

# Oceanografia por Satélites

Sensor de Cor do Oceano. Aplicação em Medidas de  
Concentração de Clorofila

**Paulo S. Polito, Ph.D.**

**polito@usp.br**

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo  
<http://los.io.usp.br>  
Laboratório de Oceanografia por Satélites

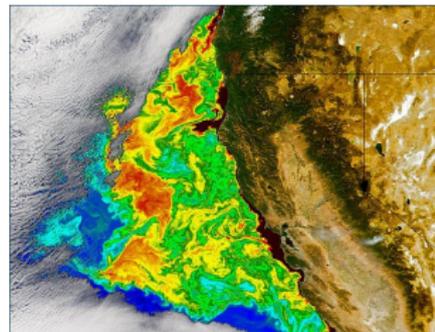
- 1 A Cor dos Oceanos
  - Motivação
  - Teoria
  - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
  - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
  - Pré-Processamento
  - Análises Globais
  - Análises Regionais
  - Análises Multidisciplinares

# Roteiro

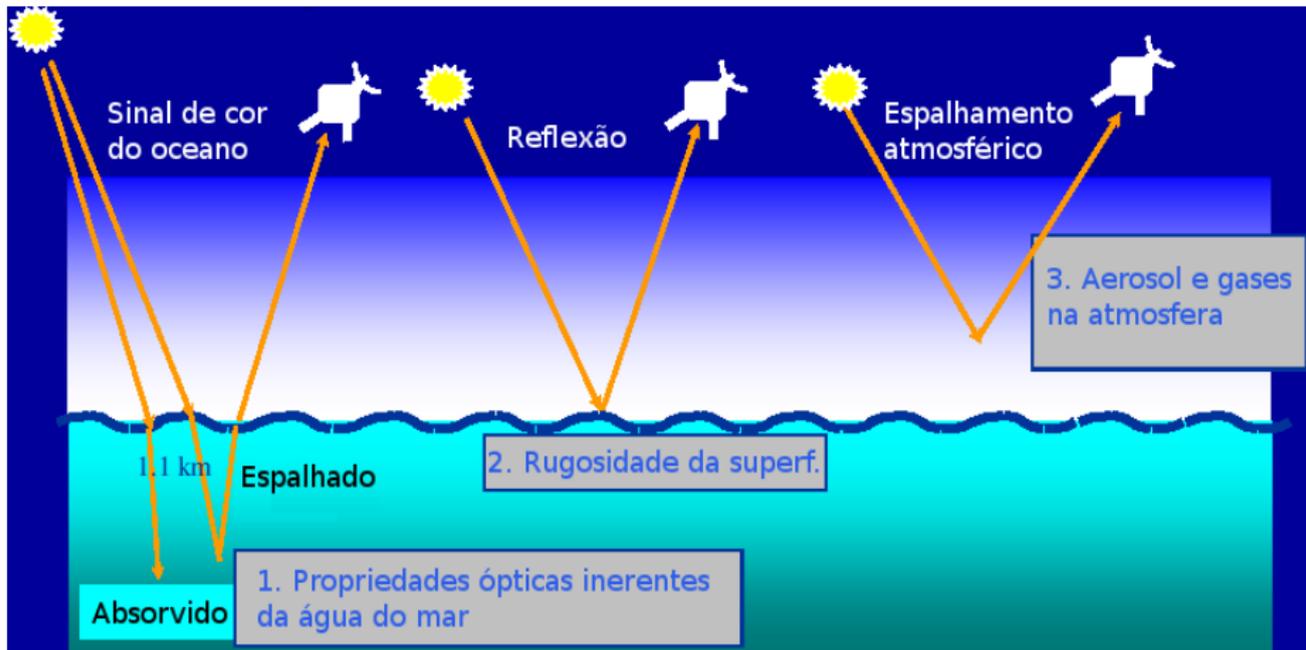
- 1 A Cor dos Oceanos
  - Motivação
  - Teoria
  - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
  - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
  - Pré-Processamento
  - Análises Globais
  - Análises Regionais
  - Análises Multidisciplinares

# Porque Estudar a Cor dos Oceanos

- A quantidade de carbono oceânico é aproximadamente igual à terrestre, porém varia muito mais rápido.
  - A maior parte deste carbono está na forma de fitoplâncton.
  - O fitoplâncton é a base da cadeia alimentar.
- 
- As propriedades ópticas do oceano são controladas pela concentração de: fitoplâncton, bactérias e subprodutos.
  - Variações das propriedades ópticas modificam a distribuição espectral da luz, modificam a cor da água.



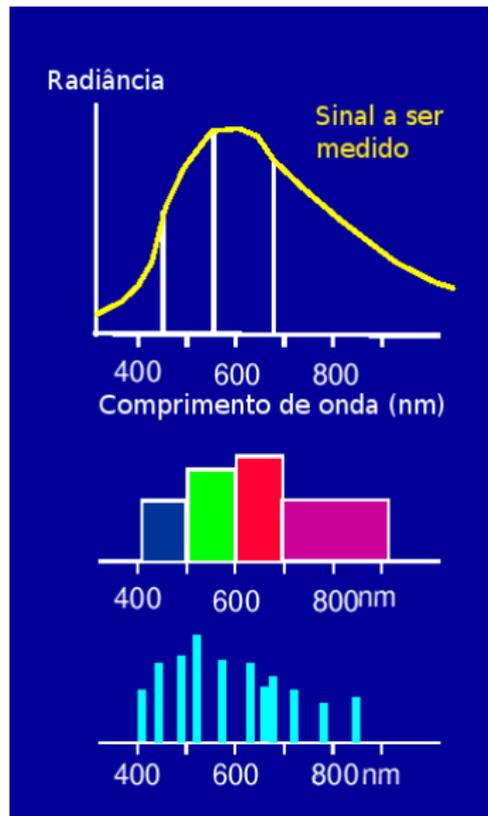
# Sensoriamento Remoto da Cor dos Oceanos



Processos 1, 2 e 3 são dependentes do comprimento de onda.

# Extraindo Informações de Cor

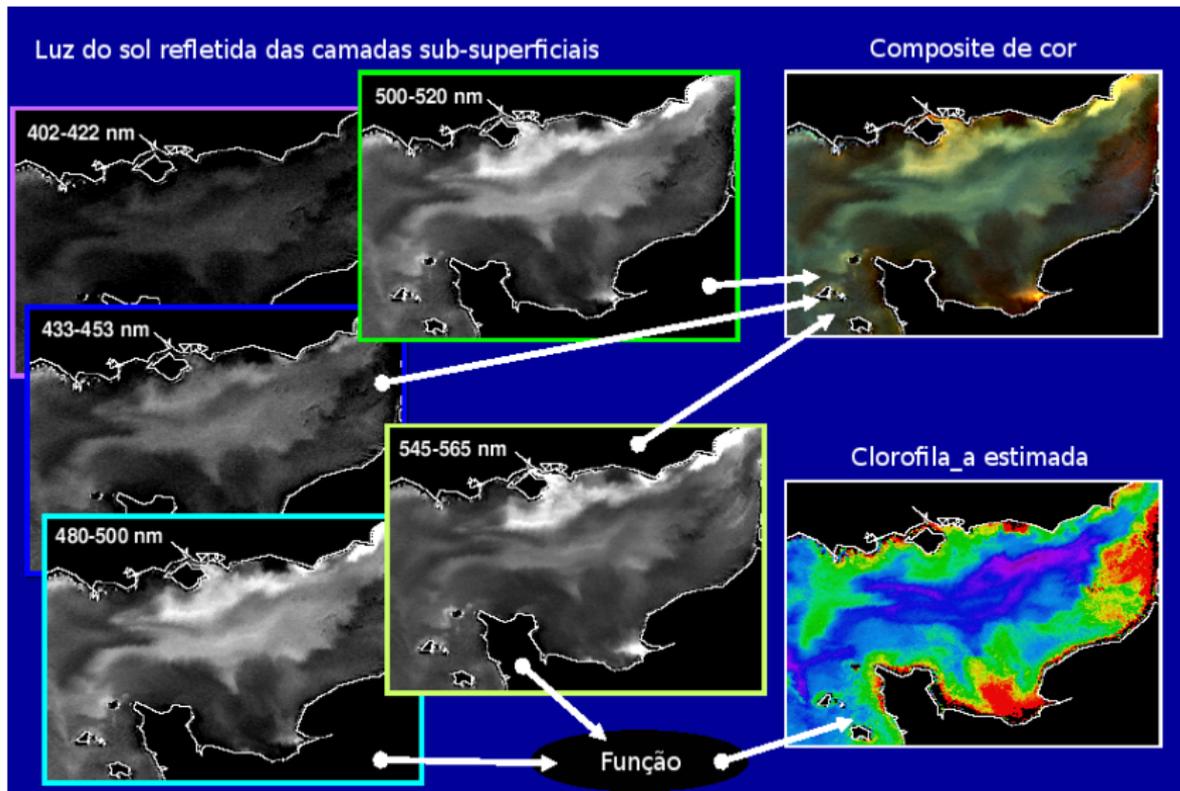
- A cor se manifesta como uma distribuição espectral contínua da luz visível;
- O olho humano detecta 3 bandas definidas por 3 funções espectrais;
- Para o sensor, a "cor" é simplesmente o conjunto de valores medidos em diferentes bandas ou **canais**;
- Pode ser definida em poucas bandas largas ou em muitas bandas finas.



# Capacidade de Definição de Cores de Diferentes Sensores

Sensor	Número de Canais	Característica do canal
Olho humano	3	sobrepostas
Landsat	4	bandas largas, contíguas
CZCS	4	Estreita, visível
SeaWiFS	8	Estreita, separada, Vis. e IR próximo
MERIS	13	Estreita, Vis. e IR próximo
MODIS	9	Estreita, Vis. e IR próximo
CASI	64	Espectrômetro

# Extraindo a Informação de Clorofila da Cor



# O que Influi na Luz no Oceano?

Luz que **entra no oceano**:

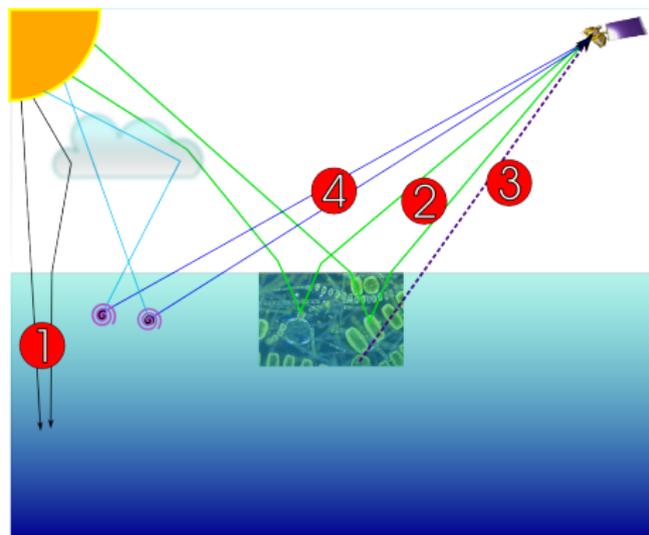
- Solar;
- Espalhada: atmosfera, nuvens.

Luz **dentro do oceano**:

- Absorvida (1);
- Espalhada (2);
- Emitida por fluorescência (3);
- Efeito Raman (4).

Luz que **sai do oceano**:

- Fótons espalhados numa determinada direção;
- Muda a distribuição dos comprimentos de ondas.



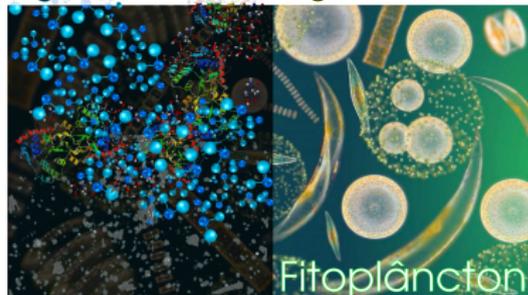
# Matéria Colorida no Oceano

- Fitoplâncton e seus pigmentos:
  - **clorofila a**, b e c;
  - carotenóides fotossensíveis e foroprotetores;
  - ficoeritrina.
- Matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), *gelbstoff*:
  - substâncias húmicas;
  - folhagem continental morta;
  - fitoplâncton em decomposição.
- Matéria particulada em suspensão:
  - Detritos, fragmentos de células, pelotas fecais, matéria orgânica.
  - Areia, sedimentos e poeira continental
    - deposição fluvial;
    - deposição eólica e pluvial;
    - ressuspensão turbulenta.

# Absorção e Espalhamento

- A cor depende da combinação de absorção ( $a$ ) e espalhamento ( $b$ ) do meio. Reflectância é  $R = 0.33 \frac{b}{a}$ .
- **Absorção ( $a$ )** é causada por:
  - Fitoplâncton ( $a_c$ );
  - Moléculas de água ( $a_w$ ).
  - Matéria orgânica dissolvida ( $a_y$ ).
- **Retroespalhamento ( $b$ )** é causado por:
  - Fitoplâncton ( $b_c$ );
  - Matéria particulada em suspensão ( $b_s$ );
  - Moléculas de água ( $b_w$ ).

Água    Matéria Orgânica

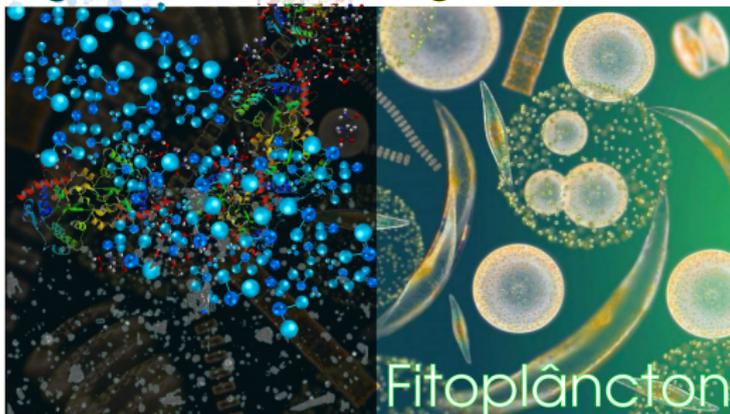


Partículas

- Cada  $a_x$  ou  $b_x$  tem sua forma espectral particular, portanto a cor depende da concentração destas componentes da água que interagem com a luz.

# Propriedades Ópticas Inerentes

Água    Matéria Orgânica



Partículas

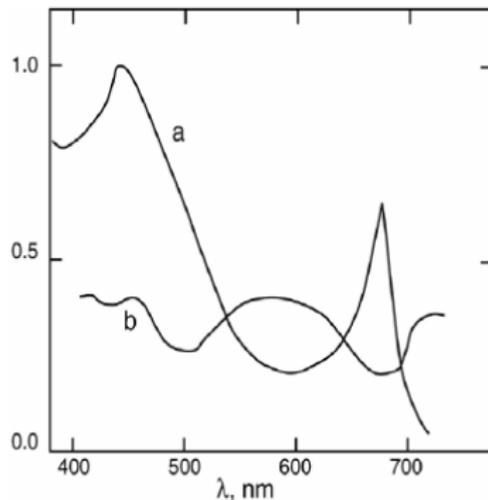
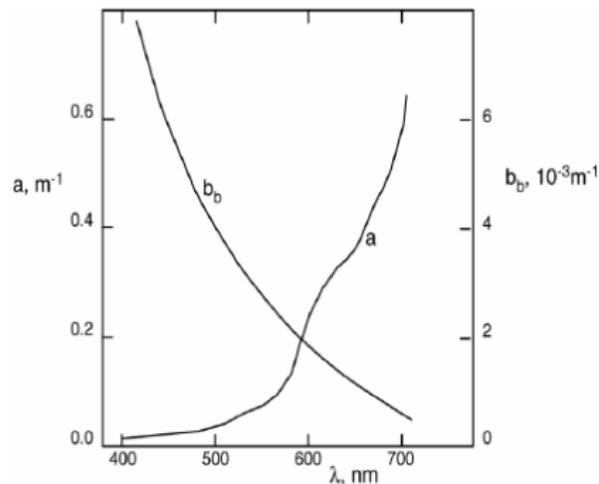
- Podemos modelar a absorção e o espalhamento como uma soma desses fatores, ponderada pela concentração:

$$a = a_w + C_c a_c + C_o a_o + C_p a_p \quad b = b_w + C_c b_c + C_p b_p$$

# Propriedades Ópticas Aparentes

- Instrumentos in-situ medem as **Propriedades Ópticas Inerentes**.
- Instrumentos a bordo de satélites medem as **Propriedades Ópticas Aparentes**.
- Duas diferenças fundamentais:
  - Influência da atmosfera
    - Posição do Sol;
    - Estado do mar;
    - Condições da atmosfera.
  - Influência da água acima do espalhador
    - Superfície não exatamente Lambertiana;
    - Refletância depende de  $\lambda$  e de  $z$ ;
    - Atenuação depende de  $\lambda$  e de  $z$ ;
    - **Qual o valor de  $z$  ?**

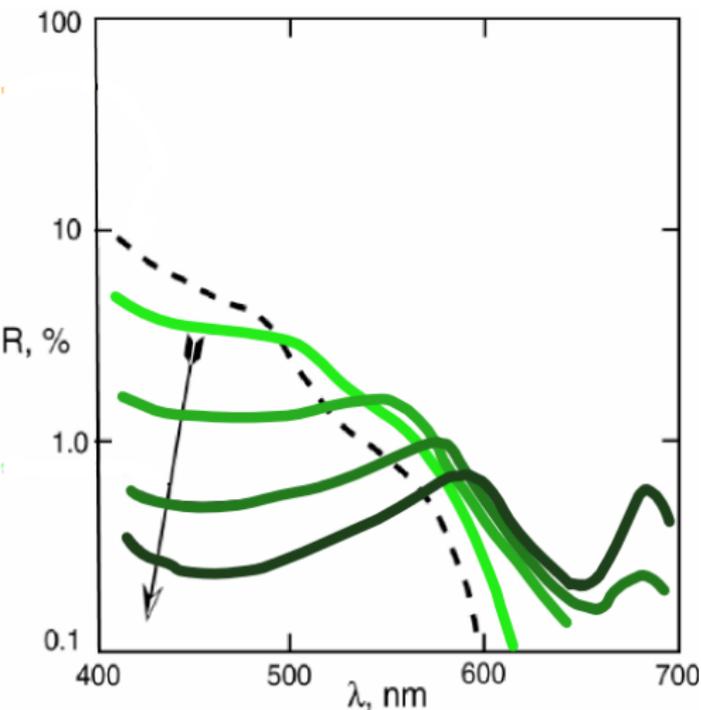
# Variação Espectral de $a$ e $b$ da Luz no Mar



Água do mar: luz azul tem alto espalhamento ( $b_b$ ). Absorção ( $a$ ) aumenta com  $\lambda$ , i.e. luz vermelha é absorvida antes de ser espalhada:  $\rightsquigarrow$  cor azul do mar.

Valores relativos para a clorofila: espalhamento pelas células é pequeno e uniforme.

# Espectro de Reflectância



- Linha pontilhada: espectro para água do mar pura.
  - Curvas contínuas: diversas concentrações de clorofila.
- 
- R varia para diferentes espécies de clorofila mas sua forma espectral e variação com a concentração são similares.
  - Os algoritmos de clorofila são baseados em razões espectrais e não somente na sua reflectância.

# Variáveis Medidas Através da Cor do Oceano

Clorofila, substância amarela e carga de sedimentos.

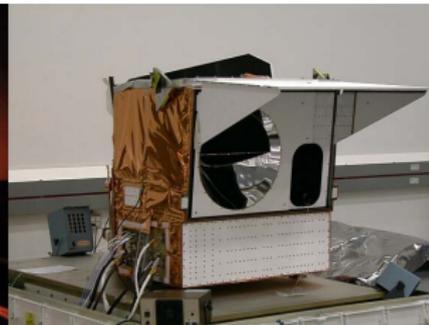
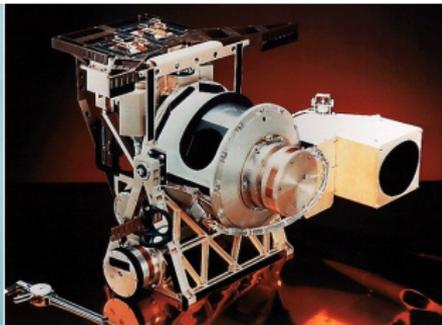
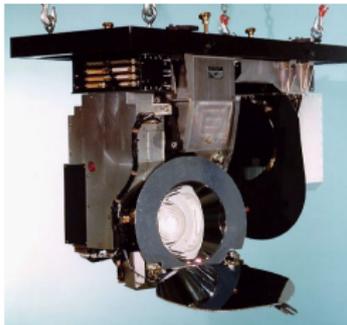
Na prática:

- Difícil de distingui-los independentemente;
- **Caso 1:** Águas onde a população de fitoplânctons domina as propriedades ópticas (oceano profundo);
- **Caso 2:** Águas onde outros fatores como DOM e sedimentos em suspensão estão presentes (região costeira).
- Medidas em águas do Caso 1 são melhores utilizando-se um algoritmo para clorofila da forma:  $C = A(R_{550}/R_{490})^B$ ;
- Precisão de  $\pm 30\%$  na determinação de C para oceano aberto;
- Dados obtidos em águas do Caso 2 são difíceis de analisar.



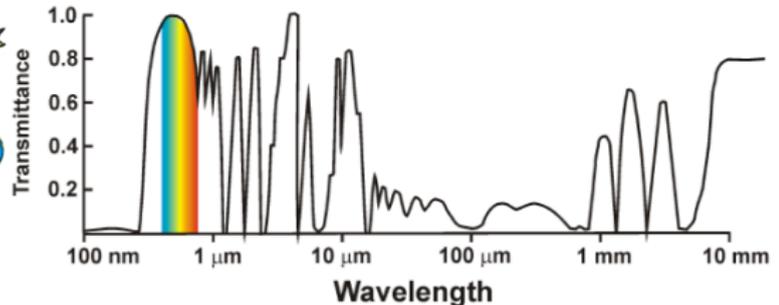
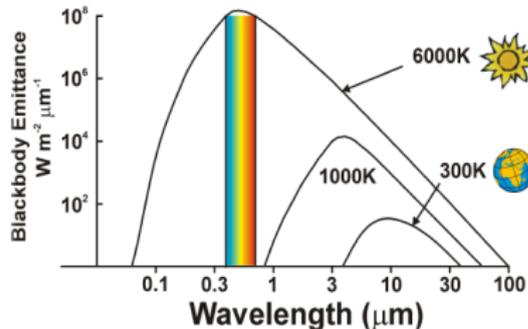
# Principais Sensores de Clorofila

Instr.	Ano	Canais.	Resol. km	Órbita km
CZCS	1978/86	6*	1/18.5	~polar
SeaWiFS	1997	8	1/4.5	~polar
MODIS Terra	1999	36	1*/4	~polar
MODIS Aqua	2002	36	1*/4	~polar
VIIRS	2011	22	0.75	~polar



# Bandas Utilizadas

- Os sensores são passivos e operam na faixa do visível e IV.
- A luz solar é parcialmente refletida na superfície e seletivamente absorvida e espalhada pelo fitoplâncton.



- As nuvens **não são transparentes** nestas bandas.
- Correção atmosférica é necessária.

# Bandas Utilizadas

Bandas espectrais para importantes sensores de cor

Bandas em comum para a maioria dos sensores

440 nm

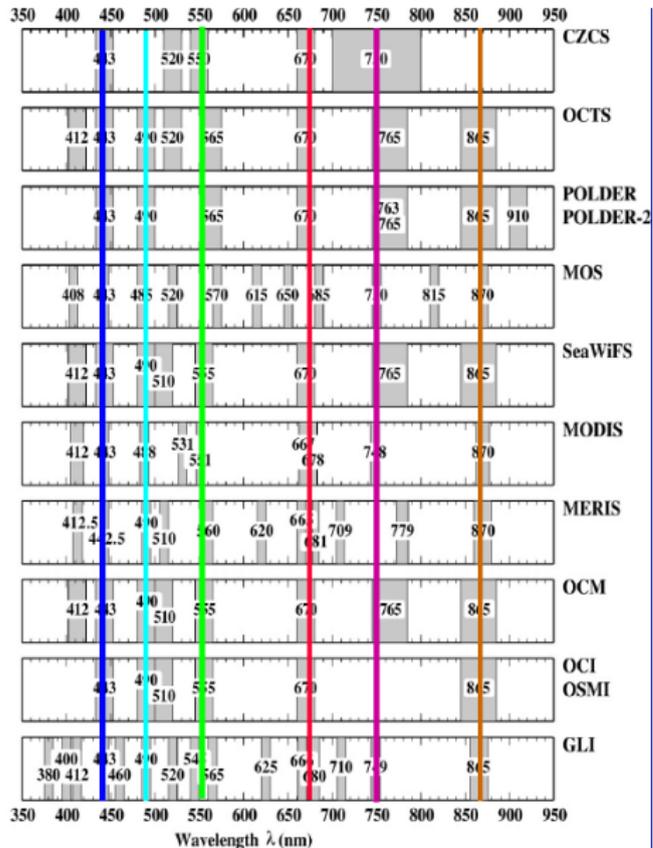
490 nm

550-565 nm

670 nm

750 nm

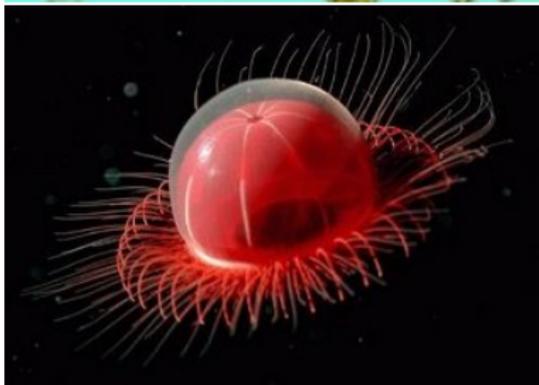
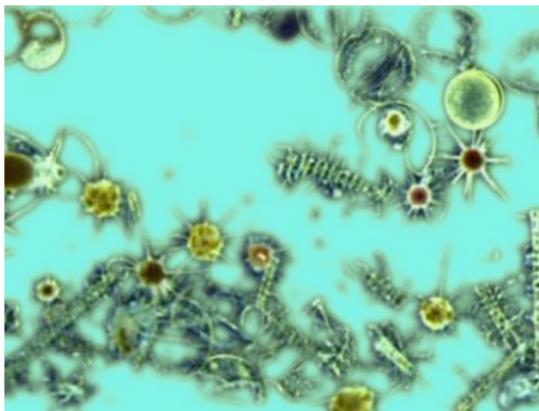
870 nm



# Roteiro

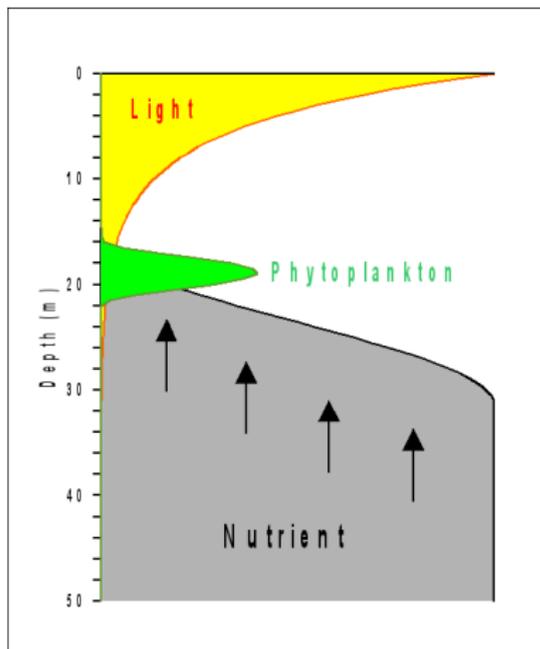
- 1 A Cor dos Oceanos
  - Motivação
  - Teoria
  - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
  - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
  - Pré-Processamento
  - Análises Globais
  - Análises Regionais
  - Análises Multidisciplinares

# Vida na Zona Eufótica e Abaixo



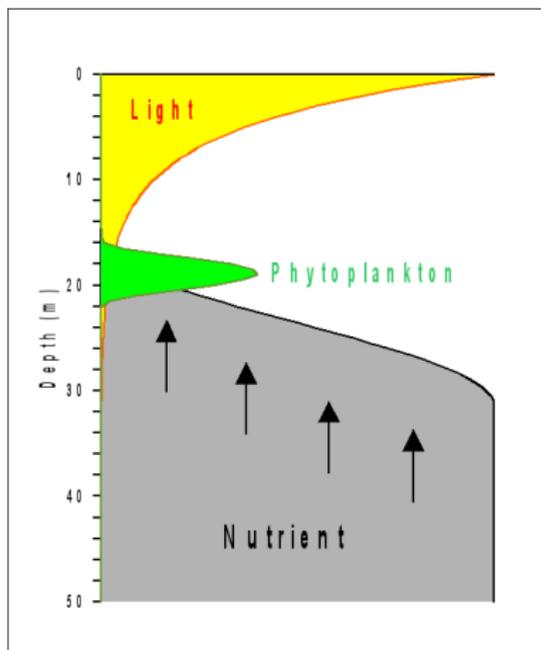
- Zona Eufótica: profundidade onde há luz.
- Algas precisam de luz e nutrientes:  $PO_4$ ,  $NO_3$ ,  $SiO_4$  e  $Fe$ .
- A ausência de luz caracteriza o oceano profundo.
- Em águas costeiras a zona eufótica tem apenas O(1- 10 m), devido à turbidez e à abundância de microorganismos.
- Em águas profundas a zona eufótica chega a O(10- 100 m), dependendo da abundância das algas.

# Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



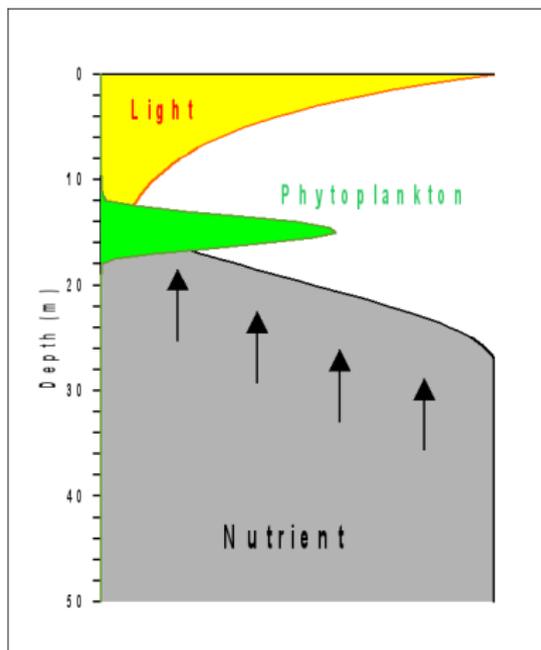
- Em camadas mais profundas do oceano, o crescimento do fitoplâncton é **limitado pela luz**;
- Ocorrência de concentração suficiente de nutrientes ( $\text{PO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SiO}_4$  e Fe) é um fator importante para a fotossíntese;
- Em oceanos estratificados, os nutrientes são consumidos pelo fitoplâncton nas camadas superiores.
- Portanto, próximo à superfície o crescimento de fitoplâncton é **limitado pelos nutrientes**.

# Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



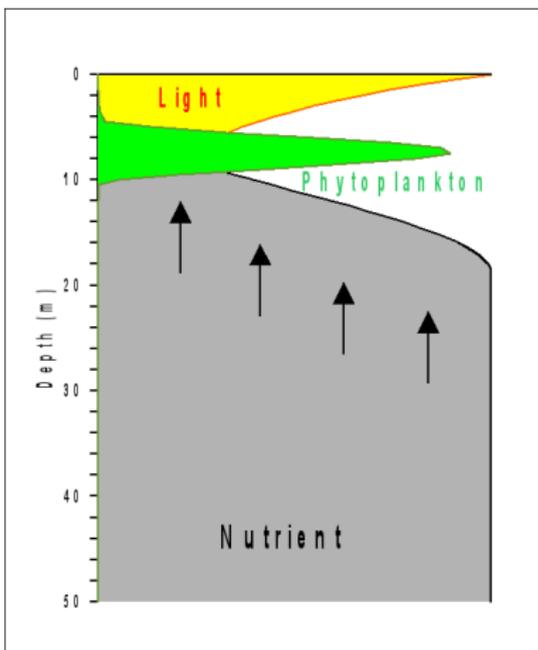
- Portanto, o crescimento do fitoplâncton ocorre nas camadas onde há suficiente
  - concentração de nutrientes e
  - luz.
- Com o aumento do fluxo de nutrientes para cima, as condições para o crescimento do fitoplâncton se tornam mais favoráveis.
- O máximo da distribuição vertical de fitoplâncton se move verticalmente para camadas mais rasas.

# Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



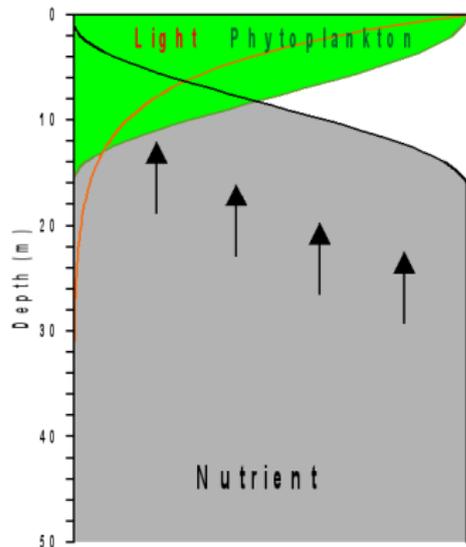
- Portanto, o crescimento do fitoplâncton ocorre nas camadas onde há suficiente
  - concentração de nutrientes e
  - luz.
- Com o aumento do fluxo de nutrientes para cima, as condições para o crescimento do fitoplâncton se tornam mais favoráveis.
- O máximo da distribuição vertical de fitoplâncton se move verticalmente para camadas mais rasas.

# Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



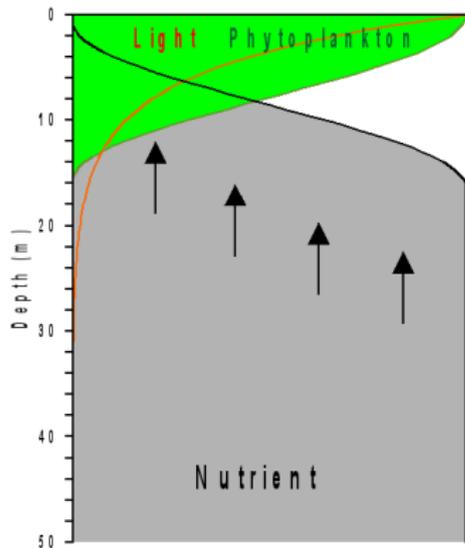
- Portanto, o crescimento do fitoplâncton ocorre nas camadas onde há suficiente
  - concentração de nutrientes e
  - luz.
- Com o aumento do fluxo de nutrientes para cima, as condições para o crescimento do fitoplâncton se tornam mais favoráveis.
- O máximo da distribuição vertical de fitoplâncton se move verticalmente para camadas mais rasas.

# Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



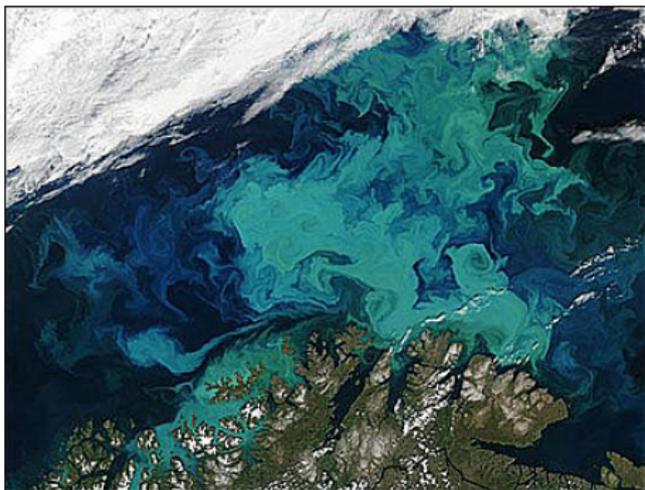
- Quando o fluxo de nutrientes for suficientemente intenso e a biomassa fitoplanctônica for alta, o máximo da distribuição de fitoplâncton ocorrerá bem próximo à superfície.
- O resultado é uma correlação direta entre a concentração total de fitoplâncton (ou clorofila) na coluna d'água (ou da camada eufótica) e a da fina camada superficial.

# Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



- Portanto, ambas, a concentração da clorofila de superfície e a concentração da clorofila acima da profundidade de penetração, podem ser usadas como uma medida da produtividade marinha, ou seja, a biomassa fitoplanctônica.

# Acesso aos Dados



O acesso aos dados é facilitado pelo software SeaDAS que permite a visualização e o processamento de imagens de clorofila. Este software é gratuito e funciona em vários Sistemas Operacionais.

- (CZCS) <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/CZCS/>
- (SeaWiFS) <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>
- (MODIS) <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>

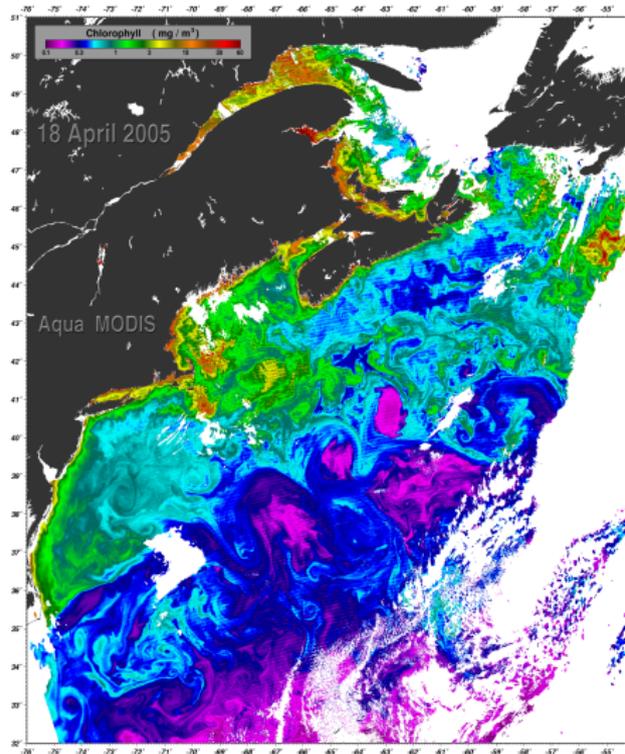


# Roteiro

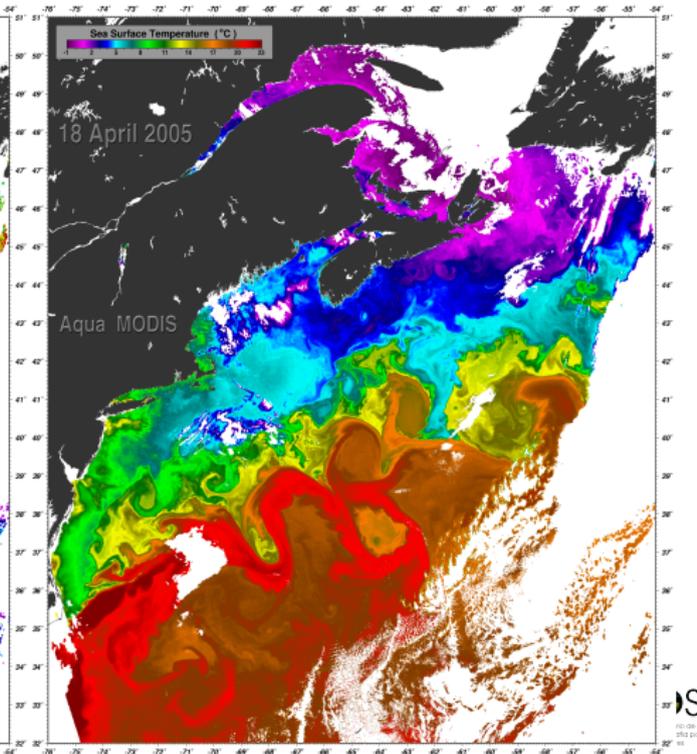
- 1 A Cor dos Oceanos
  - Motivação
  - Teoria
  - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
  - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
  - Pré-Processamento
  - Análises Globais
  - Análises Regionais
  - Análises Multidisciplinares

# Nuvens são Detectadas no IV

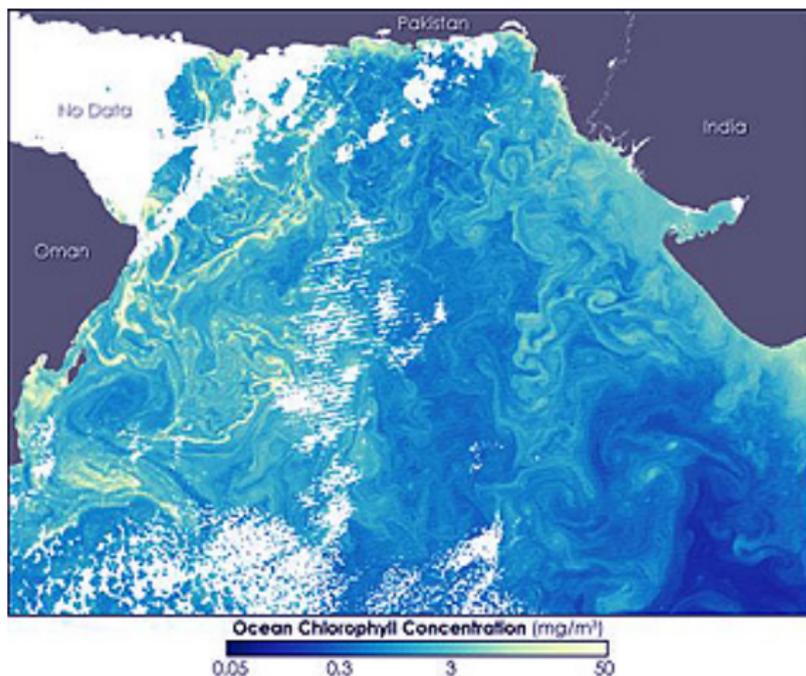
## Clorofila



## Temperatura



# Detecção e Remoção das Áreas Nubladas



- É melhor não ter dados que ter dados contaminados.
- É feita a detecção de nuvens por
  - $T_b$  muito alta;
  - expansão por algoritmo de erosão;
  - estatística regional bimodal;
  - comparação com imagem prévia e posterior.

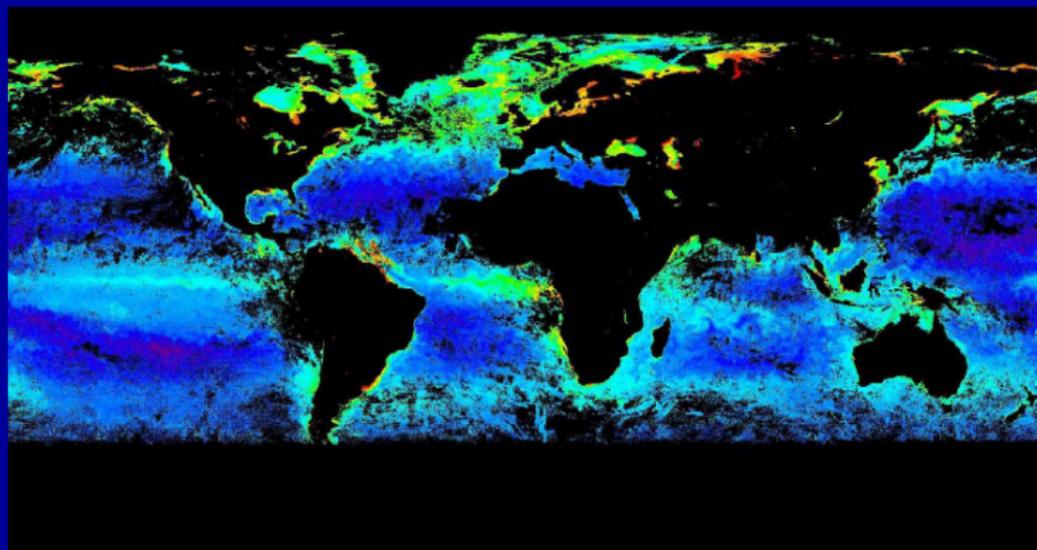
# Disponibilidade de Dados

Os dados disponíveis do CZCS e SeaWiFS são de concentração clorofila e TSM\*. O site do MODIS disponibiliza:

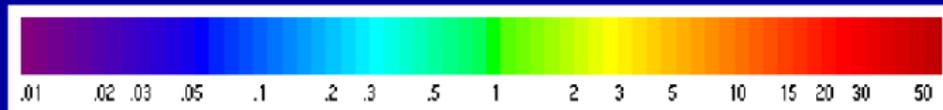
- MOD 18 - Normalized Water-leaving Radiance
- MOD 19 - Pigment Concentration
- MOD 20 - Chlorophyll Fluorescence
- MOD 21 - Chlorophyll<sub>a</sub> Pigment Concentration
- MOD 22 - Photosynthetically Available Radiation (PAR)
- MOD 23 - Suspended-Solids Concentration
- MOD 24 - Organic Matter Concentration
- MOD 25 - Coccolith Concentration
- MOD 26 - Ocean Water Attenuation Coefficient
- MOD 27 - Ocean Primary Productivity
- MOD 28 - Sea Surface Temperature
- MOD 36 - Total Absorption Coefficient

# Aplicações: Distribuição de clorofila global

Composite de 8 dias da distribuição global de Clorofila<sub>a</sub> medido pelo SeaWiFS

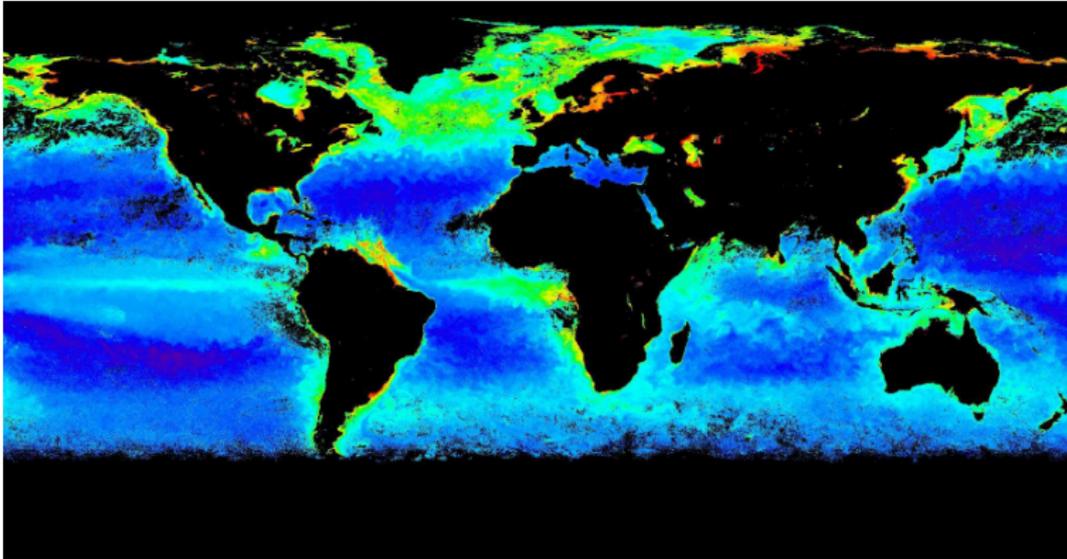


12 a 19 de Julho de 2001. Escala em mg/m<sup>3</sup> Clo-a

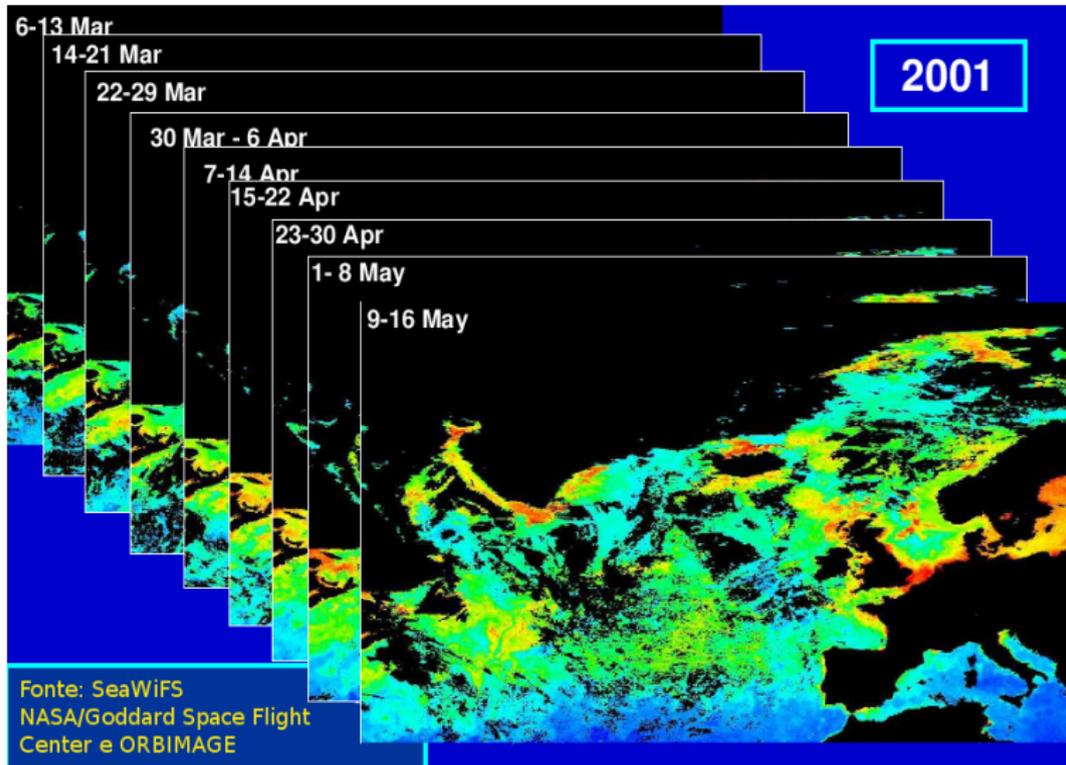


# Aplicações: Distribuição de clorofila global

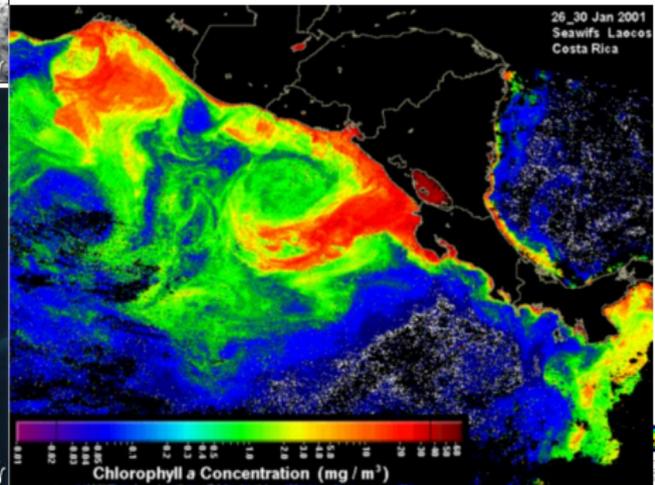
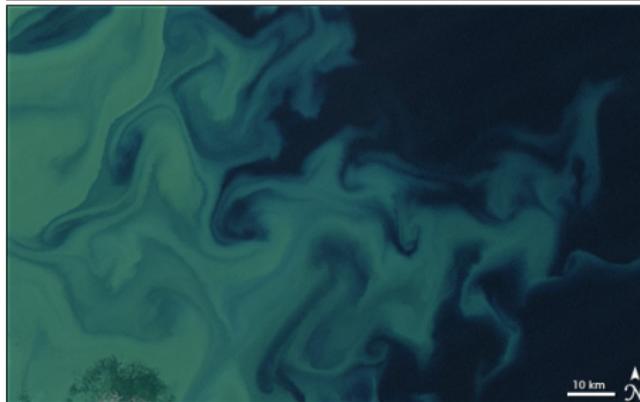
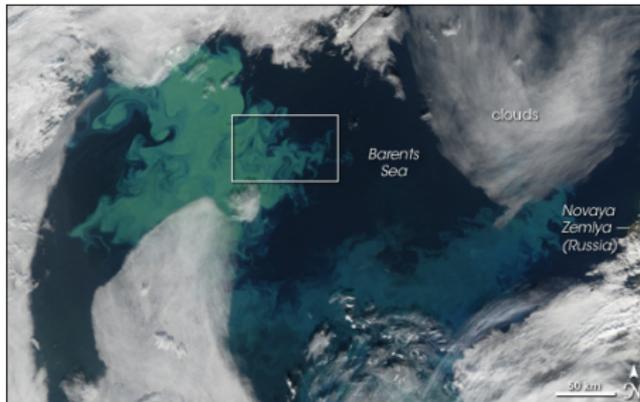
Composite para Julho de 2001 da distribuição global de Clorofila<sub>a</sub> medido pelo SeaWiFS



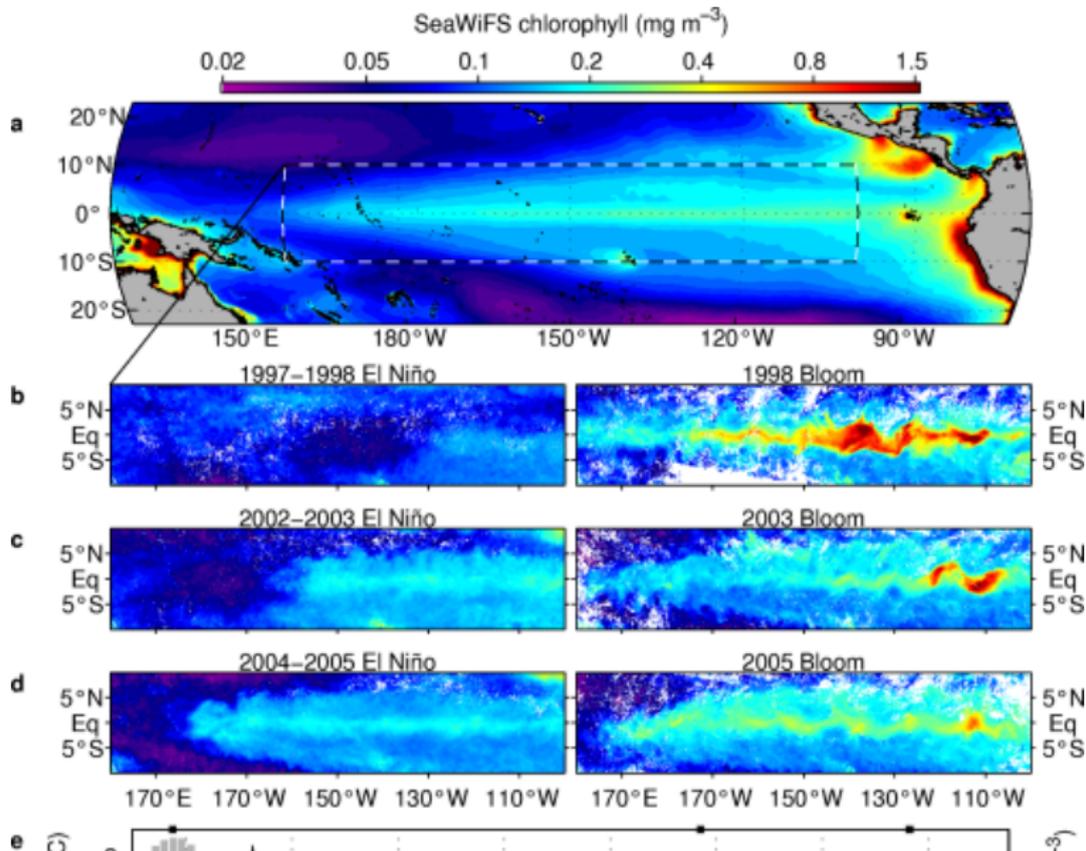
# Aplicações: Monitoramento de Blooms



# Aplicações: Ressurgência e Cocolitoforídeos



# Aplicações: Blooms de Fitoplâncton



# Conclusões Sobre Cor dos Oceanos

- O desenvolvimento dos métodos de determinação de variáveis de interesse biogeoquímico a partir da cor dos oceanos ainda não atingiu os mesmos níveis que outros sensores.
- Isto é devido à dificuldade inerente de se medir cor com precisão e confiabilidade num ambiente tri-dimensional semi-transparente.
- **A riqueza de informação relacionada com a cor dos oceanos apresenta um grande potencial científico e um desafio tecnológico.**
- Produtos de cor dos oceanos já começam a ser incorporados em modelos oceânicos regionais e globais.
- O desafio continua...

# Muito Obrigado!

