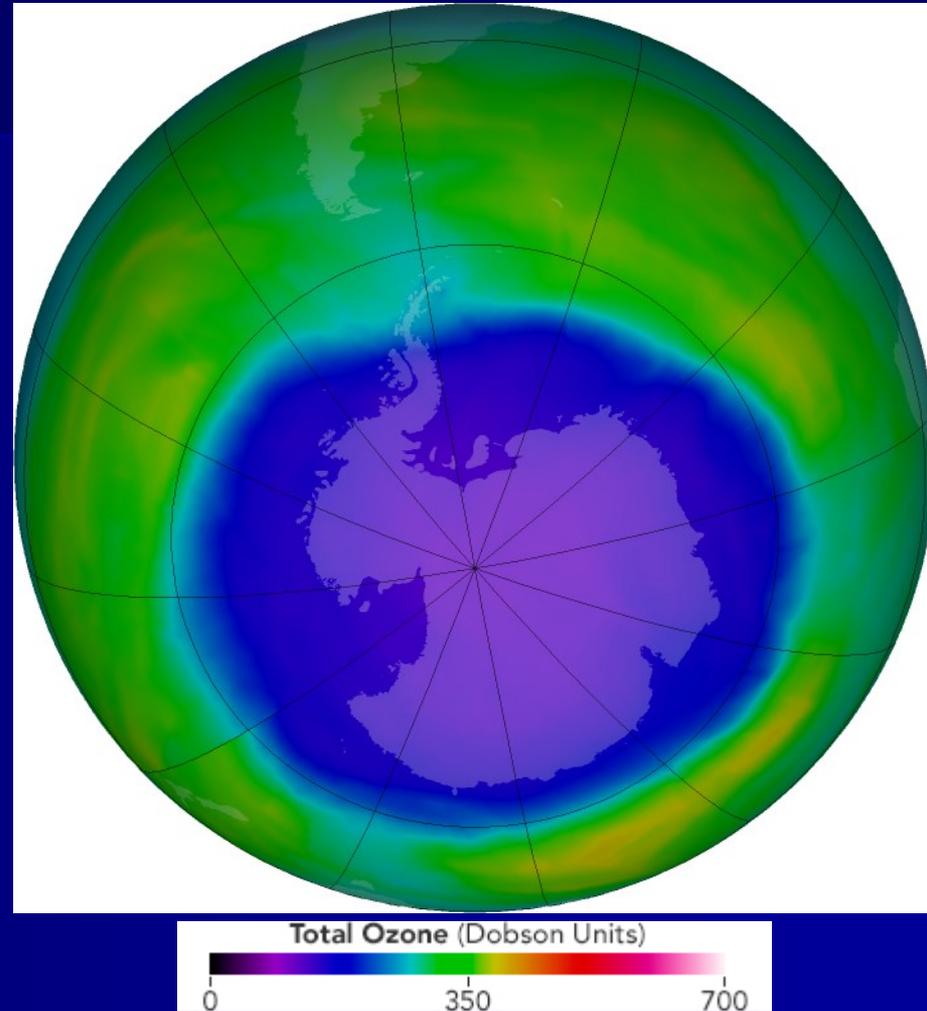
- Meteorologia
- Controle de polu atmosféricos
- superfícies – mu de solo, focos de queimadas, produtividade ag áreas alagadas, reservas naturais

GOES16 - CANAL_02 (0.64 microns)
América Latina: 201903271330 - 201903271341 GMT



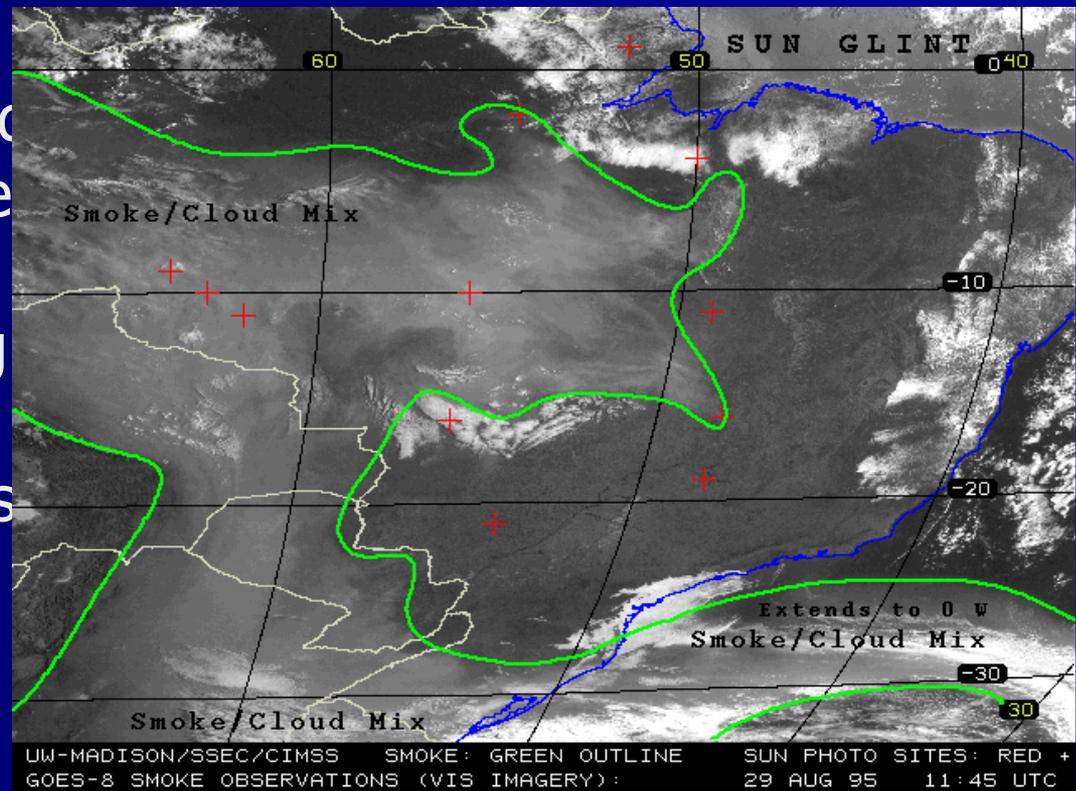
Sensoriamento remoto

- Meteorologia
- Controle de poluentes atmosféricos
- superfícies – mudança de solo, focos de queimadas, produtividade agrícola, áreas alagadas, reservas naturais



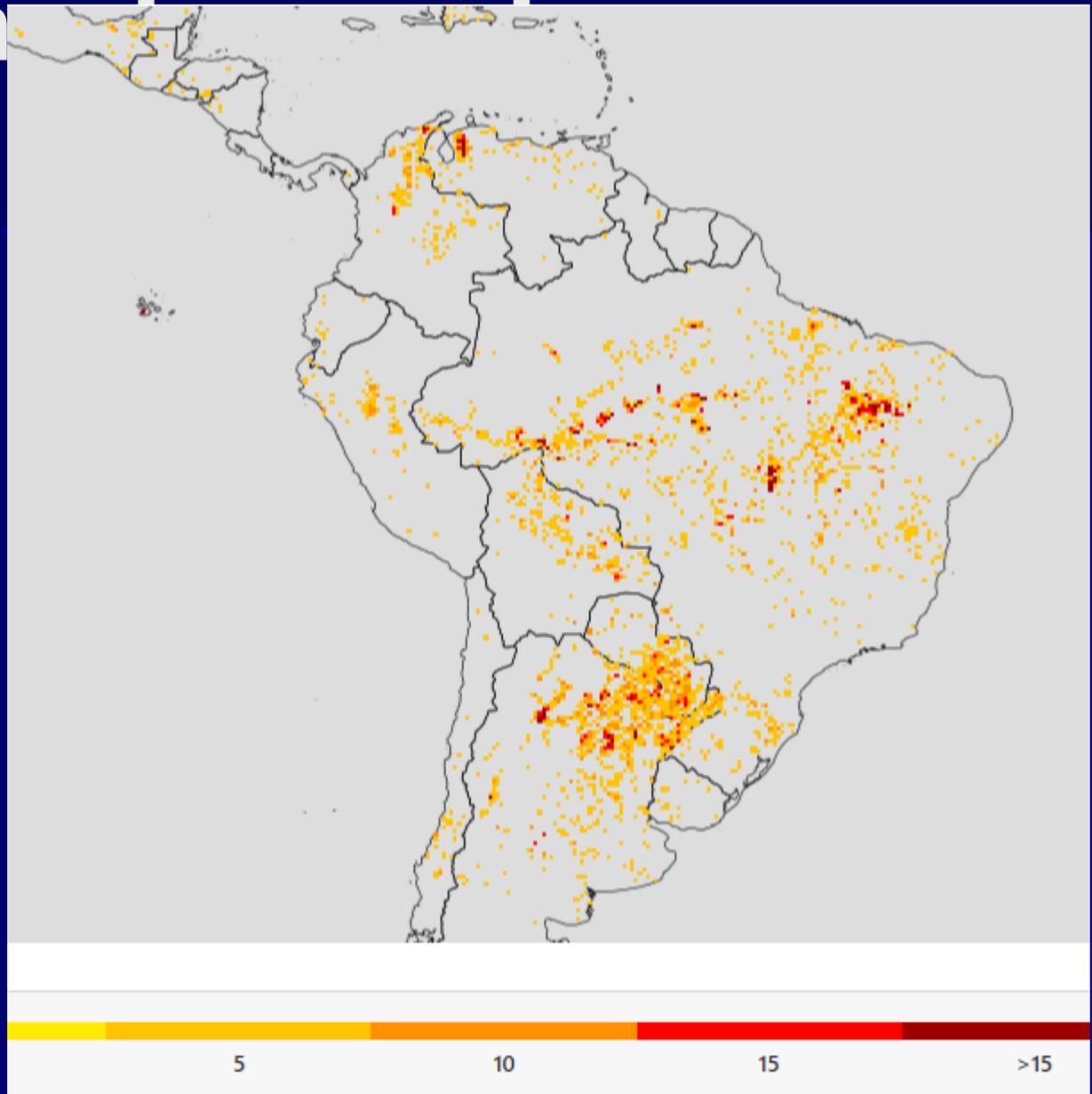
Sensoriamento remoto

- Meteorologia
- Controle de poluentes atmosféricos
- superfícies – muco de solo, focos de queimadas, produtividade agrícola, áreas alagadas, reservas naturais



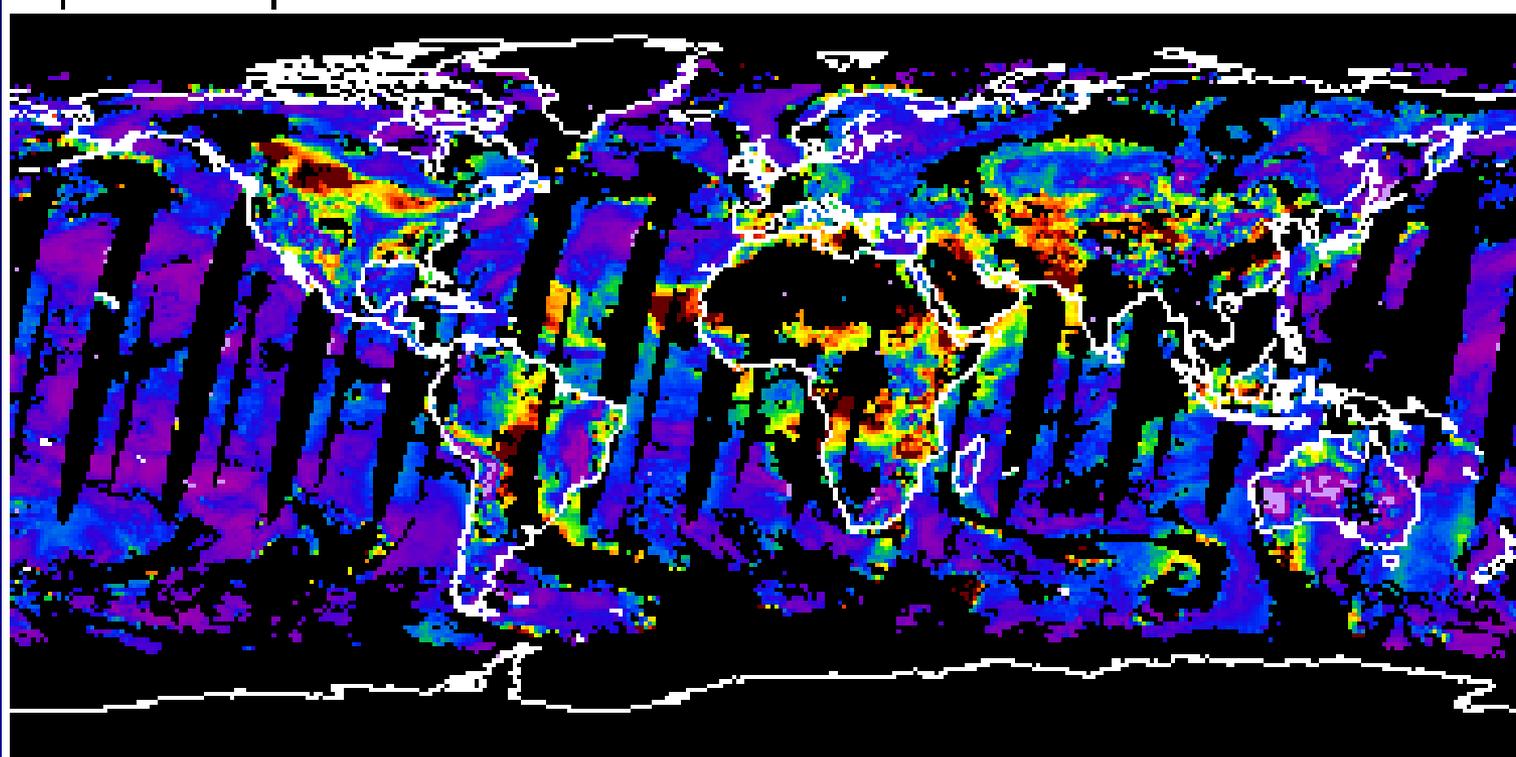
Sensoriam

- superfícies – mudança de solo, focos de queimadas, produtividade agrícola, áreas alagadas, reservas naturais



Optical_Depth_Land_And_Ocean_Mean

07Sep2003



≥ 0.80000

0.600000

0.400000

0.200000

0.00000

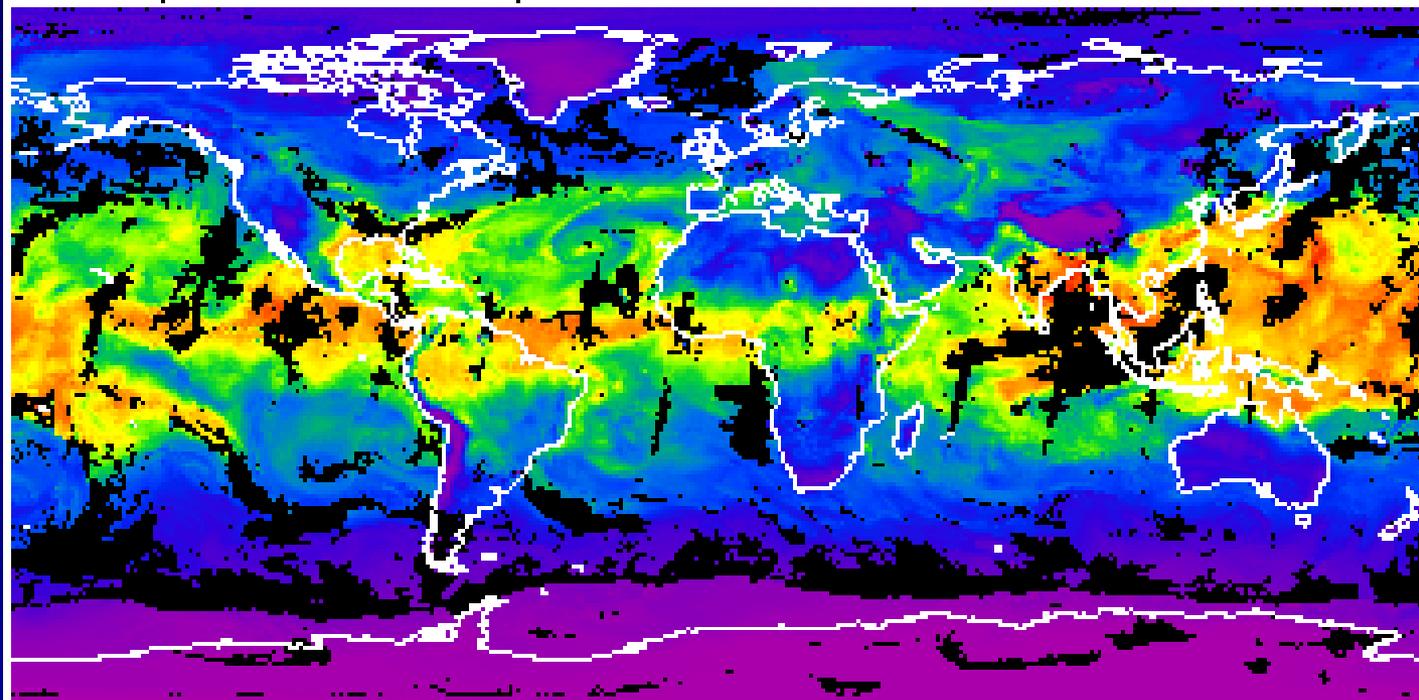
MODIS/Terra

MOD08_D3_A2003250.D04.2003261164425.hdf

name

Atmospheric_Water_Vapor_Mean

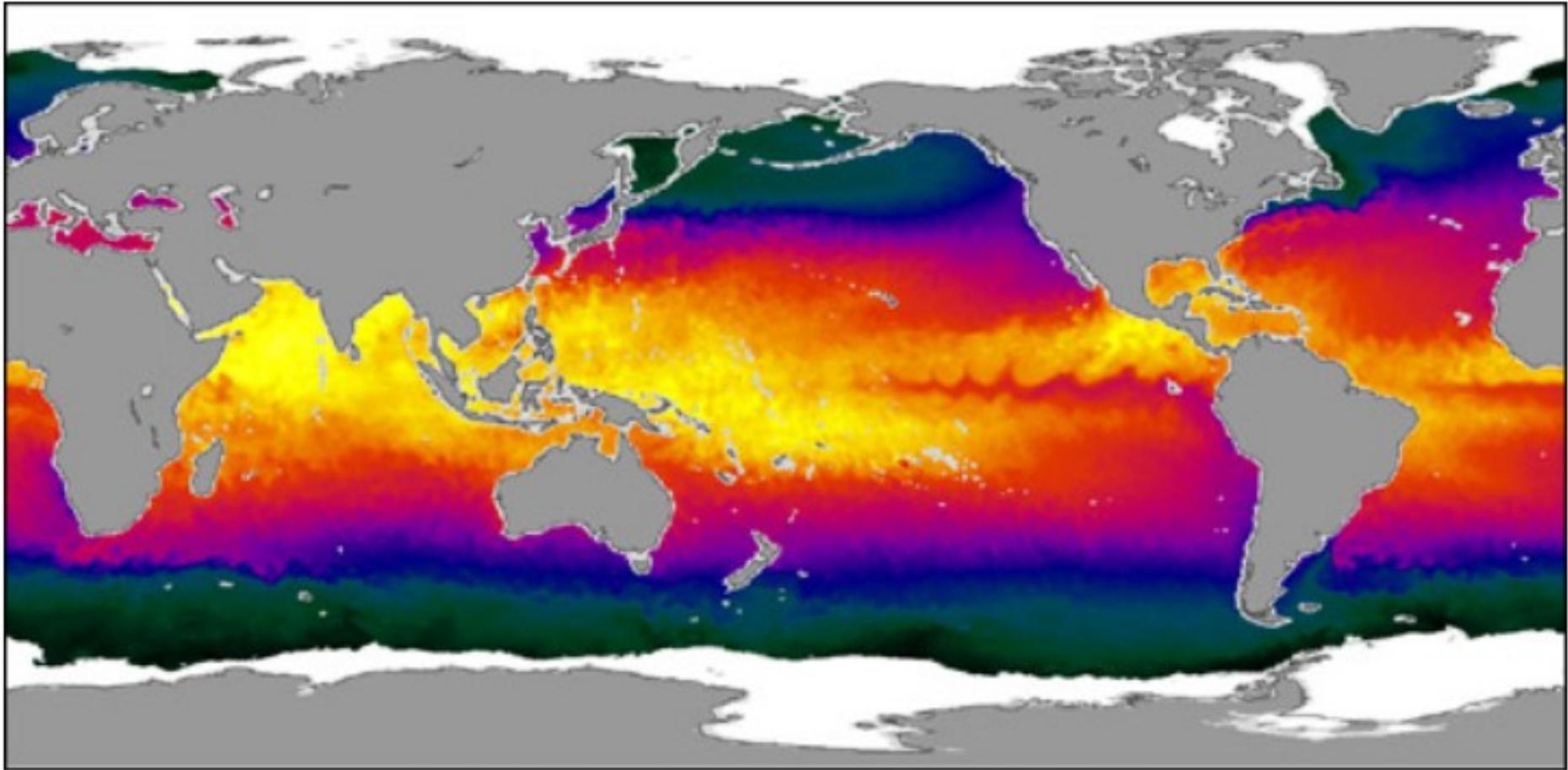
01 Jul 2004



MODIS/Terra

MOD08_D3.A2004183.D04.2004184171925.hdf

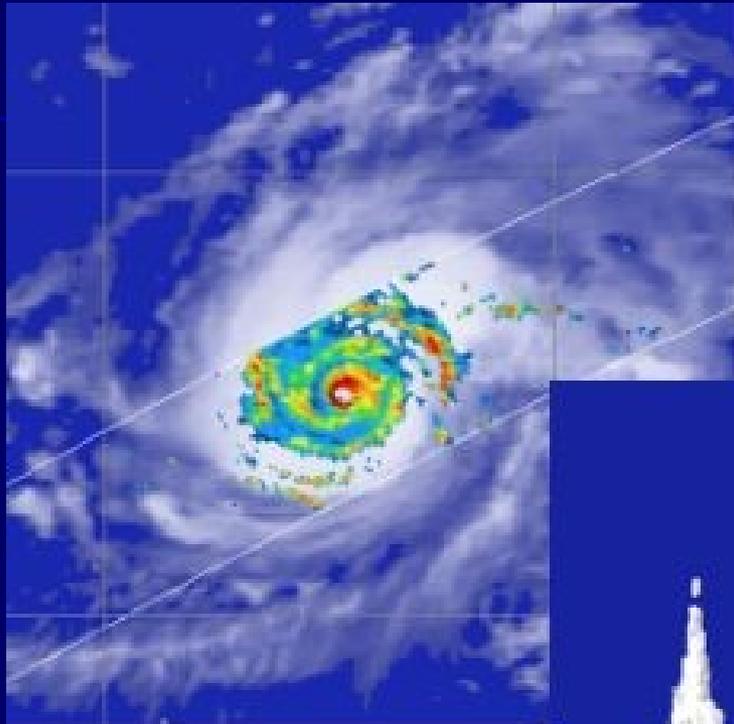
cm



Sea Surface Temperature (degrees Celsius)



<https://earthobservatory.nasa.gov/images/3513/global-sea-surface-temperature-from-amr-e>



◀ Horizontal Cross Section
of Rain at 2.0km Height

▽ 3D Rain Structure

