

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

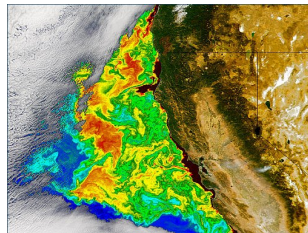
- 1 A Cor dos Oceanos
 - Motivação
 - Teoria
 - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
 - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
 - Pré-Processamento
 - Análises Globais
 - Análises Regionais
 - Análises Multidisciplinares

Roteiro

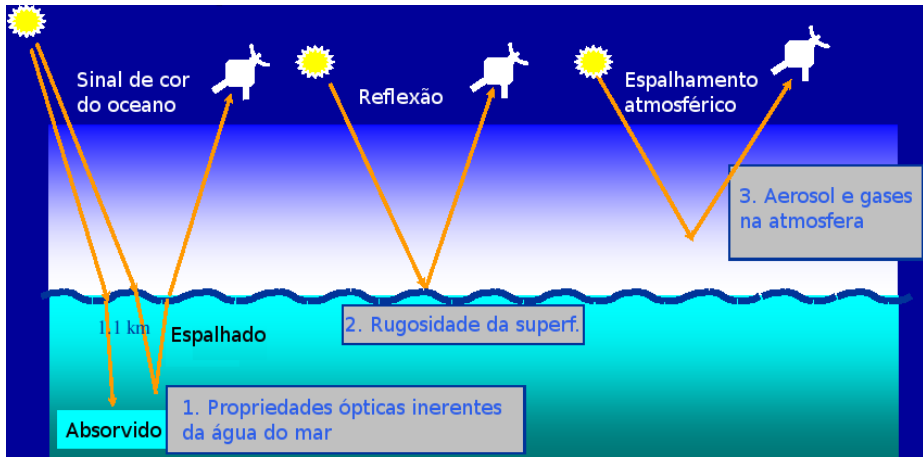
- 1 A Cor dos Oceanos
 - Motivação
 - Teoria
 - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
 - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
 - Pré-Processamento
 - Análises Globais
 - Análises Regionais
 - Análises Multidisciplinares

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.



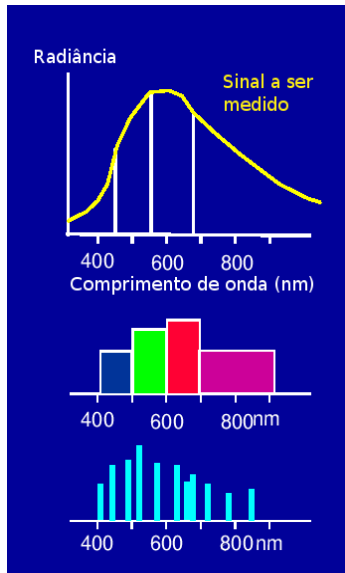
Sensoriamento Remoto da Cor dos Oceanos



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

Extraindo Informações de Cor

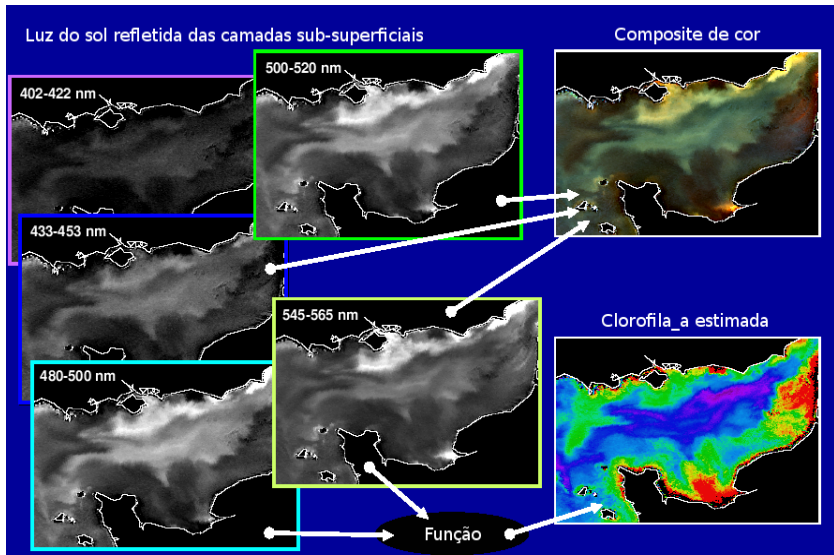
- A cor se manifesta como uma distribuição espectral contínua da luz visível;
- O olho humano detecta 3 bandas definidas por 3 funções espectrais;
- Para o sensor, a "cor" é simplesmente o conjunto de valores medidos em diferentes bandas ou **canais**;
- Pode ser definida em poucas bandas largas ou em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

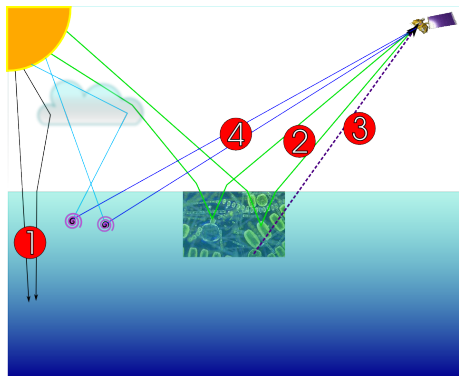
- Solar;
- Espalhada: atmosfera, nuvens.

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.



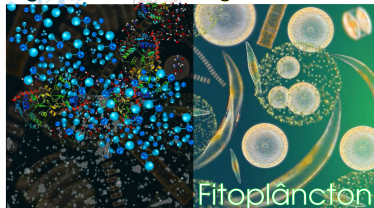
Matéria Colorida no Oceano

- 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

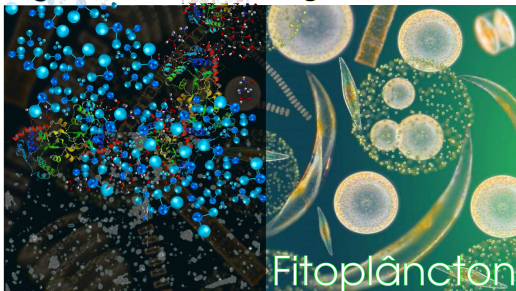


Partículas

- 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

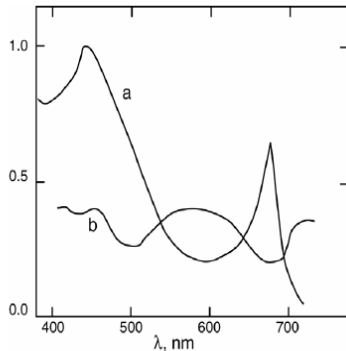
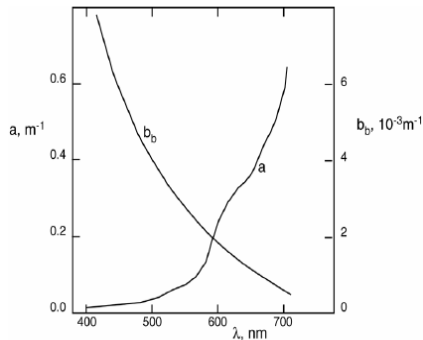
- Podemos modelar a absorção e o espalhamento como uma soma desses fatores, ponderada pela concentração:

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

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 λ e de z ;
 - Atenuação depende de λ e de z ;
 - **Qual o valor de z ?**

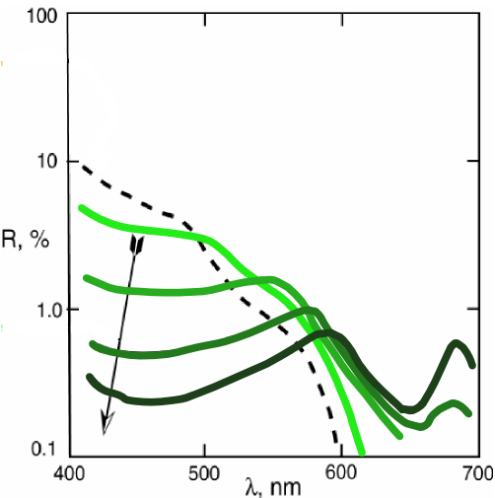
Variação Espectral de a e b da Luz no Mar



Água do mar: luz azul tem alto espalhamento (b_b). Absorção (a) aumenta com λ , 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.

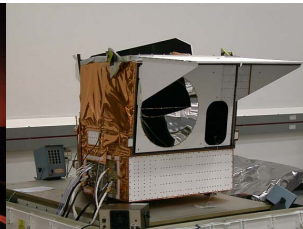
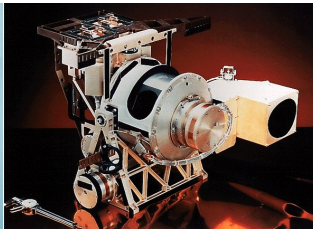
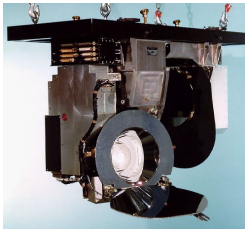
Na prática:

- 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.



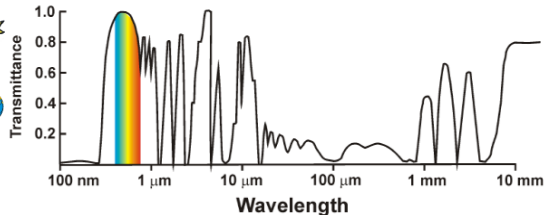
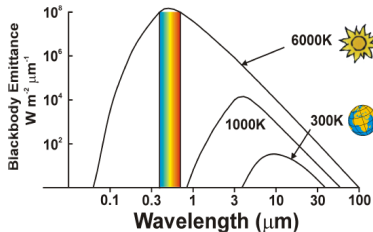
Principais Sensores de Clorofila

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

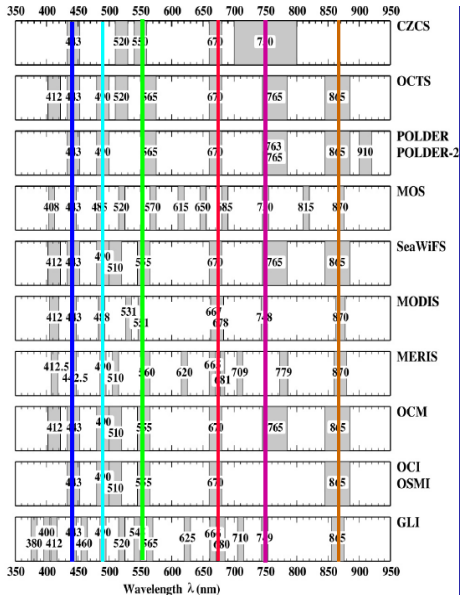
490 nm

550-565 nm

670 nm

750 nm

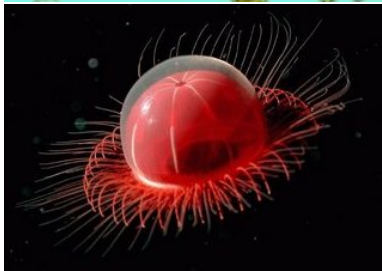
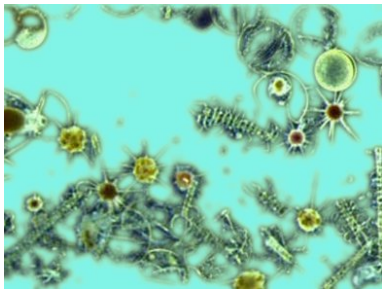
870 nm



Roteiro

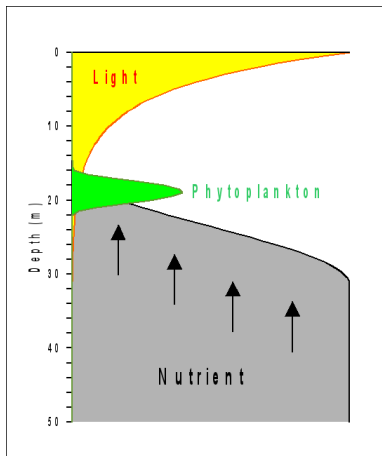
- 1 A Cor dos Oceanos
 - Motivação
 - Teoria
 - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
 - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
 - Pré-Processamento
 - Análises Globais
 - Análises Regionais
 - Análises Multidisciplinares

Vida na Zona Eufótica e Abaixo



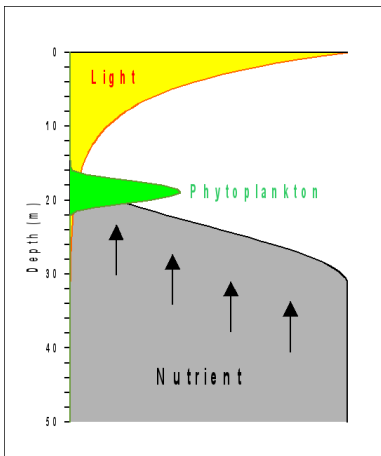
- Zona Eufótica: profundidade onde há luz.
- Algas precisam de luz e nutrientes: PO_4 , NO_3 , SiO_4 e Fe .
- A ausência de luz caracteriza o oceano profundo.
- Em águas costeiras a zona eufótica tem apenas 0(1- 10 m), devido à turbidez e à abundância de microorganismos.
- Em águas profundas a zona eufótica chega a 0(10- 100 m), dependendo da abundância das algas.

Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



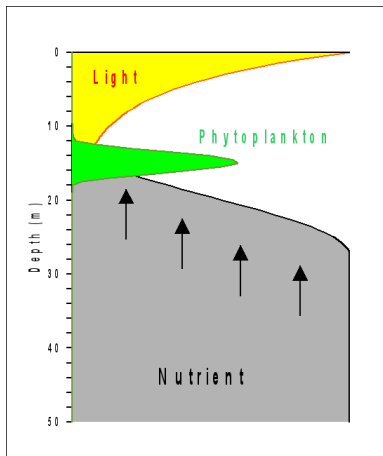
- Em camadas mais profundas do oceano, o crescimento do fitoplâncton é **limitado pela luz**;
- Ocorrência de concentração suficiente de nutrientes (PO_4 , NO_3 , SiO_4 e Fe) é um fator importante para a fotossíntese;
- Em oceanos estratificados, os nutrientes são consumidos pelo fitoplâncton nas camadas superiores.
- Portanto, próximo à superfície o crescimento de fitoplâncton é **limitado pelos nutrientes**.

Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



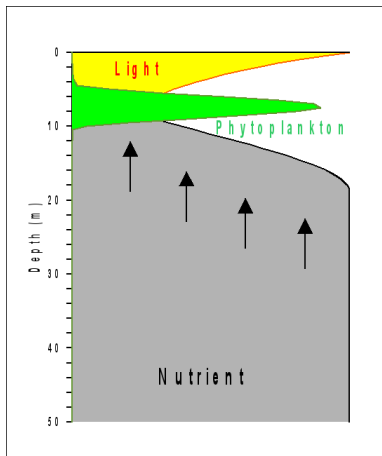
- Portanto, o crescimento do fitoplâncton ocorre nas camadas onde há suficiente
 - concentração de nutrientes e
 - luz.
- Com o aumento do fluxo de nutrientes para cima, as condições para o crescimento do fitoplâncton se tornam mais favoráveis.
- O máximo da distribuição vertical de fitoplâncton se move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

Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



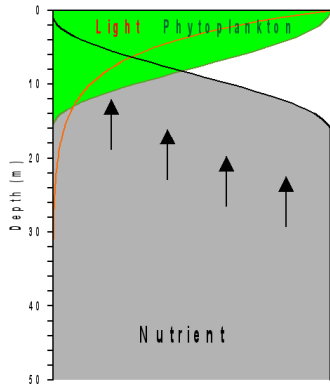
- Portanto, o crescimento do fitoplâncton ocorre nas camadas onde há suficiente
 - concentração de nutrientes e
 - luz.
- Com o aumento do fluxo de nutrientes para cima, as condições para o crescimento do fitoplâncton se tornam mais favoráveis.
- O máximo da distribuição vertical de fitoplâncton se move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

Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



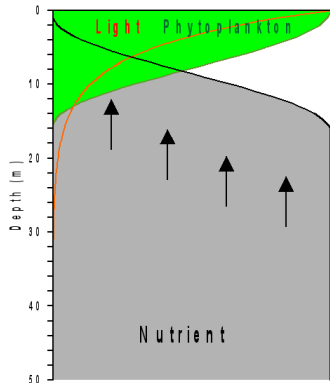
- Portanto, o crescimento do fitoplâncton ocorre nas camadas onde há suficiente
 - concentração de nutrientes e
 - luz.
- Com o aumento do fluxo de nutrientes para cima, as condições para o crescimento do fitoplâncton se tornam mais favoráveis.
- O máximo da distribuição vertical de fitoplâncton se move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

Distribuição Vertical de Fitoplâncton no Oceano



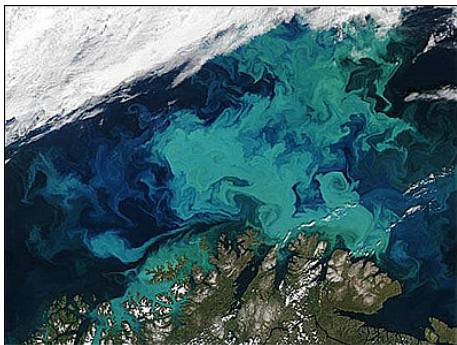
- Quando o fluxo de nutrientes for suficientemente intenso e a biomassa fitoplanctônica for alta, o máximo da distribuição de fitoplâncton ocorrerá bem próximo à superfície.
- O resultado é uma correlação direta entre a concentração total de fitoplâncton (ou clorofila) na coluna d'água (ou da camada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

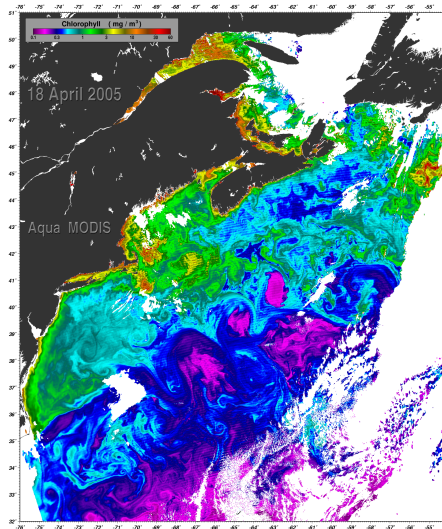
- (CZCS) <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/CZCS/>
- (SeaWiFS) <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>
- (MODIS) <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>

Roteiro

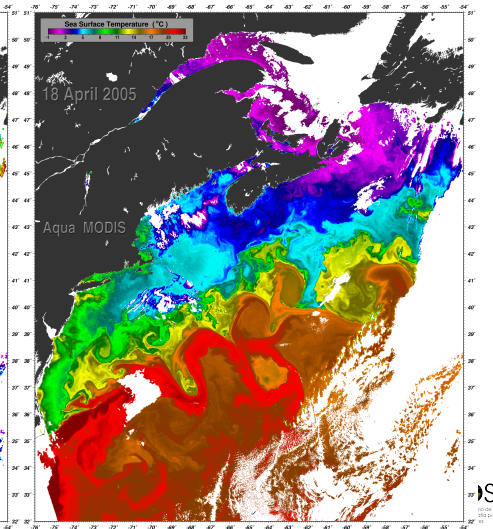
- 1 A Cor dos Oceanos
 - Motivação
 - Teoria
 - Satélites e Instrumentos
- 2 O Fitoplâncton e seu Meio
 - Clorofila em 3D
- 3 Aplicações
 - Pré-Processamento
 - Análises Globais
 - Análises Regionais
 - Análises Multidisciplinares

Nuvens são Detectadas no IV

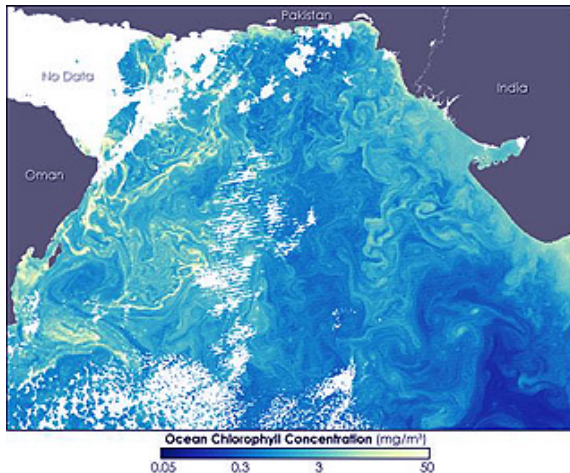
Clorofila



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.

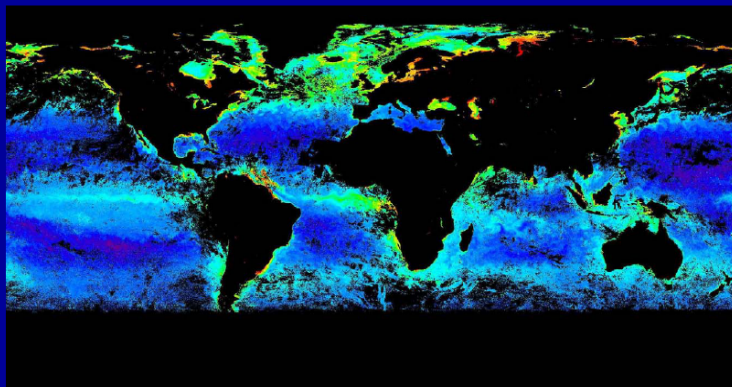
Disponibilidade de Dados

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

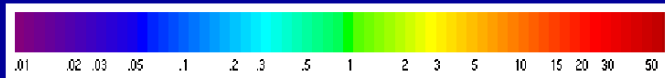
- MOD 18 - Normalized Water-leaving Radiance
- MOD 19 - Pigment Concentration
- MOD 20 - Chlorophyll Fluorescence
- MOD 21 - Chlorophyll_a Pigment Concentration
- MOD 22 - Photosynthetically Available Radiation (PAR)
- MOD 23 - Suspended-Solids Concentration
- MOD 24 - Organic Matter Concentration
- 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_a medido pelo SeaWiFS

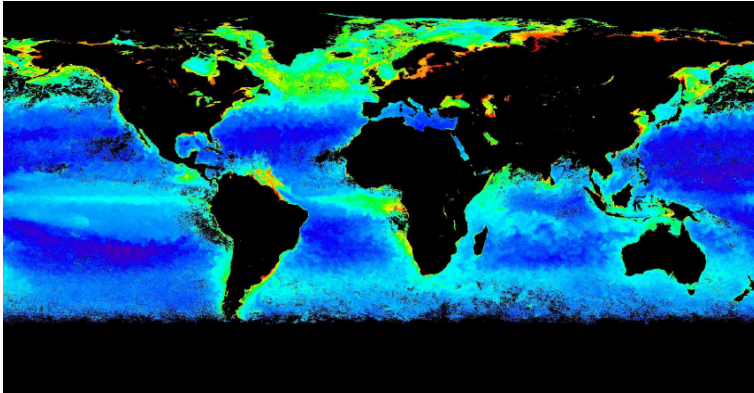


12 a 19 de Julho de 2001. Escala em mg/m³ Clo-a

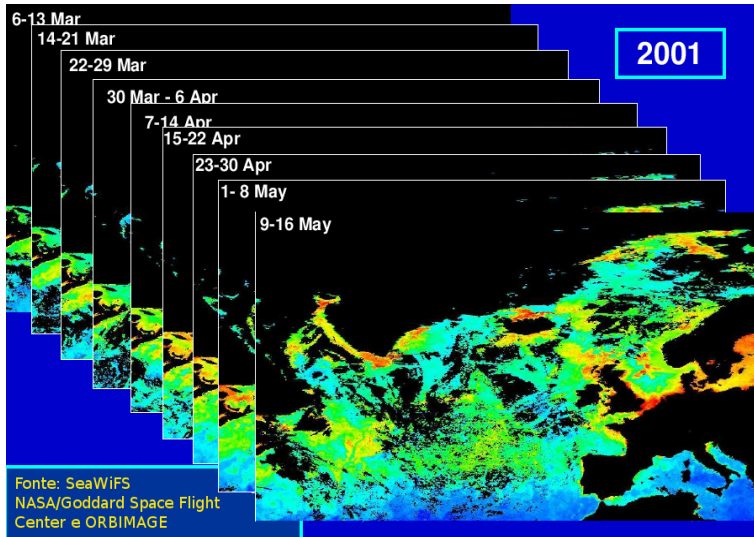


Aplicações: Distribuição de clorofila global

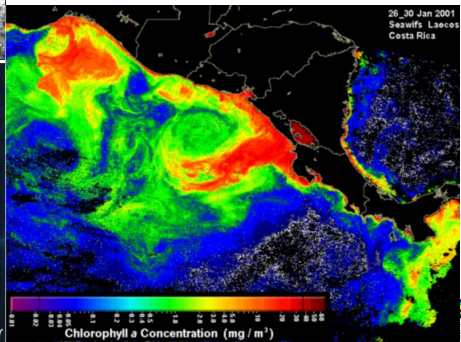
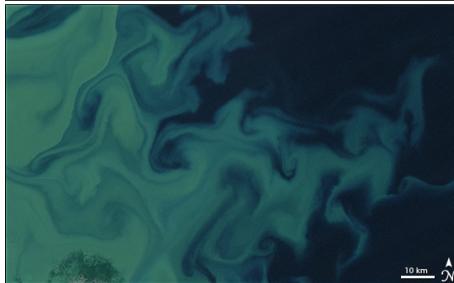
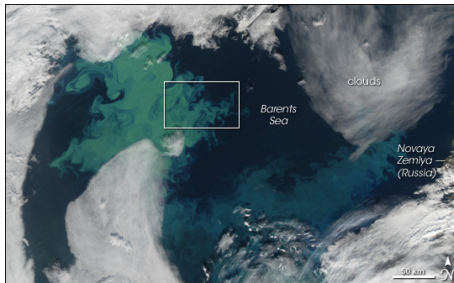
Composite para Julho de 2001 da distribuição global de Clorofila_a medido pelo SeaWiFS



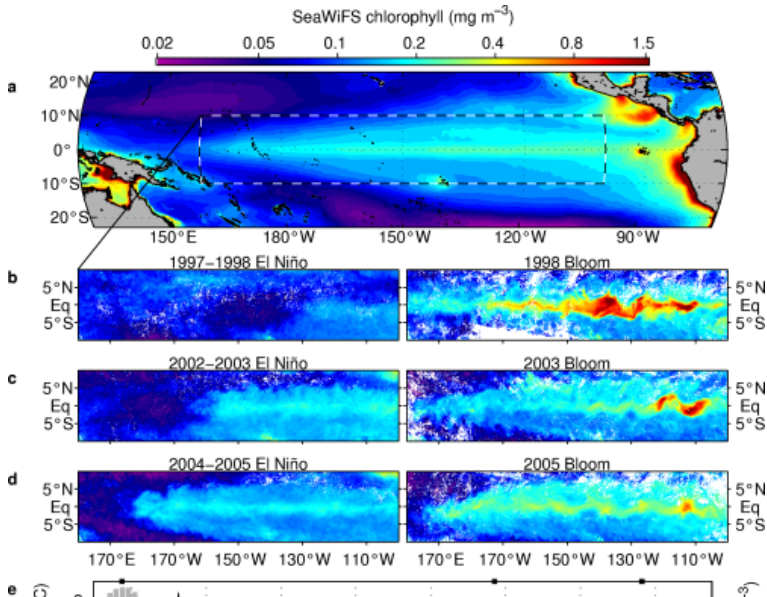
Aplicações: Monitoramento de Blooms



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!

