

5 Experimentos

Para a efetiva utilização das medidas do LIDAR-PUC para o monitoramento ambiental é necessário o estabelecimento de procedimentos e metodologias que permitam transformar dados obtidos na forma de espectros em informação relevante sobre o ambiente em estudo. Desta forma, foram realizados um conjunto de experimentos em laboratório, em laboratório móvel e *in situ*, com o objetivo de caracterizar a utilização deste equipamento, levantando suas potencialidades, testando os algoritmos implementados e avaliando sua confiabilidade.

5.1. Variação da posição do pico do espalhamento Raman com a Temperatura

A densidade da água do mar é um dos mais importantes processos que controlam o movimento dos oceanos.

Pequenas diferenças na densidade, causadas, por exemplo, pelo aquecimento ou resfriamento da superfície do mar, pode produzir correntes bastante fortes. Portanto, a determinação da densidade da água do mar (e suas variações) é de relevante importância.

A densidade da água do mar depende da temperatura da água (T), da salinidade (S) e da pressão (P), que aumenta com a profundidade. Para a camada superficial de água, a temperatura e salinidade são preponderantes na definição da densidade.

As massas d'água são caracterizadas por sua temperatura e sua salinidade. Um gabarito utilizado para a costa brasileira, na área da bacia de Campos, segue os seguintes critérios (Petrobras, 2001):

Massa d'água	Salinidade (S)	Temperatura (T) °C
Água Costeira (AC)	$S < 36$	$T \geq 20$
Água Tropical (AT)	$S > 36,4$	$T \geq 20$
Água Central do Atlântico Sul (ACAS)	$S < 36$	$T \leq 18$
Mistura AC/AT	$36 \leq S \leq 36,4$	$T \geq 20$

Mistura AC/ACAS	$S < 36$	$18 < T < 20$
Mistura AT/ACAS	$36 \leq S \leq 36,4$	$18 < T < 20$

O fenômeno da ressurgência ocorre com a subida para a zona eufótica das águas do tipo ACAS. Essas águas são ricas em nutrientes e têm especial importância na dinâmica ambiental da região.

O pico do espalhamento Raman observado pelo sistema LIDAR-PUC é na realidade a soma de duas contribuições: o espalhamento produzido nos monômeros, moléculas de águas isoladas, e o espalhamento produzidos por polímeros, moléculas de água (fracamente) ligadas pelas forças de van der Waals. Essas ligações levam vibrações moleculares com quantização de energia ligeiramente diferentes nos sistemas referidos, acarretando em uma pequena diferença no deslocamento Stokes do espalhamento Raman de cada contribuição.

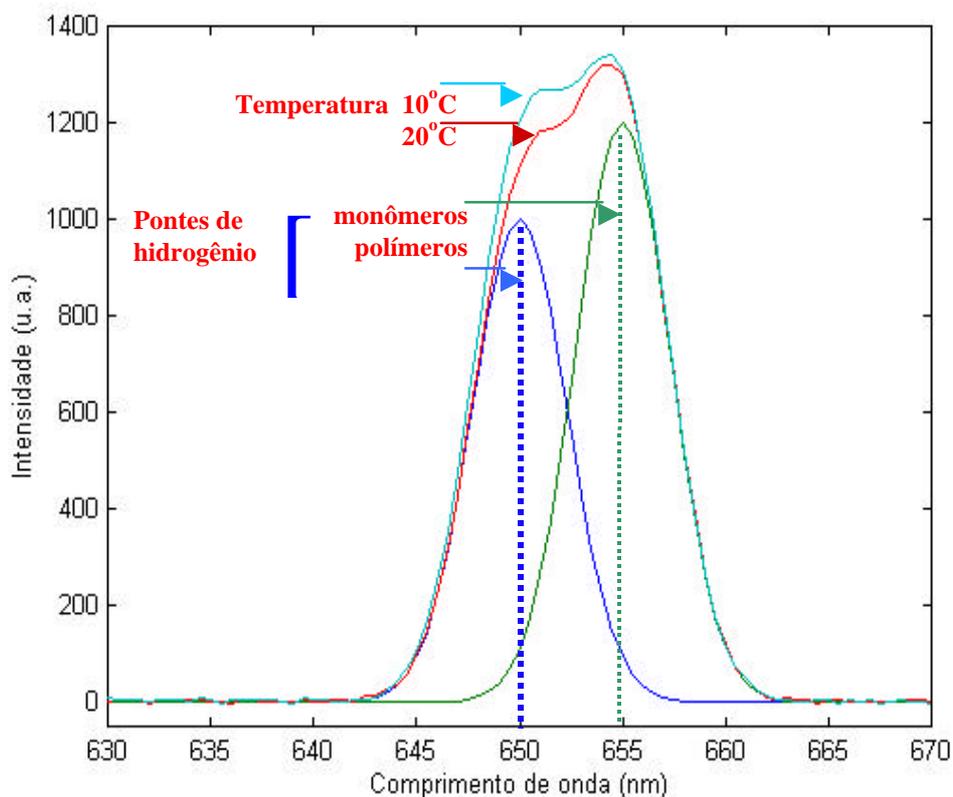


Figura 21 – Sobreposição dos picos de espalhamento Raman de monômeros e polímeros da água. A salinidade e a temperatura interferem na formação das pontes de hidrogênio que afetarão os modos vibracionais da molécula de água, alterando a relação entre os dois picos.

A temperatura da água irá alterar o balanço de moléculas ligadas [Leonard *et alli*, 1979]. Quanto maior a temperatura, maior a energia do sistema e menos provável será a permanência de sistemas ligados. Outra grandeza que afeta o balanço de ligações é a salinidade. O sal tende a competir com as moléculas de água para neutralizar sua polaridade, diminuindo o número de pontes de hidrogênio.

Neste experimento foi avaliada a aplicação do LIDAR-PUC no monitoramento das duas bandas Raman. A proposta deste experimento é a de ajustar o equipamento para a realização de tal medida para que a mesma possa ser realizada futuramente no monitoramento dos parâmetros físicos (temperatura e densidade) de interesse em oceanografia.

Estes estudos foram realizados somente em laboratório por razões econômicas, uma vez que todas as expedições que envolveram o uso da embarcação Astro-Garoupa estavam associadas ao estudo envolvendo o mapeamento da distribuição de Clorofila *a*. Nessas expedições, parâmetros T e ρ foram tomados com técnicas tradicionais de oceanografia.

Por esta razão, o ensaio realizado teve por objetivo avaliar a aplicação de um método simples para avaliar, por meio do sinal Raman, a temperatura da água com uma salinidade fixa.

O LIDAR-PUC, montado em laboratório foi direcionado para uma amostra de água pura, inicialmente a zero graus Celsius. Esta amostra foi gradativamente aquecida. A temperatura da amostra foi medida concomitantemente às medidas efetuadas pelo LIDAR-PUC.

A posição no espectro do pico do espalhamento Raman foi calculada após tratamento (filtragem de ruídos e ajuste de gaussiana) dos dados dos espectros obtidos. Estes dados foram cruzados com a temperatura medida e apresentados no gráfico da **Figura 22**.

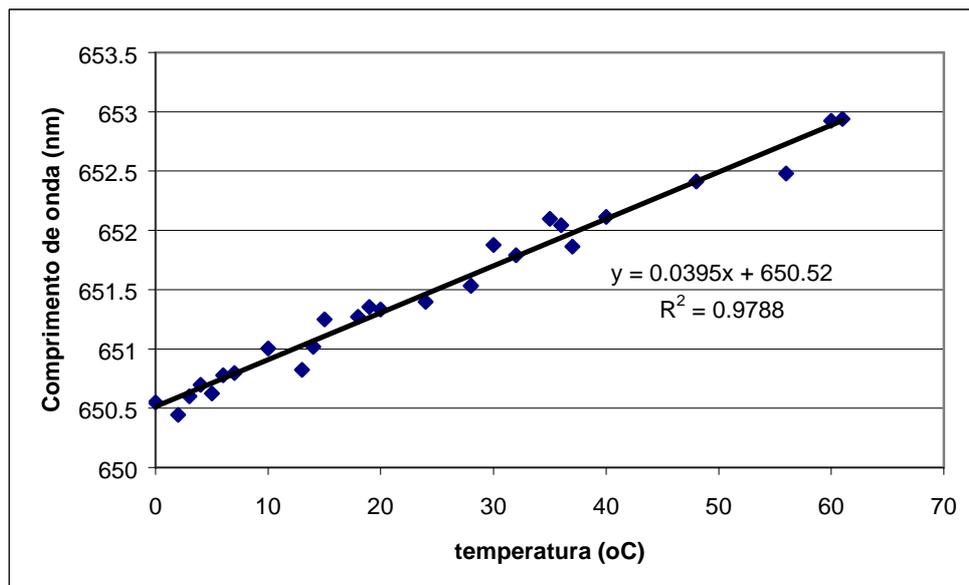


Figura 22 - Relação entre a temperatura e a posição do pico da gaussiana ajustada à banda do espalhamento Raman.

Como se vê, o ajuste linear obtido é bastante adequado. A variação da posição do pico pelo ajuste de uma gaussiana refletiu bem a variação do peso de cada uma das duas bandas Raman associadas aos monômeros e dímeros que irão determinar a densidade da água. Este experimento é um indicador de uma possível utilização deste procedimento para a caracterização de águas do tipo ACAS na superfície da água.

5.2. Estudo de replicatas

O primeiro passo para a caracterização dos resultados de concentração foi a análise da repetitividade dos resultados das medidas do LIDAR-PUC por meio de um experimento sobre análise de replicatas.

Vinte medidas foram realizadas em laboratório sobre uma mesma amostra de água do mar coletada de uma área de ressurgência. Dez dessas medidas foram realizadas na presença de luz artificial. O desvio padrão relativo percentual para ambos os grupos foi similar (6,5%), mas o grupo iluminado artificialmente apresentou um valor médio 7,2% inferior (0,1613 u.a.) em relação ao grupo apenas com luz natural (0,1738 u.a.).

Considerando outros estudos de replicação [Matos, 2001], onde amostras replicadas foram analisadas pelo método fluorimétrico, um desvio padrão relativo de até 8% é aceitável. No entanto, é necessário especial cuidado no emprego deste valor para medidas realizadas *in situ*. Flutuações em parâmetros ambientais podem causar interferências consideráveis nos espectros. É importante observar, contudo, que aceita-se que a variabilidade natural da população fitoplanctônica alcance 10% ou até mesmo 20% em microescalas (Heileman & Mohammed, 1991). Esta variação pode ser explicada pela característica do fitoplâncton de se agrupar de maneira não uniforme, mesmo para escalas menores que 1m.

5.3. Avaliação da correlação entre concentrações relativa e absoluta de clorofila a

Quatro experimentos foram desenvolvidos para avaliar a correlação entre as concentrações relativa e absoluta de clorofila a, testando, assim, a relação linear apresentada na equação 17. Nestes experimentos foi possível avaliar a variação do coeficiente angular desta relação teórica, de acordo com diferentes condições experimentais.

5.3.1. Avaliação de linearidade das concentrações relativa e absoluta de Clorofila a em águas costeiras

Inicialmente avaliou-se a linearidade da relação entre as concentrações relativa e absoluta de clorofila a em águas naturais de uma amostra de água costeira coletada próxima à praia do Leblon, no Rio de Janeiro. Uma sub-amostra foi filtrada com filtro de membrana Millipore[®] HAWP04700 e a concentração absoluta de Clorofila a foi calculada pelo método fluorimétrico. Outras 11 subamostras foram geradas e diluídas com água do mar previamente filtrada. A diluição variou de 0 a 100% de água filtrada. Beckers de 100ml, com 4,5cm de coluna d'água, foram utilizados como recipientes e as medidas do LIDAR foram realizadas sobre estes. A concentração relativa de clorofila a foi calculada a partir dos espectros e comparados com a concentração absoluta, de acordo com sua diluição (Figura 23).

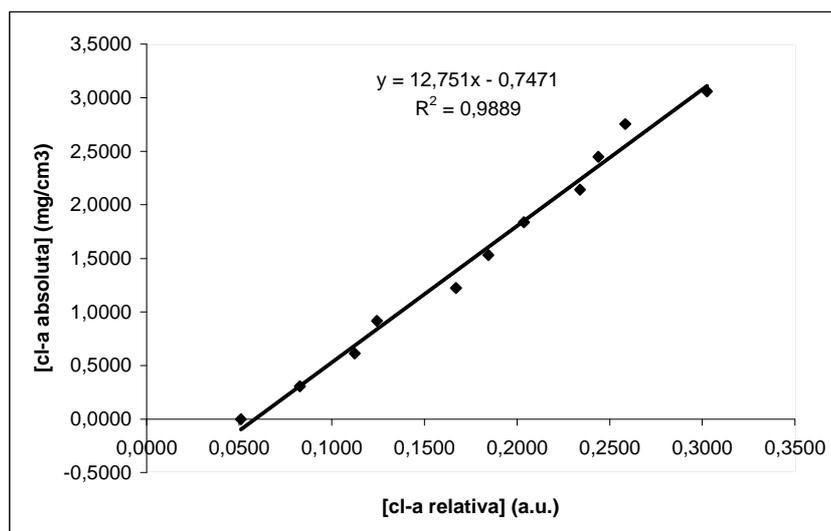


Figura 23 - Ajuste linear entre concentração clorofila *a* x concentração relativa de clorofila *a*

A água do mar filtrada apresenta um valor de clorofila *a* relativa excepcionalmente alto. Este valor pode ser decorrente do fato de se ter utilizado um filtro de 0,45 μ m que não deve ter conseguido reter os menores componentes do fitoplâncton.

5.3.2. Medidas sobre culturas de algas

Com o objetivo de identificar as alterações na relação entre as concentrações relativa e absoluta de clorofila *a* com a variação da composição do fitoplâncton, foi realizado um experimento com diferentes monoculturas de algas típicas da costa brasileira. Essas medidas foram realizadas no laboratório móvel, no IEAPM.

As medidas foram realizadas sobre culturas de quatro tipos de algas com características (tamanho e composição de pigmentos, entre outros) bastante distintas. Amostras dessas culturas padrão foram coletadas, filtradas com filtro Millipore de 0,27 μ m e analisadas, utilizando o método espectrofotométrico tricromático. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Concentração de clorofila, em $\mu\text{g/l}$, da cultura padrão.

Alga		[Cl-a abs]	[Cl-b abs]	[Cl-c abs]
Pyrocistis (Dinoflagelada)		16.80	0.00	7.28
Dunaliella	Média	279.46	69.88	6.49
(Clorofíceas)	Desv. Pad. (DPR%)	11.22	3.38	5.79
Skkeletonema	Média	47.91	0.07	5.14
(Diatomácea)	Desv. Pad. (DPR%)	0.52	0.12	2.23
Isochrisis	Média	132.56	5.98	75.99
(Crisofíceas)	Desv. Pad. (DPR%)	17.37	1.70	8.25

Para as medidas com o LIDAR, ajustou-se a concentração da amostra inicial para uma concentração em torno de $10\mu\text{g/l}$, diluindo-se a cultura padrão, de forma a permitir uma comparação entre as bandas Raman e de clorofila a compatível com a metodologia de processamento desenvolvida.

Através de diluições sucessivas com água do mar previamente filtrada, foram obtidas amostras com concentração decaindo por um fator 2. Medidas com o LIDAR foram realizadas sobre estas amostras colocadas em recipientes de 1000ml (coluna d'água de 35,5cm). As concentrações relativas de clorofila a foram obtidas e o gráfico de comparação entre as concentrações relativa e absoluta de clorofila a está apresentado na Figura 24.

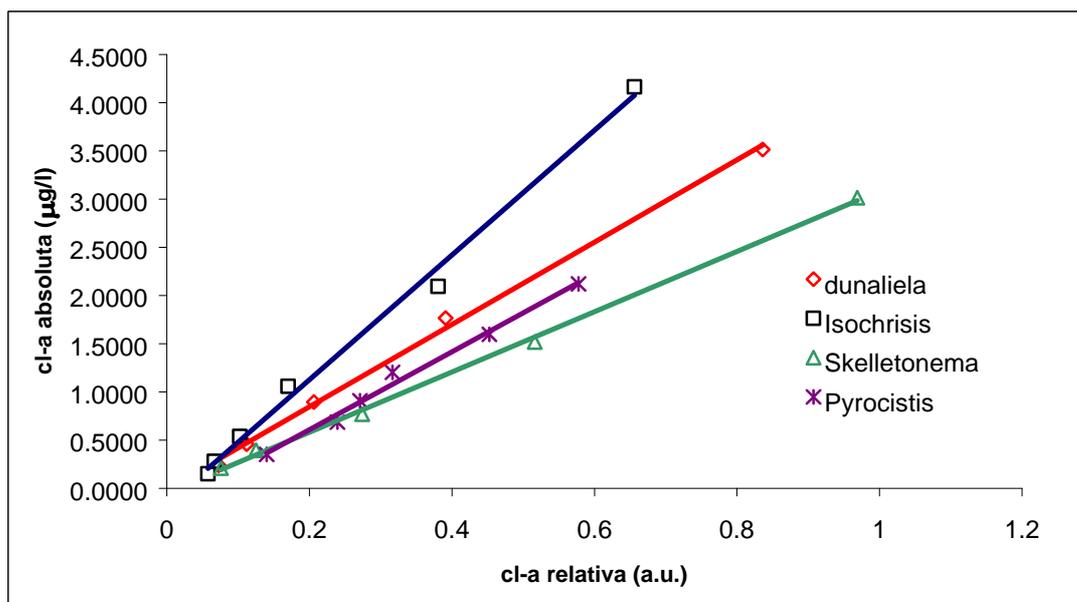


Figura 24 - Ajuste linear para as relações entre concentração relativa e concentração absoluta de clorofila *a* para as diferentes culturas de algas.

Conforme se observa pelos fatores de ajuste da Tabela 2, conquanto as variáveis ambientais e a composição do fitoplâncton permaneçam constantes, o valor da concentração relativa de clorofila *a* obtido com o LIDAR apresenta resposta linear em uma larga faixa de concentração de interesse de estudos de águas costeiras e oceânicas, independente da taxonomia da população fitoplanctônica.

Tabela 2– Tabela com as equações dos ajustes lineares apresentados na Figura 24, com seus fatores de ajuste respectivos.

Cultura	Ajuste linear	Fator de ajuste (R ²)
Dunaliella	[Cl-abs] = 4,27[Cl-rel] – 0,01	0,9974
Isochrysis	[Cl-abs] = 6,47[Cl-rel] – 0,16	0,9941
Skeltonema	[Cl-abs] = 3,12[Cl-rel] – 0,05	0,9985
Pyrocistis	[Cl-abs] = 4,04[Cl-rel] – 0,21	0,9886

Medidas em diluições menores realizadas sobre volumes menores, para evitar a saturação do sinal para os mesmos ajustes do LIDAR, apontaram para uma boa linearidade até concentrações de 10µg/l. Para a cultura de Isochrysis, por exemplo, a diferença entre o valor medido de concentração de clorofila *a* e o valor

calculado pelo ajuste linear situou-se abaixo de 1,1% do valor medido, quando foram consideradas concentrações de até 8,3 $\mu\text{g/l}$. Acima deste valor, as concentrações disponíveis (16,6 $\mu\text{g/l}$, no mínimo) apresentaram o sinal da fluorescência da clorofila tão alto que o limite da faixa de trabalho linear (erro de até 10%) para o método proposto foi ultrapassado. Entretanto, vale observar que valores de concentração de clorofila a maiores que 10 $\mu\text{g/l}$ são extremamente raros nos oceanos [Falkowski & Kolber, 1995].

Apesar da literatura [Poryvkina *et alli*, 2000] indicar que a emissão da fluorescência em 680nm para as algas clorofíceas sejam de 2 a 8 vezes mais intensas que para as dinoflageladas, a razão entre os coeficientes angulares das retas ajustadas neste experimento para essas duas culturas ficou em 1,057. De fato, a maior razão obtida foi de 2,072, quando comparamos os resultados das algas crisofíceas com as diatomáceas.

Como mencionado nos “aspectos teóricos”, vários fatores, como solvente, rigidez e aderência do fluoróforo, interferem tanto na intensidade quanto na posição do pico da banda fluorescente. Buscou-se investigar neste grupo específico de culturas o quanto a variação da posição do pico da banda de fluorescência da clorofila a para cada alga, pode interferir no cálculo da concentração relativa de clorofila a. Como é observado na Figura 25, há uma pequena variação na posição da banda de fluorescência de clorofila a para cada cultura de alga. Como a clorofila a apresenta variações em seu pico de fluorescência de acordo com a sua ligação com proteínas [Govindjee, 1999], as diferenças observadas podem ser decorrência da diferente proporção de clorofila a 670, clorofila a 680 e clorofila a 690, etc., (os números indicam o comprimento de onda, em nanômetros, dos picos de fluorescência) em cada tipo de alga que, no fundo, refletem a interferência do meio na intensidade e posição do pico da banda.

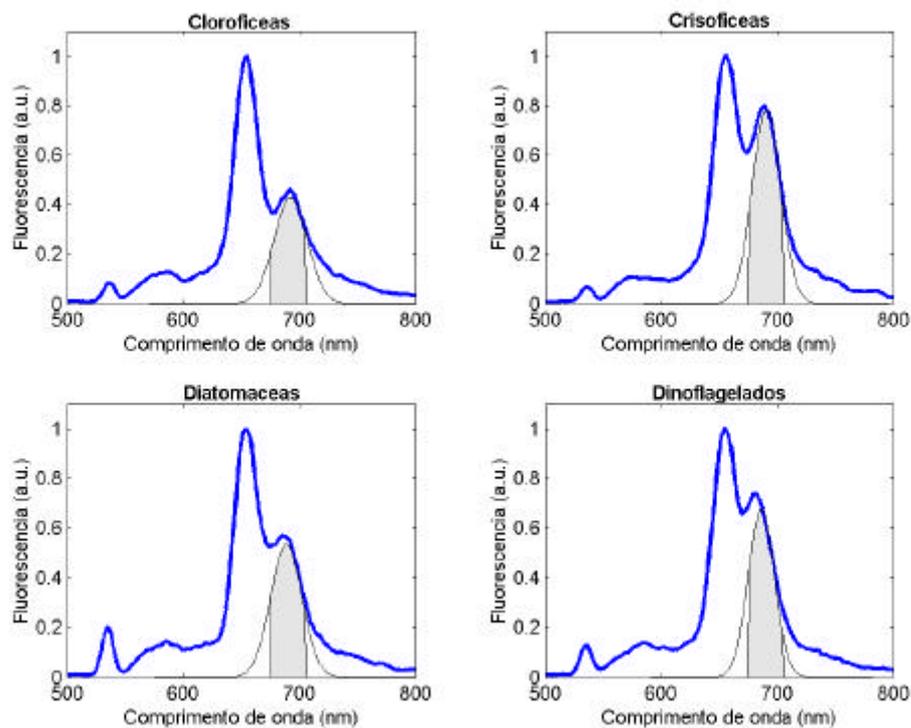


Figura 25 - Bandas de clorofila a com gaussiana ajustada. A área preenchida é a utilizada na integração da contribuição da clorofila a no espectro de fluorescência.

Ao fixar o centro da banda de clorofila a em 685nm, introduzimos alguma variação no cálculo da concentração relativa de clorofila a para as diferentes culturas. Entretanto, o deslocamento do centro da banda para otimizar o cálculo para cada cultura mostrou um desvio de no máximo 4,9% para os coeficientes angulares. Para águas naturais, de composição mista do fitoplâncton, a fixação do pico em 685nm se apresenta como bastante razoável.

5.3.3. Estudo de mesocosmo – simulação da Baía de Guanabara

Em estudo de mesocosmo procurou-se simular o processo evolutivo associado à despoluição da Baía de Guanabara. Neste experimento foram preparados recipientes com água da Baía de Guanabara, diluída em água do mar “envelhecida” (água de mar limpo, deixada em repouso, no escuro, por um longo período), nas proporções de 100:0, 75:25, 50:50, 25:70 e 0:100. A evolução do mesocosmo em ambiente controlado foi acompanhada durante 7 dias. Durante este período foram realizadas medidas de LIDAR sobre subamostras dessas amostras.

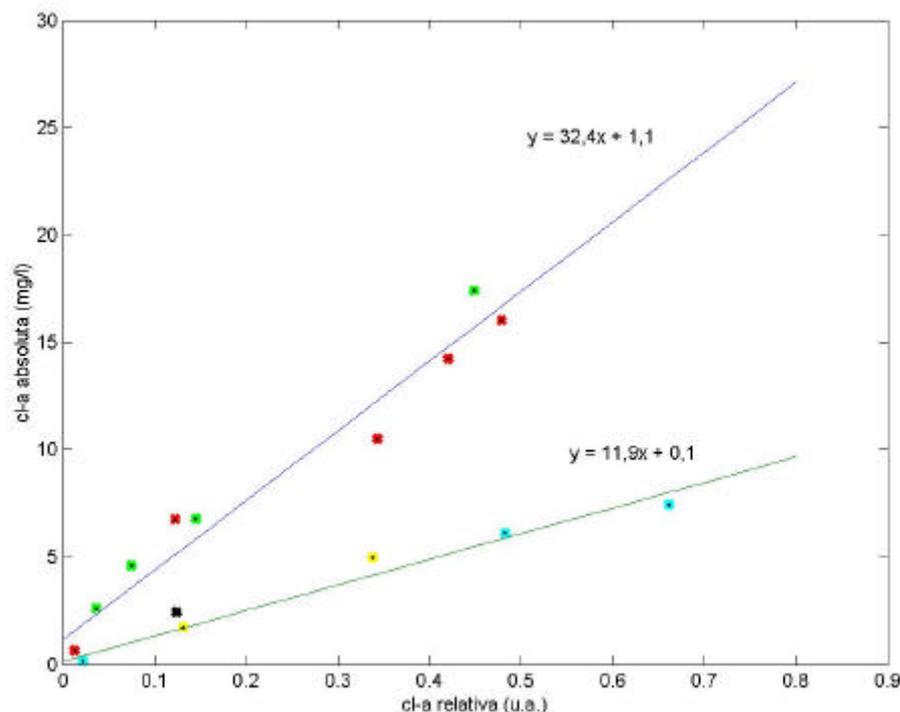


Figura 26 - relação da clorofila a relativa, obtida com o LIDAR e clorofila a absoluta (método fluorimétrico). Os pontos azuis indicam medidas realizadas no 1º dia, vermelho no 3º dia, amarelo no 5º dia, preto no 6º dia e verde no 7º dia.

Problemas na rede elétrica do laboratório causaram uma instabilidade na eletrônica do LIDAR que inviabilizou o aproveitamento de algumas medidas. Outros problemas relacionados com o desenvolvimento do experimento, bem como com a metodologia empregada para a coleta das sub-amostras, introduziram interferências no resultado das análises. De qualquer forma, nesses experimentos é possível verificar a separação das medidas em 2 conjuntos: um composto pelas medidas realizadas no 1º, 5º e 6º dias, outro composto pelas medidas realizadas no 3º e 7º dias. Esta separação pode ser consequência dos problemas de contaminação dos recipientes controlados ocorridos neste experimento. É interessante notar, ainda, que o coeficiente de correlação calculado entre a Clorofila a relativa e a M.O.D. foi de $-0,2211$. Portanto, estão descorrelacionados, quando consideramos todo o conjunto de dados. Os coeficientes de correlação dos conjuntos de cada dia estão listados na Tabela 3. A correlação apresentada no primeiro dia diminuiu no 3º dia e desapareceu no 5º dia, dando lugar a uma anticorrelação.

Tabela 3– Lista dos coeficientes de correlação entre as concentrações relativas de MOD e clorofila *a*.

Dia	Coefficiente de correlação
1° (azul)	0,7970
3° (vermelho)	0,5344
5° (amarelo)	-0,6627
7° (verde)	-0,1988

Observando os espectros somados das diferentes diluições obtidas a cada dia (Figura 27), vemos que houve um contínuo acréscimo da fluorescência associada à M.O.D. ao longo do tempo, concomitante com a diminuição da fluorescência da clorofila *a*.

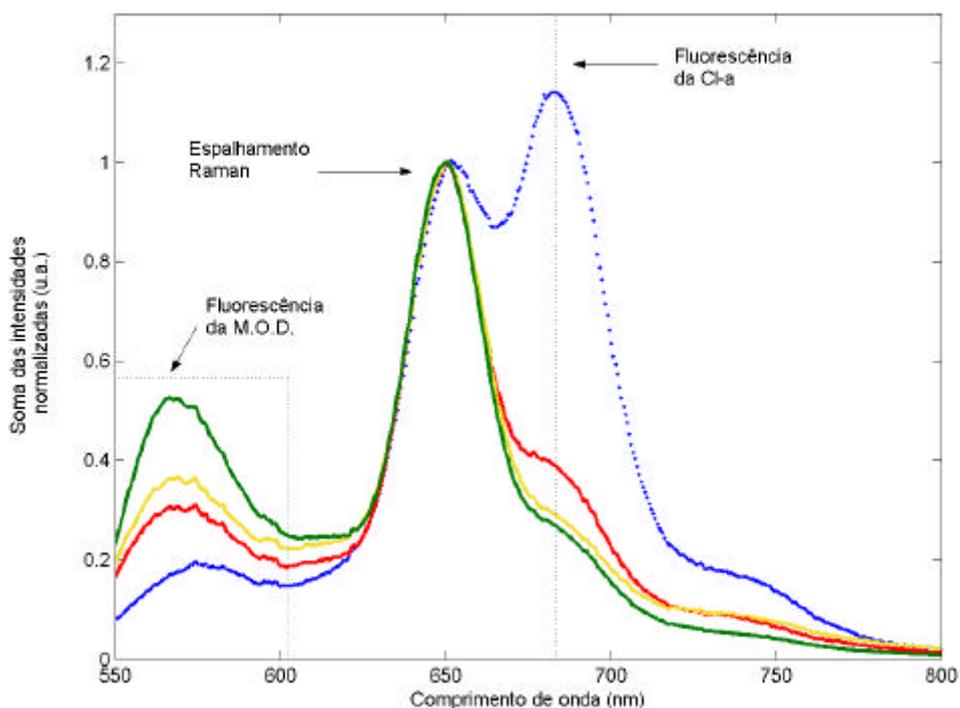


Figura 27 - Intensidades comparadas entre os dias. Os espectros obtidos em cada dia foram somados e normalizados pela altura do pico do espalhamento Raman, para comparação. Azul: 1° dia; vermelho: 3° dia; amarelo: 5° dia; verde: 7° dia.

5.3.4. Medidas temporais de águas de uma mesma localidade

Após verificar a linearidade dos resultados de concentração relativa de clorofila a com as diluições realizadas a partir de um volume de água restrito, foi realizado um experimento para avaliar, no laboratório móvel, a variação da concentração relativa da clorofila a no tempo, com coletas de água de uma mesma localidade, e sua comparação com os valores de concentração de clorofila a medidos por técnica tradicional.

Neste experimento, as amostras de água foram coletadas de um mesmo local próximo à costa em Arraial do Cabo, RJ, durante um experimento voltado para estudar águas de uma região que costumeiramente apresenta o fenômeno da ressurgência. Cada amostra foi dividida, sendo uma sub-amostra filtrada para posterior análise fluorimétrica para obtenção da concentração absoluta de clorofila a e a outra sub-amostra trazida ao laboratório móvel, montado no IEAPM – Instituto de Estudos Oceanográficos Almirante Paulo Moreira. As amostras de superfície foram coletadas a profundidade média de 1,1m e as amostras de fundo foram coletadas a profundidade média de 30,4m.

A comparação dos resultados da clorofila a relativa e da clorofila a absoluta das coletas realizadas em Arraial do Cabo apresentaram uma linha de corte gerando 2 conjuntos de dados bem definidos (Tabela 4).

O primeiro conjunto (anterior) apresenta curva característica similar às das algas isoladas ($[cl-abs] \sim 5.4[cl-rel]$) (Figura 29). O segundo conjunto apresenta curva muito mais inclinada. Neste grupo foram encontrados os valores de concentração absoluta de clorofila a mais altos.

Não há separação entre superfície e fundo ou noite e dia. Como ponto interessante, a coleta de superfície da estação 21/12h se encaixou no primeiro conjunto de dados, enquanto que a coleta de fundo se inseriu melhor no segundo conjunto.

Tabela 4 – Dados comparativos entre concentração relativa e concentração absoluta de clorofila *a*.

	Coleta - Superfície (s) / Fundo (f)	Estações	Temperatura da água(°C)	Concentração relativa de clorofila <i>a</i> (u.a.)	Concentração absoluta clorofila <i>a</i> (mg/l)
Linha de Corte	s	20/02 15h	23,82	0,2546	1,454
	f	20/02 15h	15,88	0,1746	1,322
	s	20/02 21h	21,70	0,2614	2,017
	f	20/02 21h	15,63	0,1319	1,068
	s	21/02 9h	17,77	0,2513	1,711
	f	21/02 9h	14,01	0,0844	1,994
	s	21/02 15h	18,40	0,1503	6,277
	f	21/02 15h	14,54	0,0796	2,107
	s	21/02 21h	17,84	0,1207	4,447
	f	21/02 21h	13,77	0,0523	1,403
	s	22/02 3h	18,53	0,1109	3,640
	f	22/02 3h	14,82	0,0784	2,803
	s	22/02 9h	19,61	0,1668	4,745
	f	22/02 9h	14,38	0,0499	0,809

Comparando os valores de temperatura da água com as definições das massas d'água, é possível identificar que a partir de 9h do dia 21 a temperatura da superfície sofreu um acentuado declínio, aproximando-se de temperaturas características de ACAS, protagonista da ressurgência (Figura 28). Justamente este é o momento de separação dos grupos de amostras, quanto à inclinação da curva de calibração.

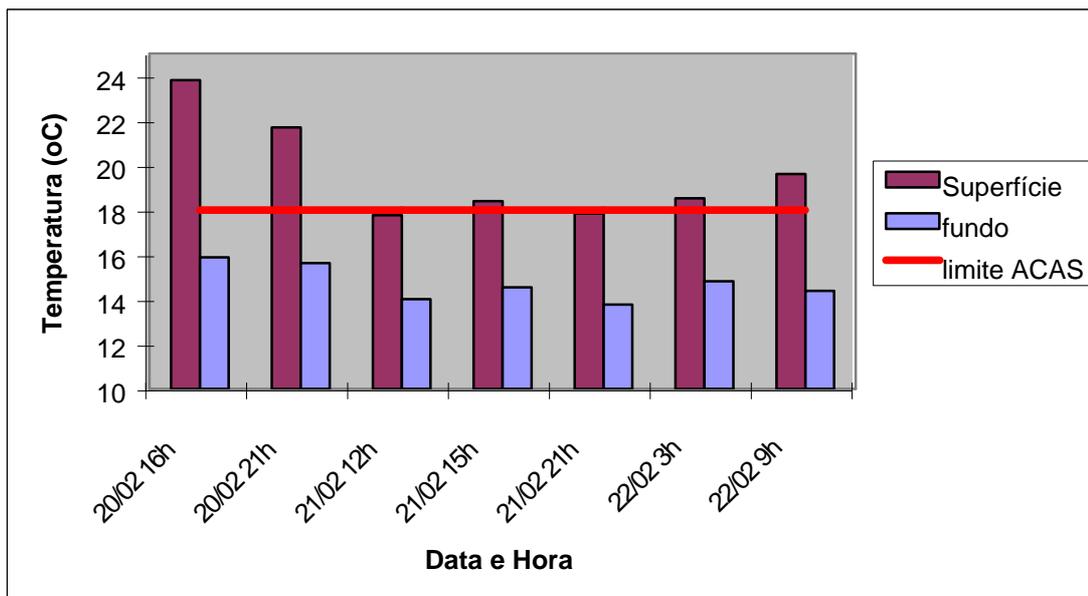


Figura 28 – Variação da temperatura com o tempo. A linha vermelha indica o limite da temperatura para caracterização de águas do tipo ACAS.

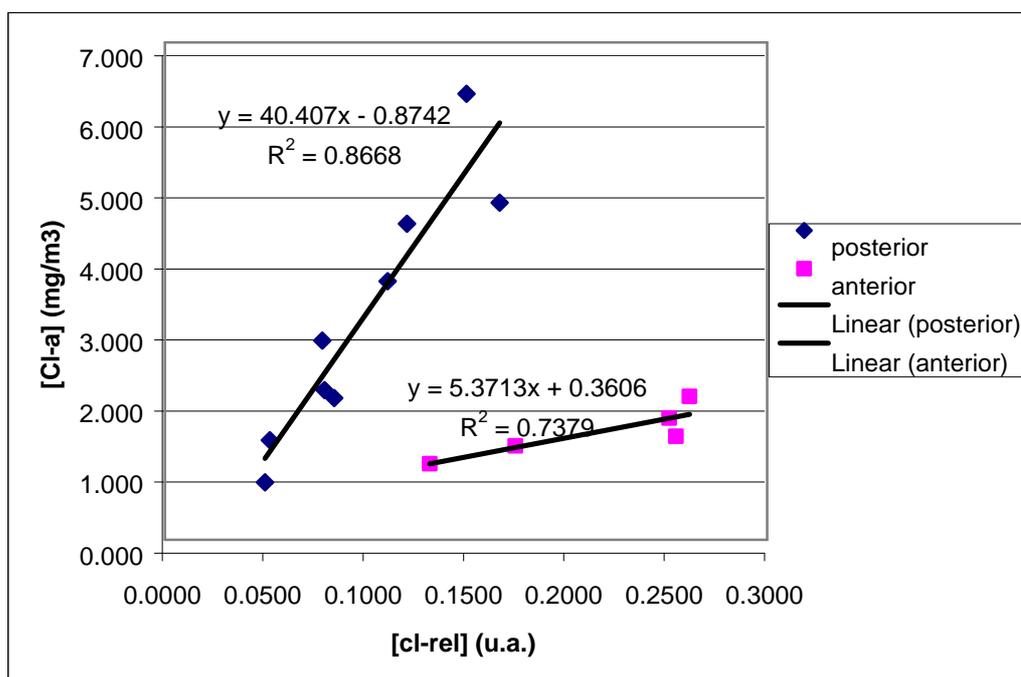


Figura 29 – Ajuste de curvas para o conjunto de dados de amostras coletadas em um mesmo local. Os conjuntos foram classificados como “anterior” e “posterior” à linha de corte definida na Tabela 4.

5.3.5. Comparação entre medidas *in situ* e amostras testemunho

Em paralelo aos estudos realizados em laboratório, o LIDAR-PUC foi instalado em uma embarcação com o telescópio e o feixe de laser apontados diretamente para a água durante campanhas no mar.

Amostras testemunho foram coletadas para a extração e obtenção da concentração absoluta de clorofila *a*. Estas amostras foram coletadas utilizando-se garrafas Niskin de 10L, imediatamente filtradas e os filtros guardados em papel alumínio e armazenados em frasco plástico escuro em nitrogênio líquido. A extração da clorofila foi realizada utilizando-se acetona como solvente e medidas fluorimétricas (EPA 445.0) foram realizadas após centrifugação.

5.3.5.1. Medidas de alto mar

Cerca de 150 medidas com o LIDAR foram realizadas em alto mar, em uma linha de mais de 200km, na região da bacia de Campos. Nove amostras testemunho foram coletadas para promover a comparação entre os resultados. A população fitoplanctônica era pequena na área analisada (águas oligotróficas). É interessante notar, entretanto, que o DPR% foi similar para ambos os procedimentos. (27.5% para todas as medidas realizadas com o LIDAR e 30.4% para as 13 extrações dos testemunhos). Apesar do bom ajuste linear entre as concentrações relativa e absoluta de clorofila *a*, as flutuações observadas podem ser apenas variações locais da população fitoplanctônica. Além disso, o LIDAR efetua sua medida integrando o sinal de fluorescência de uma coluna d'água efetiva, enquanto as amostras testemunho foram coletadas a uma profundidade específica (a cerca de 1m, neste caso) em horários e dias diferentes. Como condições de iluminação diferentes interferem na distribuição vertical da concentração do fitoplâncton, as amostras testemunho podem ser representações de diferentes contribuições do sinal da fluorescência da clorofila no espectro do LIDAR.

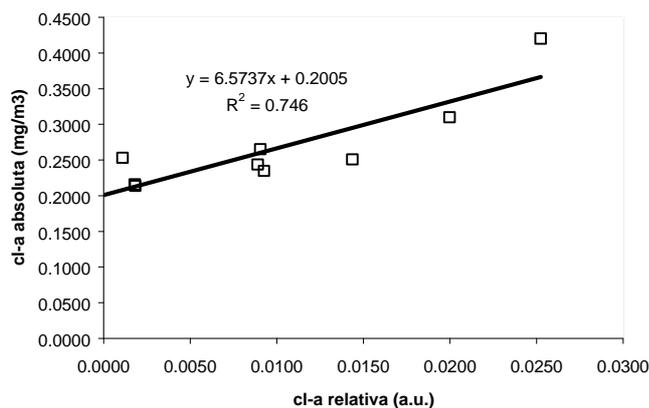


Figura 30 - Ajuste linear para concentrações absoluta e relativa de clorofila a para medidas realizadas em alto mar.

Vale observar, contudo, que boa parte das amostras coletadas apresentaram concentração de clorofila a próximas ao limite inferior comumente encontrado nos oceanos. Estes valores servem de referência para águas oligotróficas tanto para a comparação da concentração de clorofila a absoluta quanto para a concentração relativa de clorofila a.

5.3.5.2. Medidas temporais de um mesmo local

Para analisar como alterações climáticas interferem na correlação entre as concentrações relativa e absoluta de clorofila a, a embarcação foi estabilizada durante 5 dias em um ponto específico da costa brasileira, próxima ao dispersor das águas tratadas pela estação de tratamento de efluentes de Cabiúnas. Amostras testemunho foram coletas em garrafas de Ninskin de 10L em intervalos regulares e medidas com o LIDAR foram realizadas nesses momentos. As amostras foram filtradas e armazenadas no escuro em nitrogênio líquido. Posteriormente, a extração de clorofila foi efetuada utilizando acetona como solvente e medidas fluorimétricas foram realizadas após centrifugação.

Para comparar os dados, medidas diurnas e noturnas foram separadas. As medidas foram realizadas às 9:00 e 15:00hs, durante o dia, e às 3:00 e 21:00hs, durante a noite. Durante esses dias uma frente fria aportou na região. Choveu entre 15:20h do dia 25 até 0:40h do dia 26 e a composição do fitoplâncton foi alterada durante este período (Petrobras, 2001). Os resultados dos ajustes lineares

entre os conjuntos de dados obtidos durante o dia e à noite estão apresentados na Figura 31.

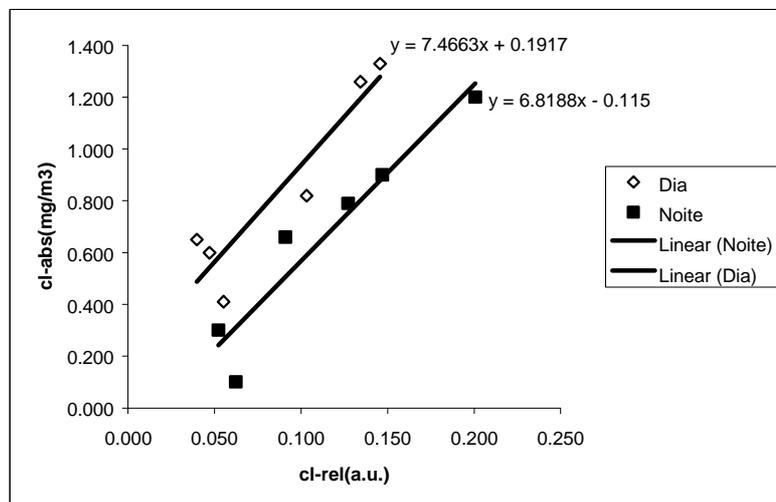


Figura 31 - Ajuste linear para as concentrações absoluta e relativa para águas costeiras

5.4. Mapas Sinóticos

Visando o desenvolvimento de ferramental para a compreensão, visualização e análise espacial das informações obtidas com o LIDAR-PUC, foram realizadas campanhas para a obtenção de medidas em uma malha georeferenciada. Os dados de concentração relativa de clorofila a foram utilizados para produção de mapas sinóticos de clorofila a de diferentes regiões estudadas.

Assim, medidas geo-referenciadas foram obtidas cobrindo uma determinada área de interesse. Posteriormente, os espectros gerados foram processados e as concentrações relativas de clorofila a obtidas. A posição (latitude/longitude) utilizada foi a média dos valores obtidos enquanto a medida foi realizada (com a embarcação em movimento). A interpolação desses dados para a área analisada foi realizada através do método de *kriging* simples e também por *kriging* ordinário.

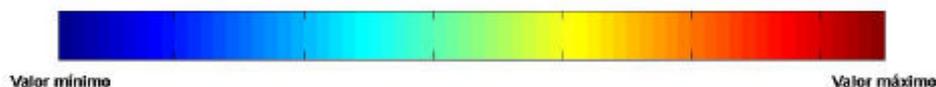


Figura 32 – Legenda de cores utilizada para os mapas. As cores foram distribuídas entre os valores mínimo e máximo de cada *grid*.

Cada valor de concentração relativa de clorofila a foi associado a uma cor segundo a escala de cores da Figura 32, onde o valor mínimo da concentração de clorofila na região estudada foi associado à cor azul e o valor máximo à cor vermelha. Os demais valores são distribuídos em uma escala linear ao longo da barra de cores. O mapa, com unidades UTM (em metros), é, então, colorido com os valores inferidos pela krigagem.

Para cada campanha, os valores das concentrações relativas de clorofila a e MOD foram correlacionados. Além da correlação global dos conjuntos, sem considerações sobre as distâncias entre os pontos, foram realizadas correlações espaciais, aqui chamada de correlação localizada. Neste caso, para cada ponto associado a um espectro (e, portanto, às suas grandezas derivadas) foi demarcado um subconjunto de pontos mais próximos (até uma certa distância limite do ponto central). Foi então calculada a correlação entre as duas grandezas para este subconjunto (incluindo o ponto central). A correlação localizada foi calculada para cada ponto de medida. A visualização desta informação sobre o mapa foi gerada utilizando-se um critério de cores pré-estabelecido: um ponto correlacionado com sua vizinhança (coeficiente de correlação maior que 0,35) foi identificado com um disco azul; um ponto descorrelacionado (coeficiente de correlação entre 0,35 e $-0,35$) foi identificado com um disco verde; um ponto anti-correlacionado com sua vizinhança (coeficiente de correlação menor que $-0,35$) foi identificado com um disco vermelho.

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos nestas campanhas. Serão também apresentadas, quando pertinente, os resultados obtidos através das análises de correlação entre as concentrações relativas de clorofila a e MOD.

A localização das campanhas realizadas na Bacia de Campos está esquematizada no mapa abaixo.

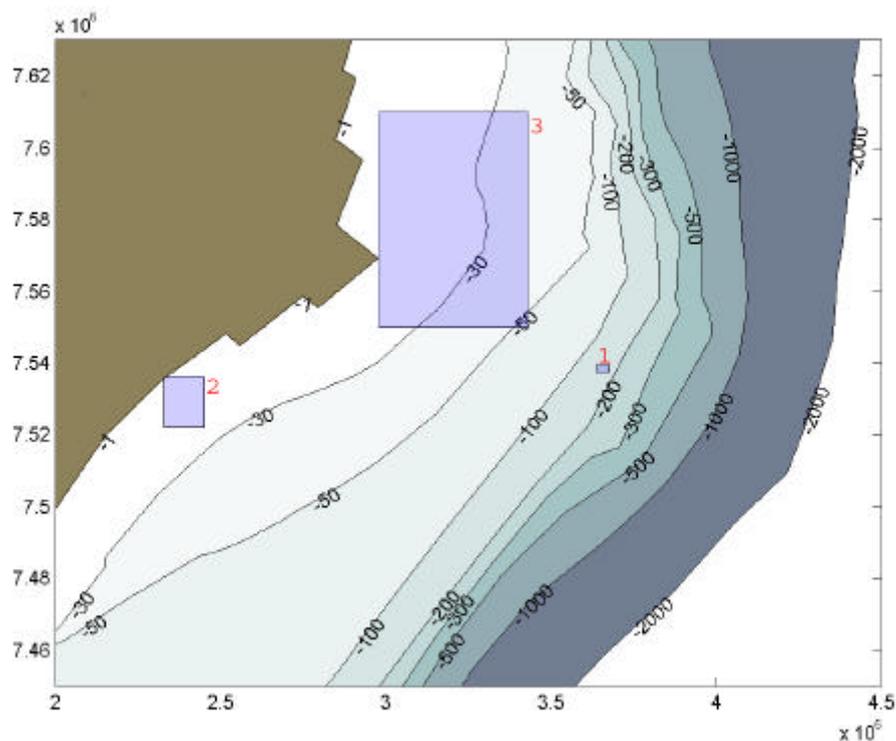


Figura 33 – Mapa da bacia de Campos com as regiões estudadas. 1- Entorno da plataforma de Pargo. 2- Próximo à estação de tratamento de efluentes de Cabiúnas, 3- Região superior próxima à foz do rio Paraíba do Sul.

5.4.1. Região do entorno da plataforma de Pargo

A campanha no entorno da plataforma de Pargo (região 1, na Figura 33) foi realizada durante o programa de pré-monitoramento da Bacia de Campos e Cabiúnas. Nesta campanha, 61 espectros georeferenciados foram obtidos e processados de acordo com o procedimento descrito no item 4.4, obtendo-se os valores das concentrações relativas de clorofila a e MOD.

Os 61 valores obtidos nesta região apresentaram um desvio padrão relativo de 33,4%. Comparando-se esta variação com resultado aqui reportado para variabilidade da concentração de clorofila a em águas oligotróficas (seção 5.3.5.1), verificamos que, destarte a pequena área avaliada (aproximadamente $7,5\text{km}^2$, comparada com a extensão do experimento anterior, onde a concentração relativa de clorofila a foi medida ao longo de mais de 200km), o desvio padrão relativo nesta região é superior ao anteriormente reportado (27,5%). Esta diferença parece ilustrar o efeito da plataforma como fator de interferência positiva no ecossistema local. Para analisar a distribuição espacial destes

resultados foi gerado o mapa da Figura 34, por meio de *kriging* simples (onde se leva em conta, para cada posição, a influência de todos os pontos medidos) utilizando modelo exponencial.

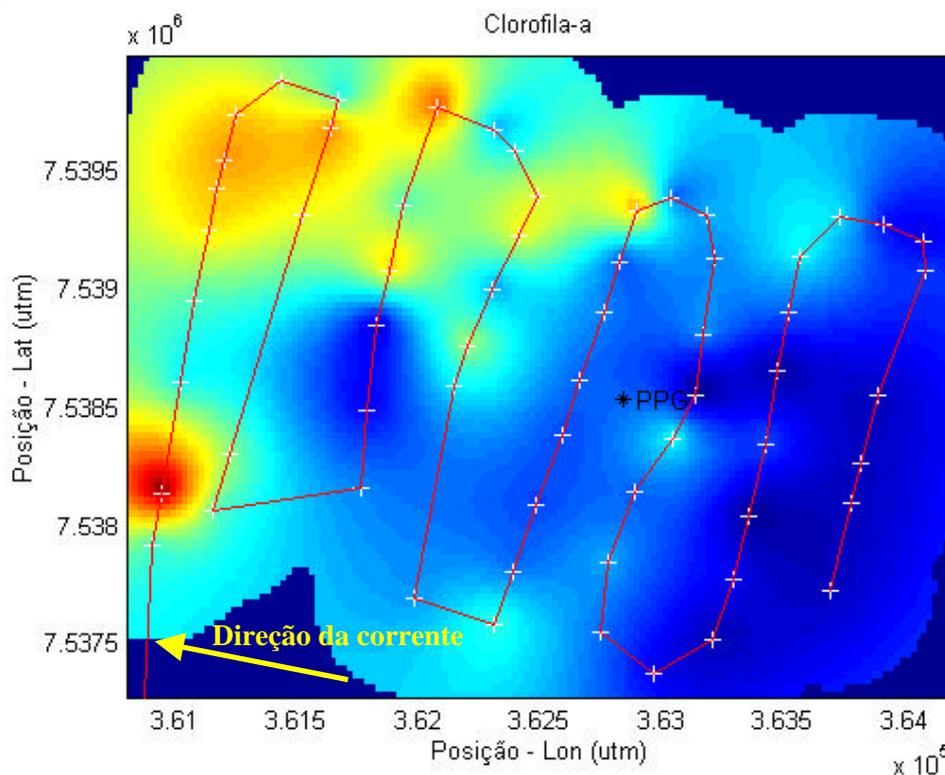


Figura 34 - Mapa sinótico gerado por *kriging* simples - valor máximo: 0,1488; valor mínimo: 0,0830.

Produzindo-se o mapa da mesma área pelo método de *kriging* ordinário, obtemos uma figura (Figura 35) visualmente similar à anterior. Entretanto, os resultados calculados são baseados nas medidas próximas a cada ponto, o que expõe a regionalização dos dados (Figura 38).

Nota-se claramente nestes mapas (Figura 34 e Figura 35) uma disposição de valores mais altos de concentração relativa de clorofila a na faixa esquerda do mapa, a jusante da plataforma, considerando a direção da corrente.

Entretanto, em virtude da diferença nos processos de cálculo dos dois mapas e dos modelos de semivariograma adotados, os valores calculados por *kriging* simples apresentam um desvio mais forte na direção da média, como se pode observar na Figura 37, diminuindo a variação espacial. Já para o mapa gerado por

kriging ordinário, os pontos inferidos representam valores balanceados pelos dados das vizinhanças, reproduzindo, assim, a variabilidade local.

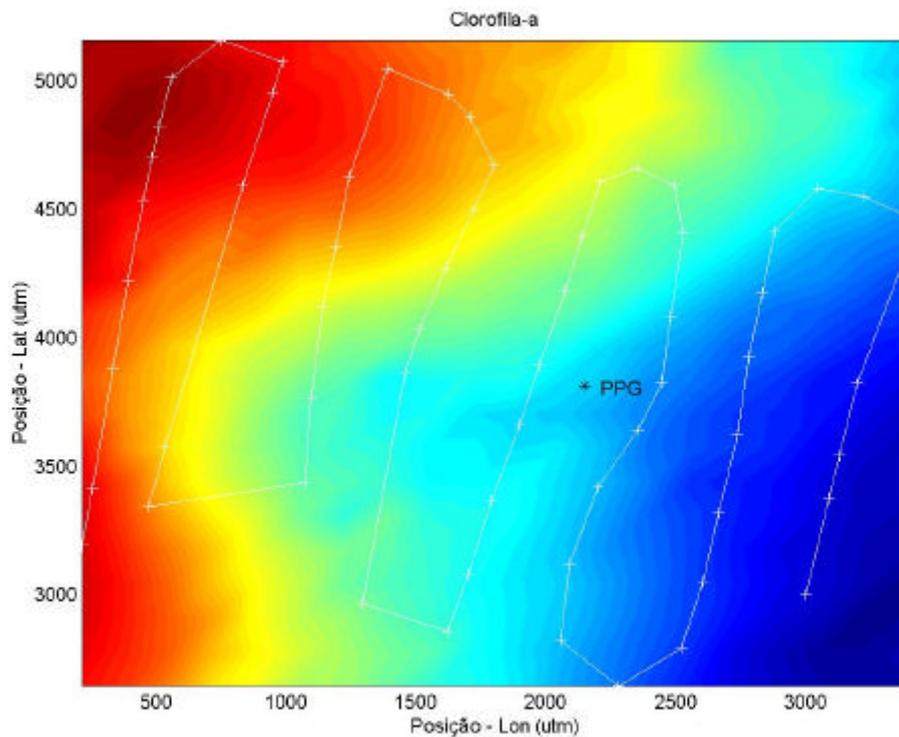


Figura 35 - Mapa sinótico de concentração relativa de clorofila a, gerado por *kriging* ordinário - valor máximo: 0,1559; valor mínimo: 0,0540.

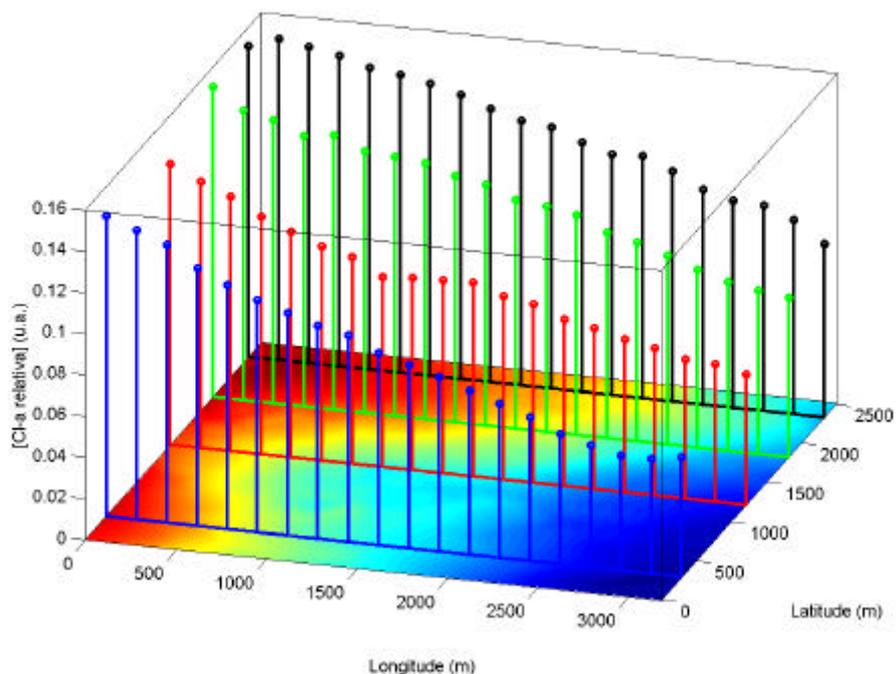


Figura 36 – Variação dos valores da concentração relativa de clorofila a interpolada (por *kriging* ordinário) para diferentes seções no mapa da Figura 35.

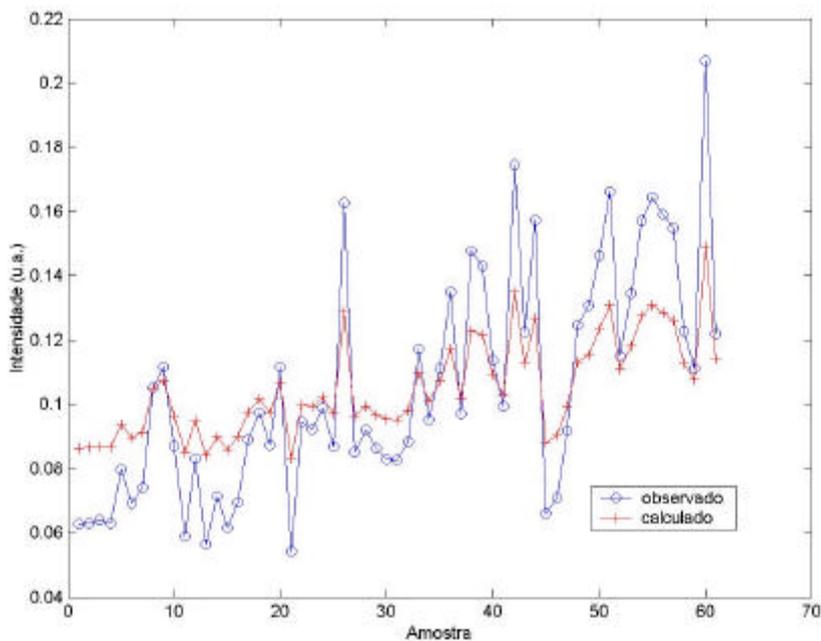


Figura 37 - Valores da concentração relativa de clorofila a obtidos a partir dos espectros (observado) e valores recalculados, para os mesmos pontos, da concentração relativa clorofila a a partir do modelo gerado por *kriging* simples (calculado).

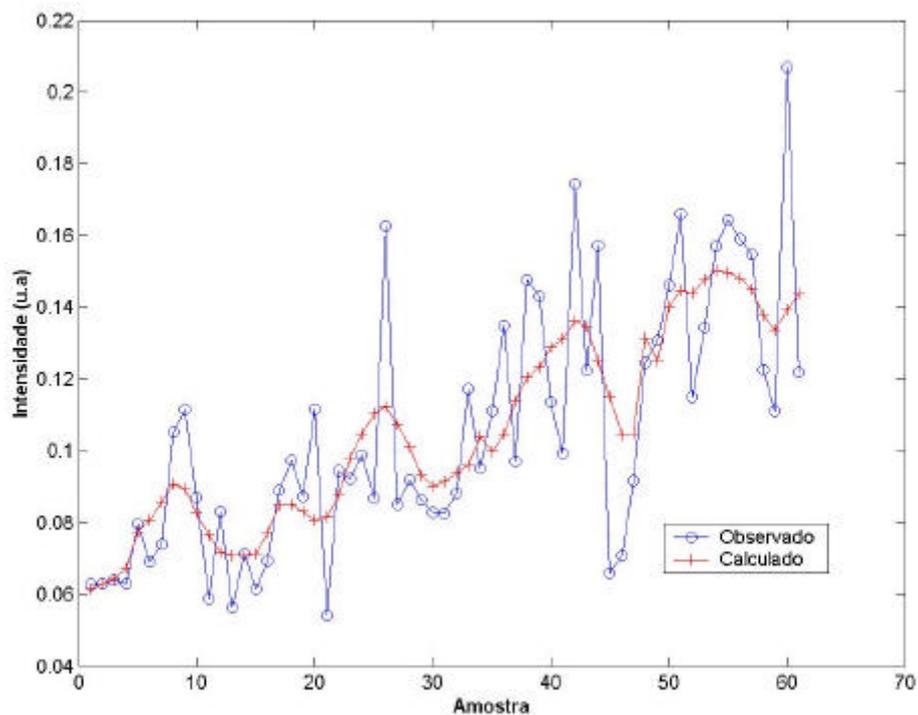


Figura 38 –Valores da concentração relativa de clorofila *a* obtidos a partir dos espectros (observado) e valores recalculados, para os mesmos pontos, da concentração relativa clorofila *a* a partir do modelo gerado por *kriging* ordinário (calculado).

A concentração relativa de Matéria Orgânica Dissolvida (MOD) também foi calculada para cada espectro obtido de acordo com o método descrito no item 4.4. Assim, pelos mesmos processos de *kriging*, simples e ordinário, foram gerados mapas de distribuição. O desvio padrão relativo das medidas de concentração relativa de MOD foi de 24,1% (27,8% menor que o das medidas de concentração Clorofila *a* relativa – DPR% de 33,4%).

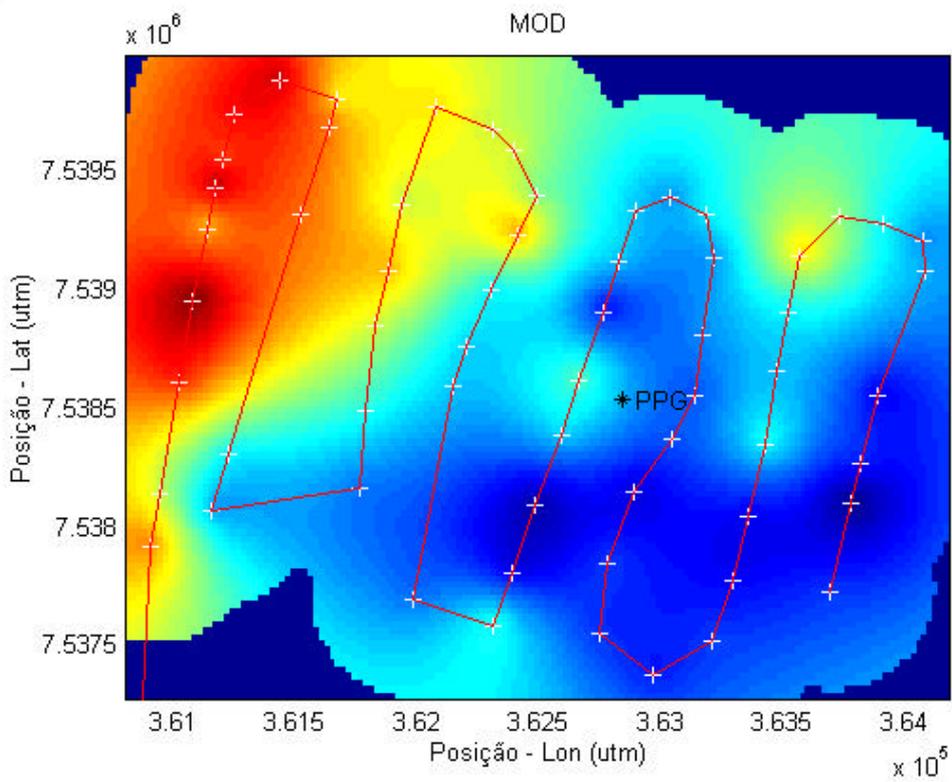


Figura 39 - Mapa sinótico de concentração relativa de MOD, gerado por *kriging* simples. valor máximo: 0,0439; valor mínimo: 0,0303.

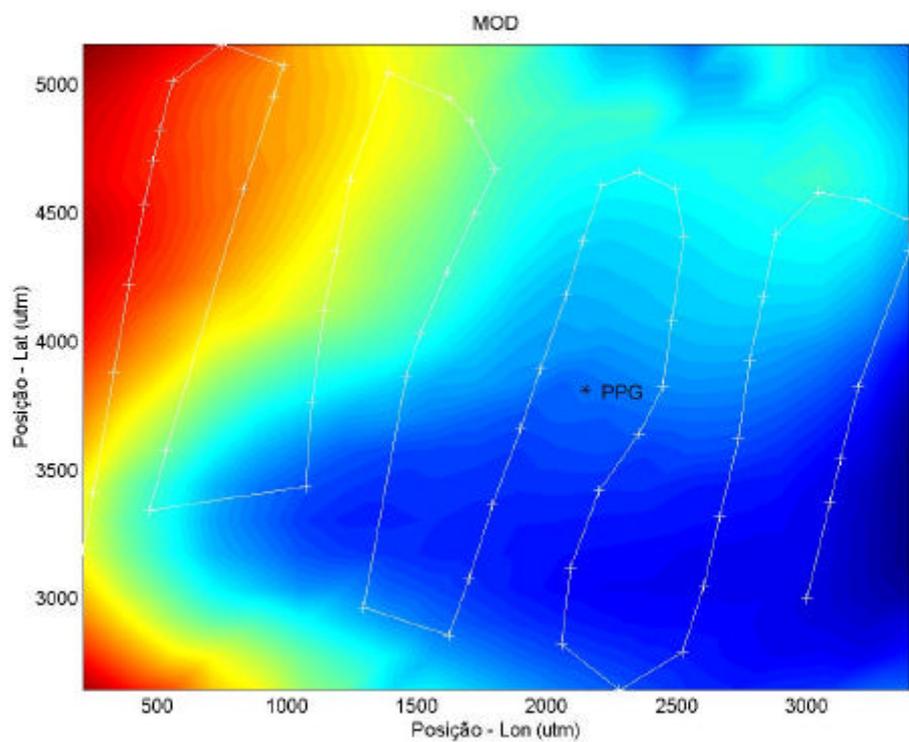


Figura 40 - Mapa sinótico de concentração relativa de MOD, gerado por *kriging* ordinário - valor máximo: 0,0552; valor mínimo: 0,0217.

Os mapas de concentração de MOD (Figura 39 e Figura 40) apresentam o mesmo padrão de distribuição dos mapas de concentração relativa de clorofila a . Como é notado comparando-se visualmente os gráficos da Figura 35 e da Figura 40, o coeficiente de correlação entre todas as medidas da MOD e da Clorofila a foi de 0,6907. Portanto, essas grandezas estão razoavelmente bem correlacionadas. Refinando a visão sobre esta correlação, foi calculado o coeficiente de correlação entre concentração relativa de clorofila a e MOD para pontos próximos (neste caso, em um raio de 550 metros) para cada ponto de medida. Deste modo, pode-se avaliar como a correlação entre essas duas grandezas varia no espaço, como vemos na Figura 42. Através deste procedimento foi possível observar que as medidas descorrelacionadas concentram-se em uma sub-área a jusante da plataforma (considerando a corrente predominante na ocasião), que cobre uma parte, mas não integralmente, a região de maior concentração relativa de clorofila a . Os pontos de anticorrelação se concentram na região de transição entre a área de menor concentração relativa de clorofila a e a área de maior concentração. Os valores dos coeficientes de correlação localizados estão coligidos na Figura 41.

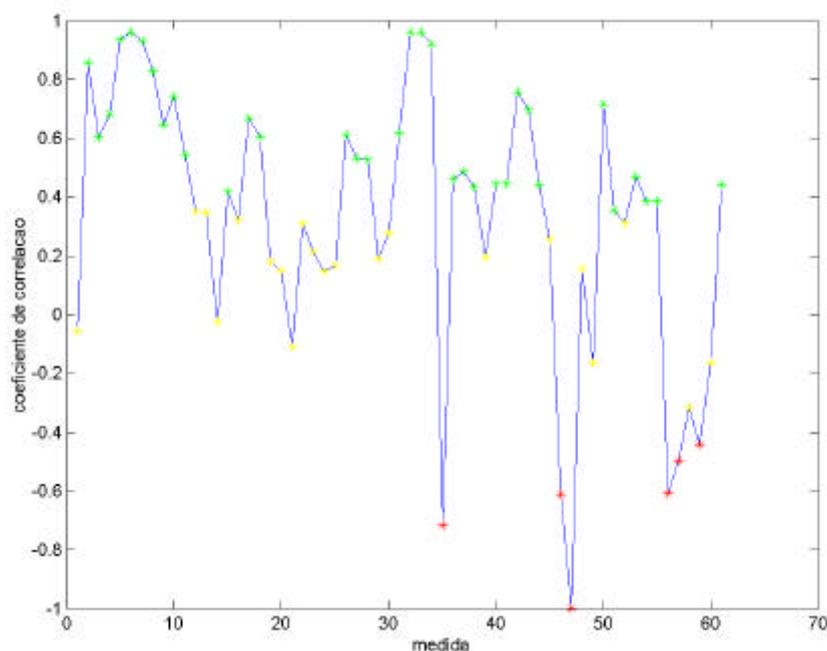


Figura 41 - Coeficiente de correlação entre MOD e clorofila a relativa, localizado. Raio de definição de proximidade: 550m.

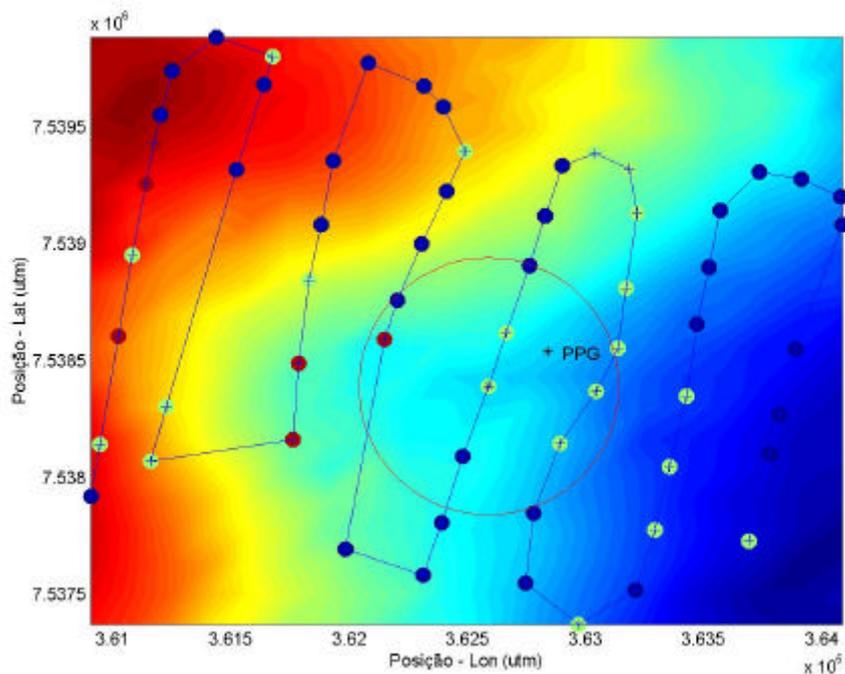


Figura 42 - Mapa de distribuição de [Clorofila a] superposto com a informação da correlação localizada entre as concentrações relativas de MOD e clorofila a . Coeficiente de correlação entre clorofila a e MOD de medidas próximas (550m, conforme o círculo). Coeficiente de +correlação: maior que 0,35 (● - correlacionados), entre 0,35 e -0,35 (● - descorrelacionados) e menor que -0,35 (● - anticorrelacionados). O fundo colorido mostra a variação da concentração relativa de clorofila a .

5.4.2. Região do emissário da estação de tratamento de efluentes de Cabiúnas

Em campanha realizada nas proximidades do emissário da estação de tratamento de efluentes de Cabiúnas (região 2, na Figura 33), durante o programa de pré-monitoramento da Bacia de Campos e Cabiúnas, 94 espectros georeferenciados foram obtidos e processados, obtendo-se os valores das concentrações relativas de clorofila a e MOD.

Para estas medidas, o desvio padrão relativo das concentrações relativas de clorofila a foi de 24,7%. É interessante observar que os últimos espectros foram obtidos quando a embarcação já se dirigia para alto mar, e seus valores são substancialmente inferiores aos observados mais próximos à costa. Excluindo-se essas medidas, o desvio padrão relativo passa a ser de 18,9%, em uma área de aproximadamente 35km². Os valores indicam uma variação menor que a variabilidade natural do fitoplâncton em alto-mar referida no item 5.3.5.1.

Levando-se em conta que esta campanha obteve dados de duas áreas com valores claramente diferenciados, a utilização da presente implementação de *kriging* simples não é adequada. Como pode ser verificado na Figura 43, os valores calculados pelo *kriging* simples ficam achatados, próximos à média.

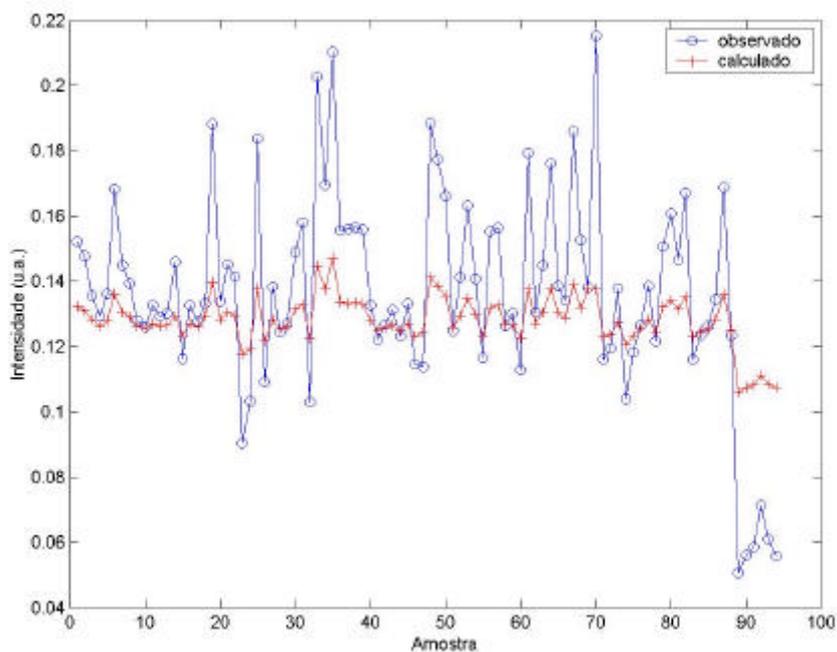


Figura 43 - Valores observados e calculados de clorofila a relativa utilizando *kriging* simples.

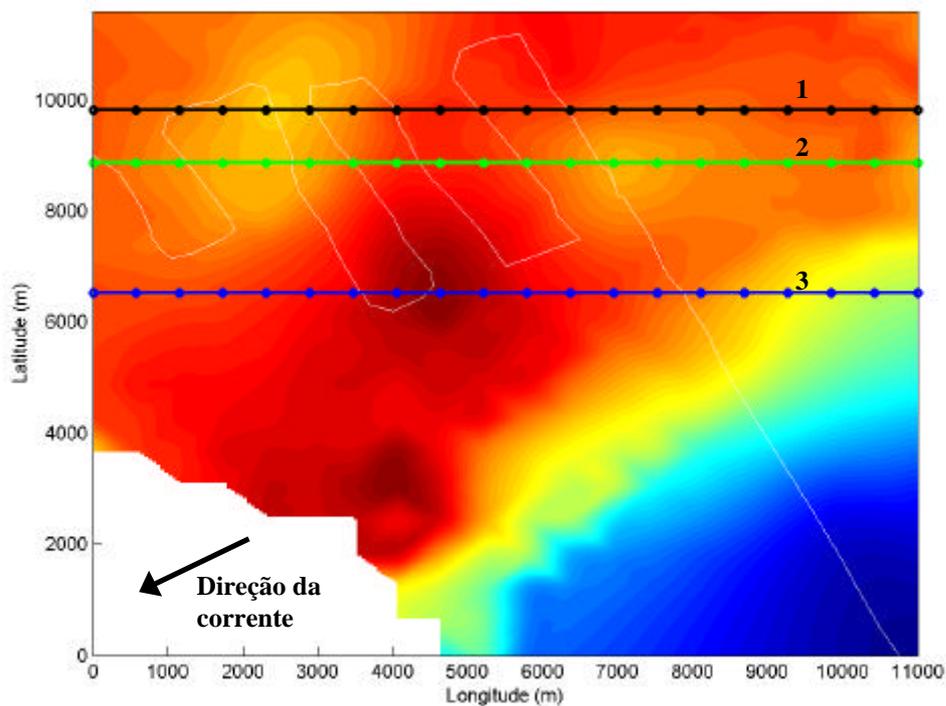


Figura 44 – Mapa de clorofila a relativa gerado por *kriging* ordinário. Os transects coloridos indicam a posição das seções utilizadas na Figura 46.

O mapa de clorofila a relativa gerado por *kriging* ordinário é apresentado na Figura 44. Os valores observados nos pontos de leitura e os re-calculados para esses pontos a partir do modelo de *kriging* adotado estão apresentados na Figura 45. Como se observa, os valores recalculados conseguem assimilar as variações regionais de concentração relativa de clorofila a .

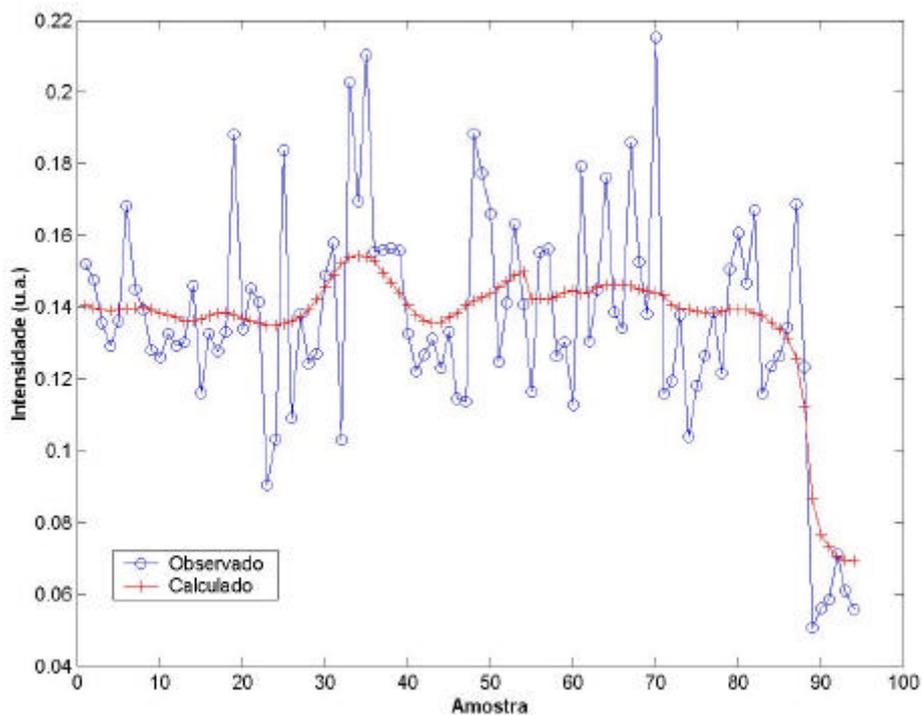


Figura 45 - Valores observados e calculados de clorofila *a* relativa utilizando *kriging* ordinário.

Os mapas aqui apresentados têm os valores de seus pontos associados a cores. Outra visualização das informações disponibilizadas está apresentada na Figura 46. As intensidades dos pontos selecionados nos *transects* traçados no mapa da Figura 44 estão plotadas nesta figura, para comparação.

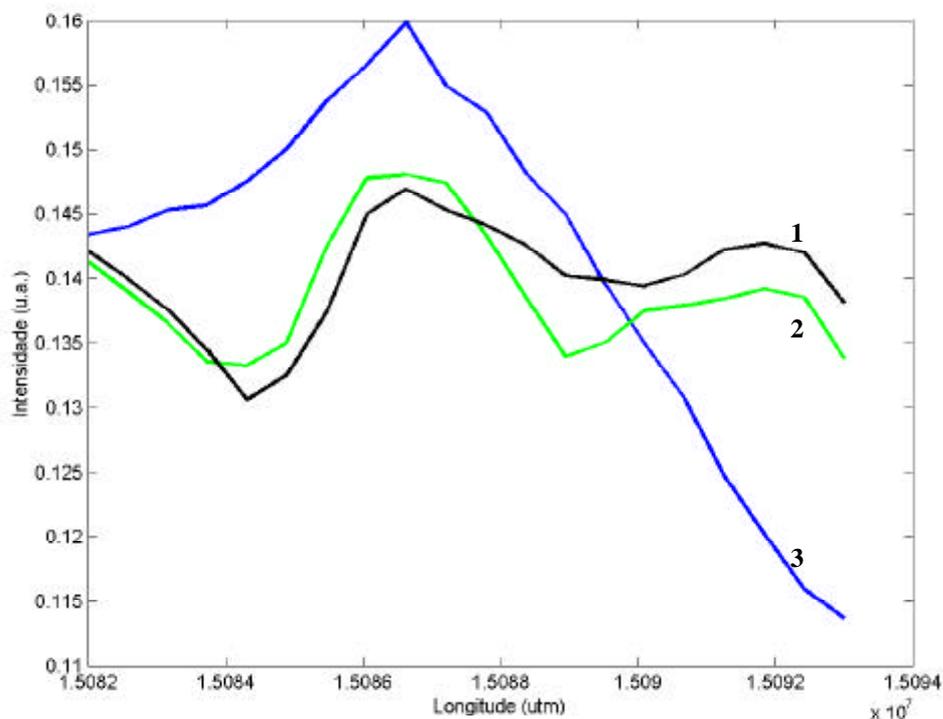


Figura 46 – Valores interpolados da concentração relativa de clorofila a para os pontos das seções ilustradas na Figura 44.

O mapa gerado apresenta, compreensivelmente, uma diminuição da concentração relativa de clorofila a no canto inferior direito, que corresponde aos pontos mais distantes da costa. É interessante notar que as cores representando os diferentes níveis de concentração relativa de clorofila a apresentam-se, na transição de águas costeiras para águas oceânicas, em faixas paralelas à costa. Há que se destacar que, apesar do pequeno número de dados na parte inferior do mapa (e estarem concentrados em uma única linha), esta inferência foi adequadamente realizada.

O *transect* de medidas realizadas da área costeira para alto-mar tem por volta de 10km. A transição efetiva de água costeira para alto-mar pôde ser observada em uma distância de 2,5km, quando o valor da concentração relativa de clorofila a baixou de um valor em torno de 0,13 u.a. para 0,06 u.a., como pode ser observado na Figura 47. Nesta figura observa-se também a variação de outro conjunto de valores, ainda na região costeira, subindo de intensidades calculadas em 0,1349 para 0,1539.

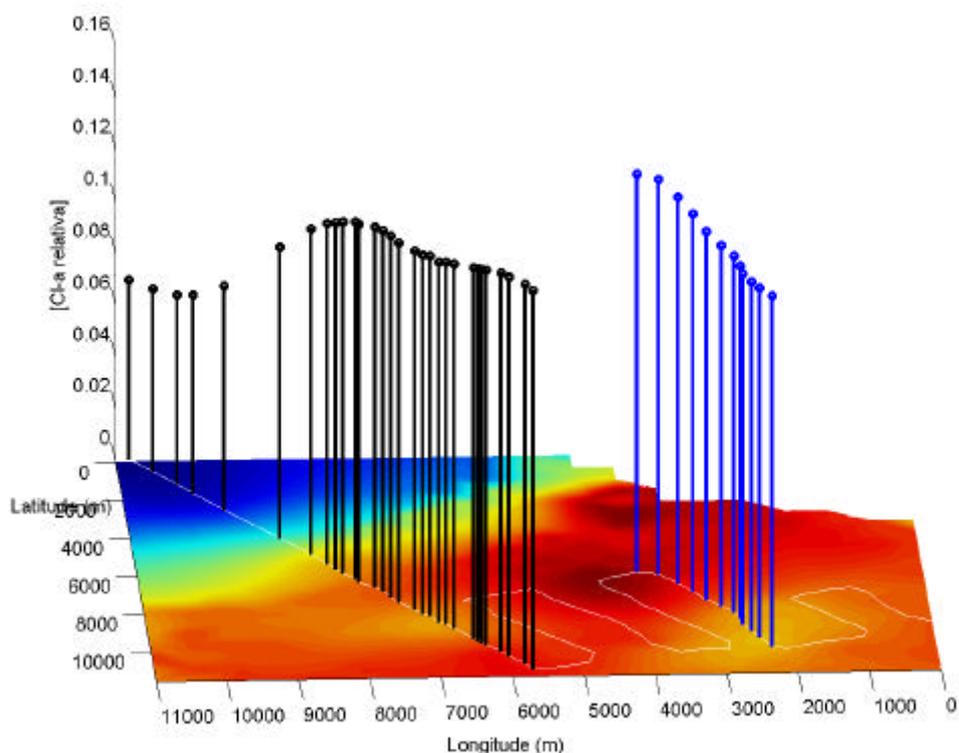


Figura 47 – Valores de concentração relativa de clorofila a interpolada para seções sobrepostas à trajetória do barco. As barras pretas acompanham a transição para região com menor população fitoplanctônica.

Nesta campanha foram realizadas coletas de amostras testemunhos, a 1m de profundidade, em 6 locais diferentes durante o percurso. As concentrações absolutas de clorofila a dessas amostras foram obtidas pelo método fluorimétrico e comparadas com as medidas de concentração relativa feitas em cada local, como mostra a Figura 49. As coletas foram realizadas nos pontos em vermelho mostrados na Figura 48.

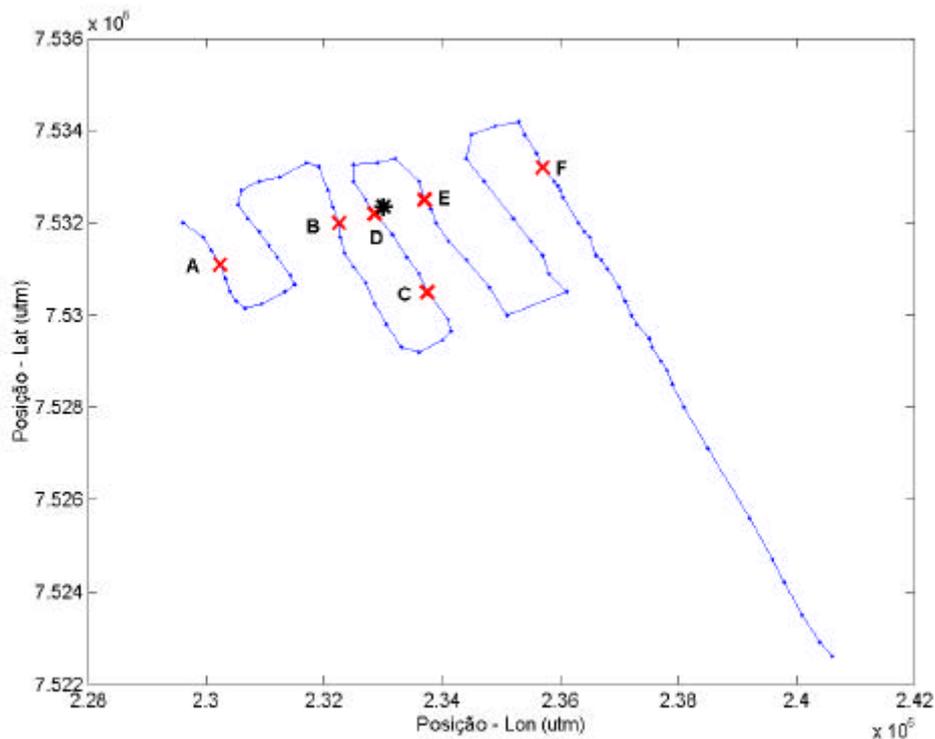


Figura 48 - Locais de amostragem de testemunhos. O asterisco mostra a posição do dispersor do emissário da estação de tratamento de efluentes de Cabiúnas.

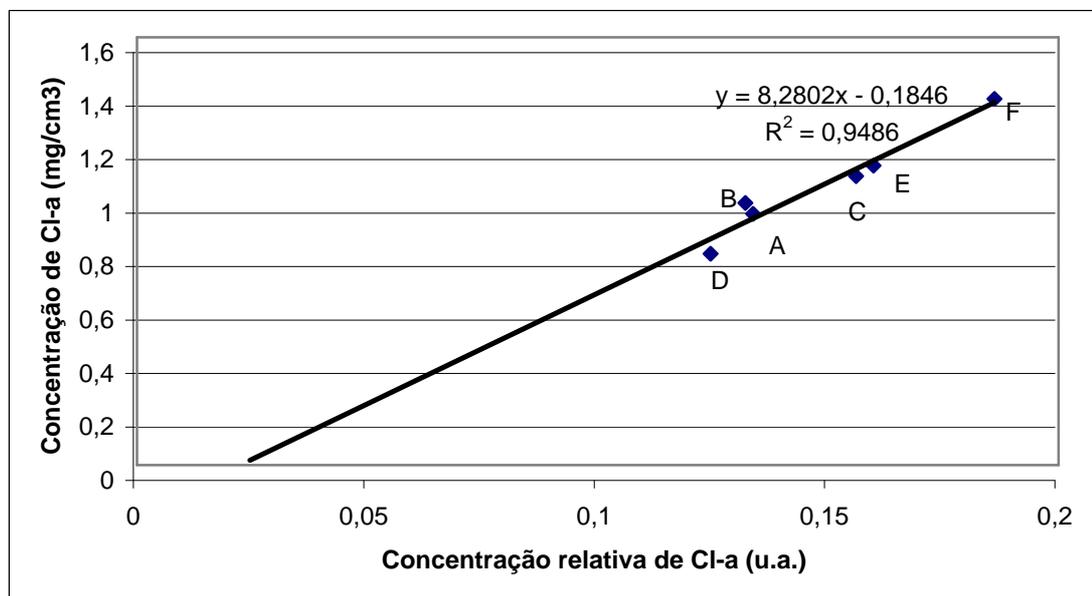


Figura 49 - Relação entre concentração relativa de clorofila *a* e concentração absoluta de clorofila *a*

Utilizando a correlação realizada na Figura 49 é possível inferir a concentração de clorofila a absoluta para a região em estudo. É importante salientar a excelente correlação linear entre os dois tipos de medida ($R^2 = 0,9486$). Esta correlação é utilizada para ajustar os valores de concentração absoluta de clorofila a ao conjunto de cores utilizado no mapa da Figura 44, apresentando um mapa ajustado (Figura 50).

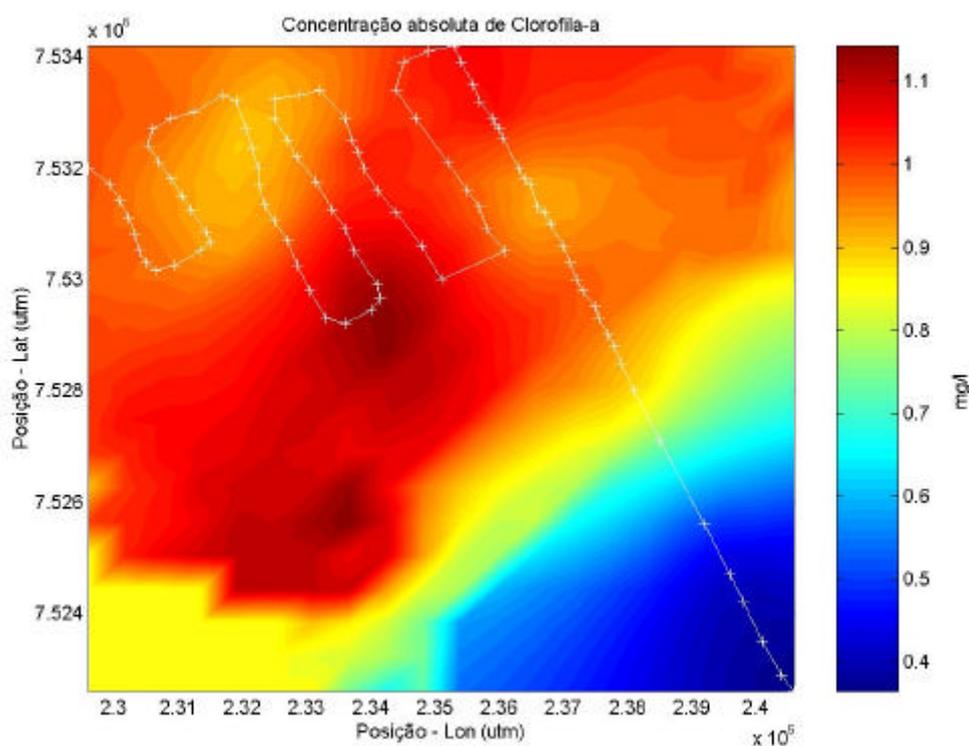


Figura 50 - Mapa de concentração absoluta de clorofila a. A barra à direita mostra a relação entre as cores apresentadas e a concentração de clorofila a

É necessário salientar, entretanto, que as amostras de testemunho foram obtidas apenas na região costeira. O gráfico da Figura 51, apresenta a intensidade do pico da banda do espalhamento Raman. A intensidade de espalhamento Raman é proporcional à coluna d'água efetiva alcançada pelo feixe do laser. Ainda que se leve em conta outras fontes de interferência na intensidade do pico do espalhamento Raman (como a variação da inclinação do feixe do laser em relação à superfície da água, que afeta a intensidade da luz que é efetivamente transmitida dentro d'água), essas interferências seguem uma tendência de homogeneização quando se realiza a média das 16 medidas. Assim, para condições experimentais e de mar razoavelmente estáveis, a comparação da intensidade do pico do

espalhamento do Raman serve de referência para avaliar a penetração do feixe do laser na água e, portanto, a transparência da água. Como se observa na Figura 51, os valores associados aos últimos espectros obtidos são significativamente maiores que os anteriores, corroborando com a idéia de transição de águas costeiras para alto-mar. Portanto, a região mais distante da costa pode ter uma composição de fitoplâncton diferente da área costeira (ou mesmo estar submetida a outra situação de stress ambiental), alterando a relação entre as concentrações absoluta e relativa de clorofila a.

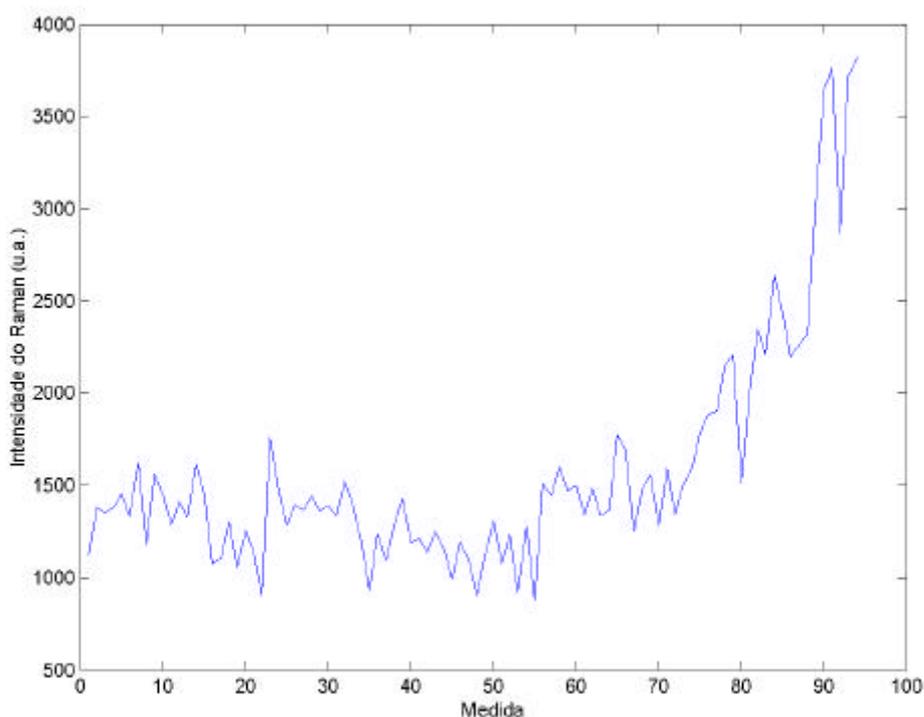


Figura 51 – Intensidade do pico do espalhamento Raman para cada uma das medidas realizadas.

O coeficiente linear da curva ajustada no gráfico da Figura 49 é maior que qualquer um daqueles ajustados no experimento com culturas de algas (todos menores que 6,5). A razão desta discrepância não pode ser desvendada a partir dos experimentos até aqui realizados. Algumas hipóteses podem ser levantadas como a presença maciça no mar, na época da campanha, de um tipo de alga com padrão de fluorescência substancialmente diferente das estudadas.

A concentração relativa de MOD também foi calculada. O desvio padrão relativo das medidas de concentração relativa de MOD foi de 15,9% e as

intensidades e os mapas (gerados por *kriging*, Figura 56) dessa grandeza apresentaram as mesmas características aqui comentadas para a concentração relativa de clorofila *a*, a saber, diminuição substancial de intensidade medida ao se distanciar da costa e intensidade mapeadas em faixas paralelas à costa. Considerando apenas as amostras próximas à costa, o desvio padrão relativo cai para 9,3%, mostrando uma região homogênea. Esta é uma consideração importante, uma vez que na região estava sendo instalada uma estação de tratamento de efluentes de indústria de extração de petróleo.

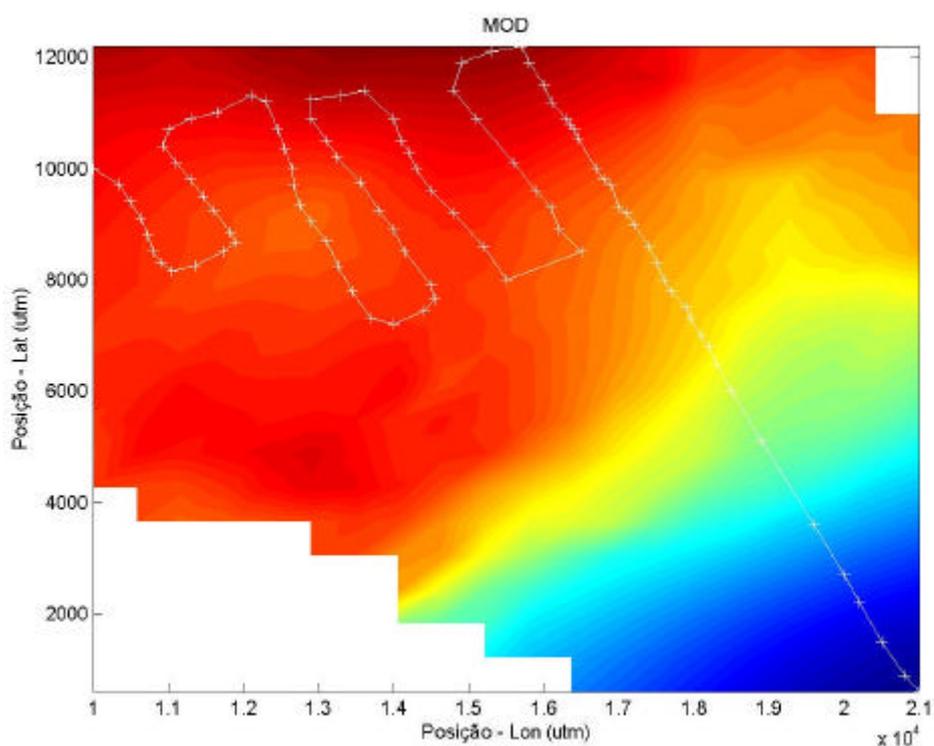


Figura 52 - Mapa de distribuição de MOD gerado por *kriging* ordinário

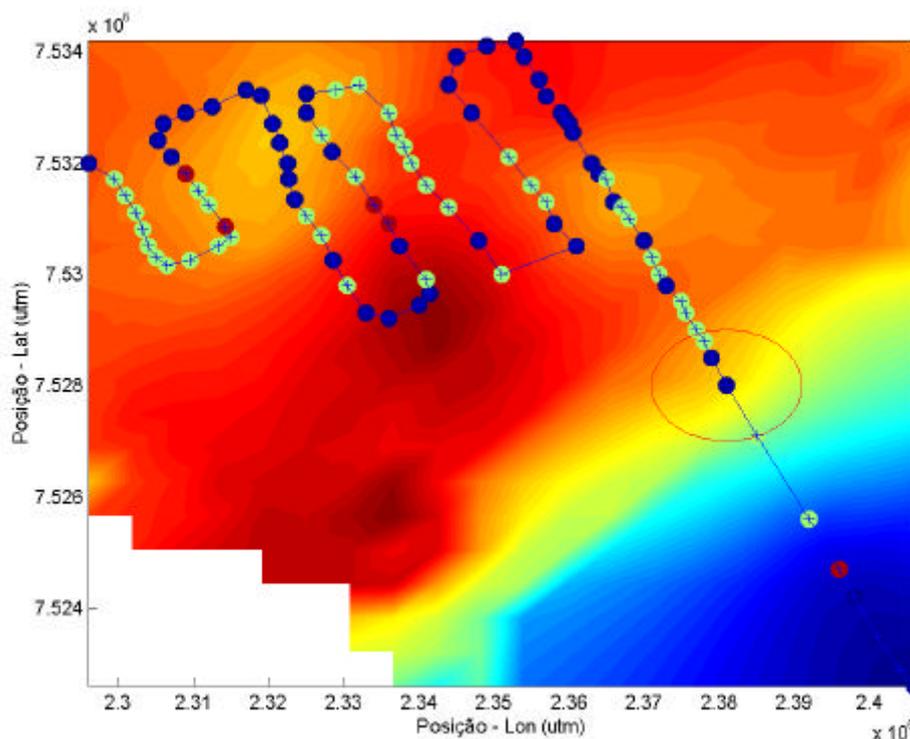


Figura 53 - Mapa de distribuição de [Clorofila a] superposto com a informação da correlação localizada entre as concentrações relativas de MOD e clorofila a . Coeficiente de correlação entre clorofila a e MOD de medidas próximas (1500m, conforme o círculo). Coeficiente de +correlação: maior que 0,35 (● - correlacionados), entre 0,35 e -0,35 (● - descorrelacionados) e menor que -0,35 (● - anticorrelacionados). O fundo colorido mostra a variação da concentração relativa de clorofila a . Correlação MOD x clorofila a relativa. Os valores dos coeficientes de correlação estão coligidos na Figura 54, com os pontos coloridos como referenciados neste mapa.

O coeficiente de correlação entre a MOD e a Clorofila a foi de 0,6821. Entretanto, considerando apenas as amostras mais próximas à costa, este coeficiente cai para 0,3570. A influência da proximidade do litoral como fonte de matéria orgânica dissolvida corroboram para o entendimento desta baixa correlação. Para as águas de alto mar, as fontes principais de MOD são o fitoplâncton e o zooplâncton, sendo que o segundo tem sua população limitada pela disponibilidade do primeiro. Assim, será mais comum encontrar valores correlacionados de MOD com Clorofila a . Para águas costeiras, outras fontes de MOD comprometem esta correlação.

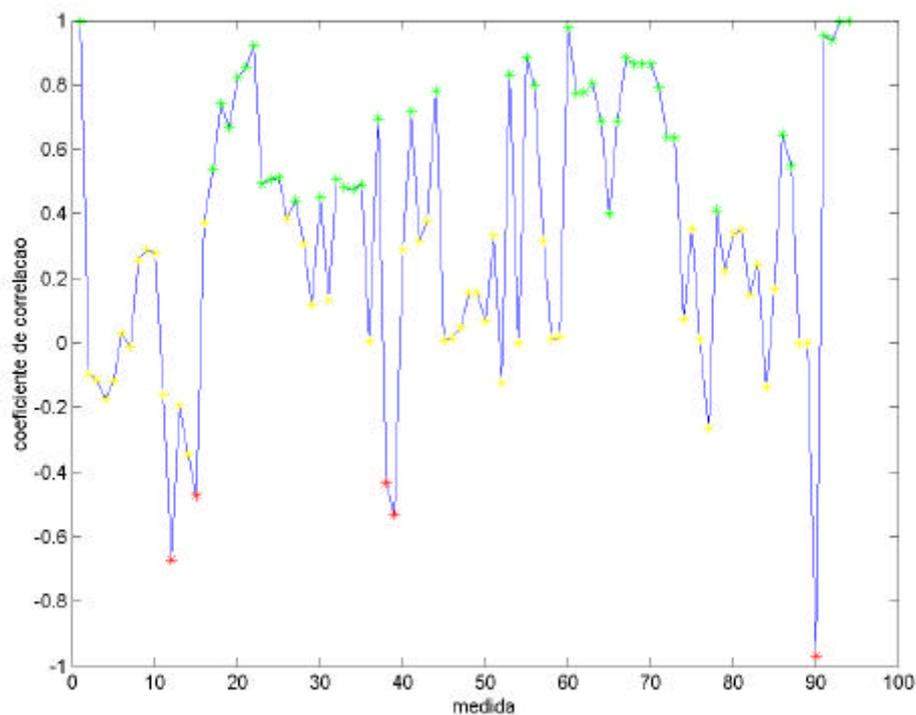


Figura 54 - Coeficiente de correlação localizada entre concentrações relativas de MOD e clorofila a. Raio de definição de proximidade: 1500m.

É possível observar, na Figura 53, regiões de correlação e descorrelação entre as concentrações relativas de clorofila a e MOD, com a formação de *spots* de correlação na área costeira, quando avaliamos os dados realizando a correlação localizada, como descrito anteriormente. A compreensão dessas distribuições não pode ser inferida pelos estudos até aqui realizados.

5.4.3. Região do emissário submarino de Ipanema

Uma campanha foi realizada próximo ao emissário de Ipanema na cidade do Rio de Janeiro. Foram efetuadas 80 medidas em uma área de aproximadamente 14km². Para essas medidas o desvio padrão relativo das medidas de concentração relativa de clorofila a foi de 17,2%.

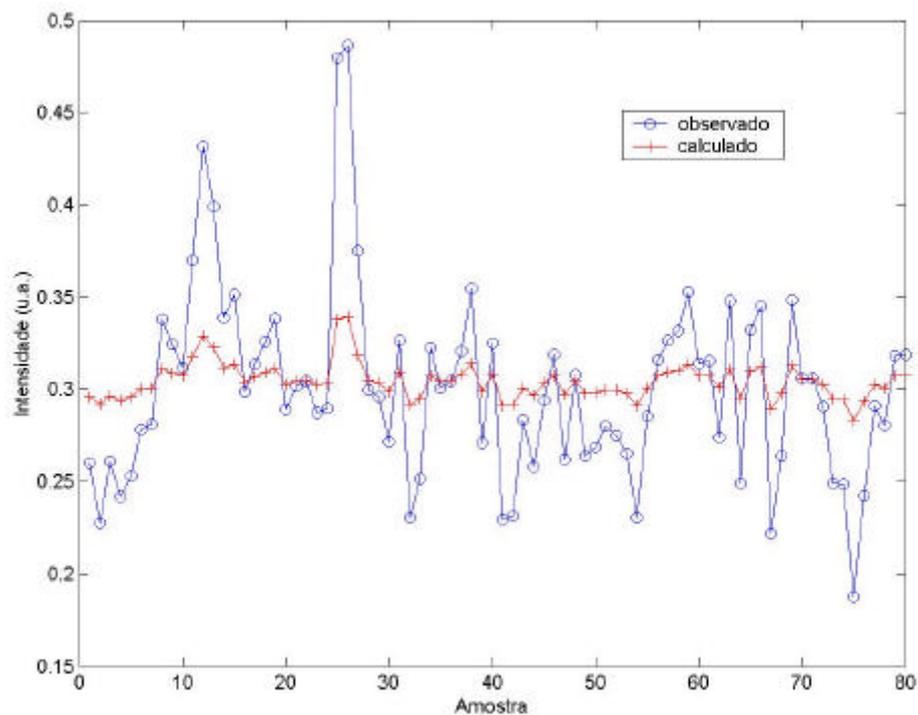


Figura 55 - Valores observados e calculados de clorofila a relativa utilizando *kriging* simples.

Para este conjunto de dados, os mapas gerados por *kriging* simples, com modelo exponencial de dados, e de *kriging* ordinário apresentaram resultados substancialmente diferentes. A utilização do modelo de *kriging* simples implementado não foi satisfatório para este caso. O *kriging* ordinário consegue capturar a presença de spots em diferentes regiões da área estudadas, como se pode observar, comparando os gráficos da Figura 55 e da Figura 56.

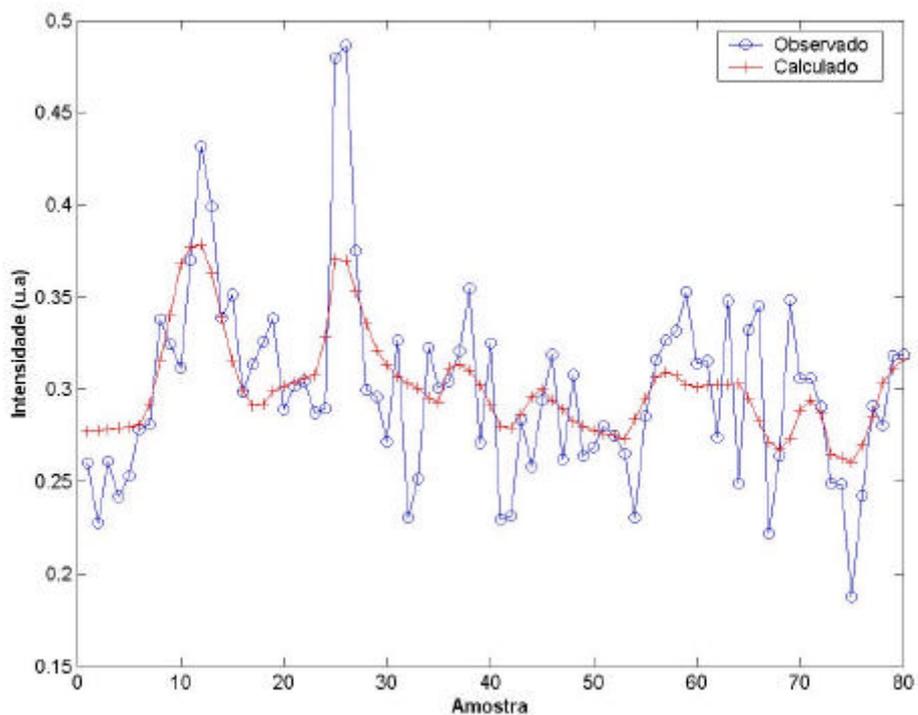


Figura 56 - Valores observados e calculados de clorofila a relativa utilizando *kriging* ordinário

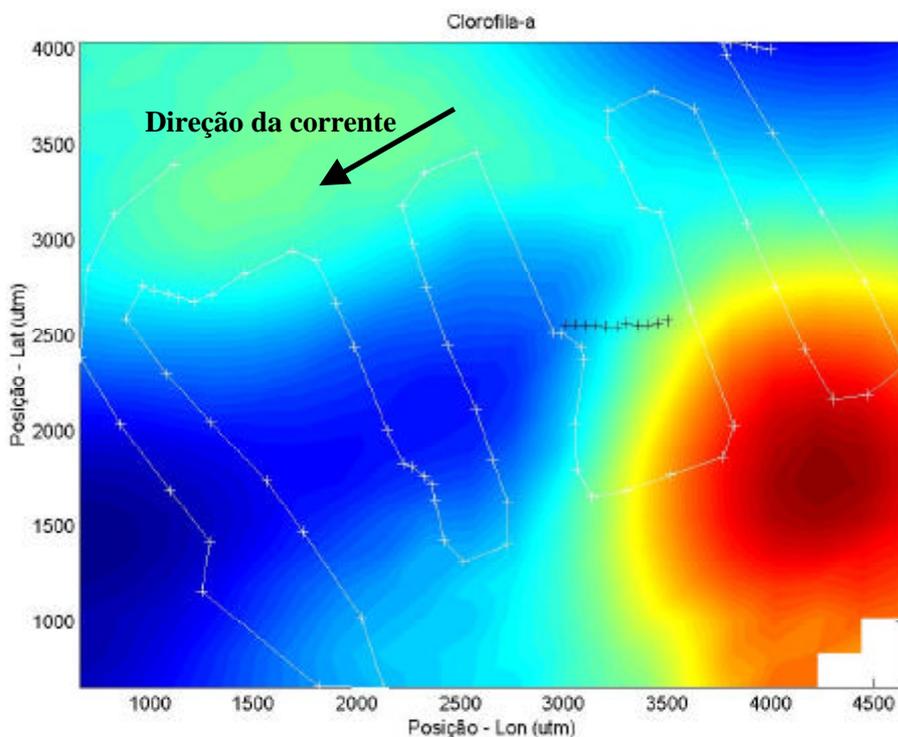


Figura 57 - Mapa de clorofila a relativa gerado por *kriging* ordinário

A concentração relativa de MOD apresentou valores altos. A média é de 0,2052, duas vezes e meia maior que a média (0,0824) dos valores de outra região costeira (próxima ao emissário de Cabiúnas). O conjunto, entretanto, mostrou-se bastante homogêneo: o desvio padrão relativo das medidas foi de 8,0%. É interessante observar que o coeficiente de correlação entre as medidas das concentrações relativas MOD e a Clorofila a foi de 0,2043. Esta baixa correlação pode ser devida ao aporte significativo de matéria orgânica de origem antropogênica pelo emissário. De qualquer maneira, já seria esperada uma maior desconexão entre as concentrações de clorofila a e MOD em águas costeiras.

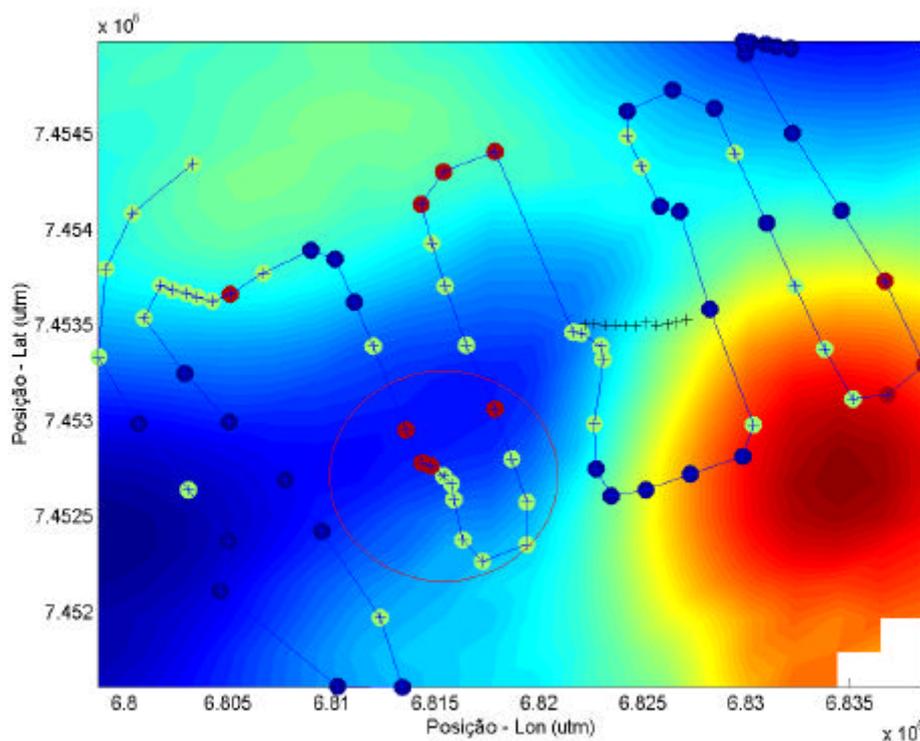


Figura 58 - Mapa de distribuição de [Clorofila a] superposto com a informação da correlação localizada entre as concentrações relativas de MOD e clorofila a . Coeficiente de correlação entre clorofila a e MOD de medidas próximas (550m, conforme o círculo). Coeficiente de +correlação: maior que 0,35 (● - correlacionados), entre 0,35 e -0,35 (● - desconrelacionados) e menor que -0,35 (● - anticorrelacionados). O fundo colorido mostra a variação da concentração relativa de clorofila a . Correlação MOD x clorofila a relativa. Os valores dos coeficientes de correlação estão coligidos na Figura 59, com os pontos coloridos como referenciados neste mapa.

Verificando o mapa de correlação espacial (Figura 58) é possível, também aqui, identificar regiões de correlação e desconexão em diferentes áreas. O

estudo desta distribuição não foi abordado neste trabalho. Para identificar, por exemplo, se a localização dos pontos de anticorrelações é estável, será necessário realizar um conjunto de campanhas no local para o desenvolvimento de uma série histórica de resultados.

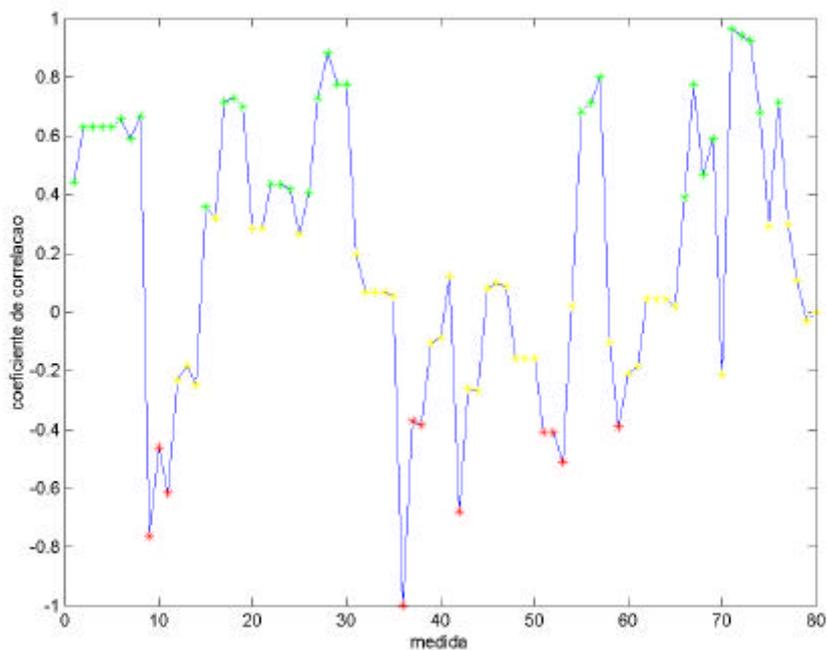


Figura 59 - Coeficiente de correlação localizado entre concentrações relativas de MOD e clorofila a. Raio de definição de proximidade: 550m.

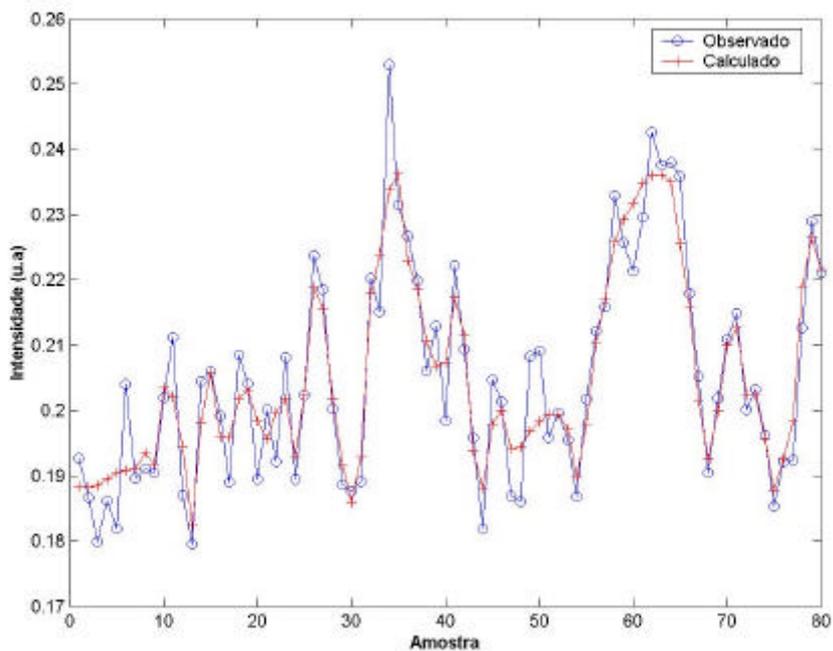


Figura 60- Valores observados e calculados de concentração relativa de MOD utilizando *kriging* ordinário.

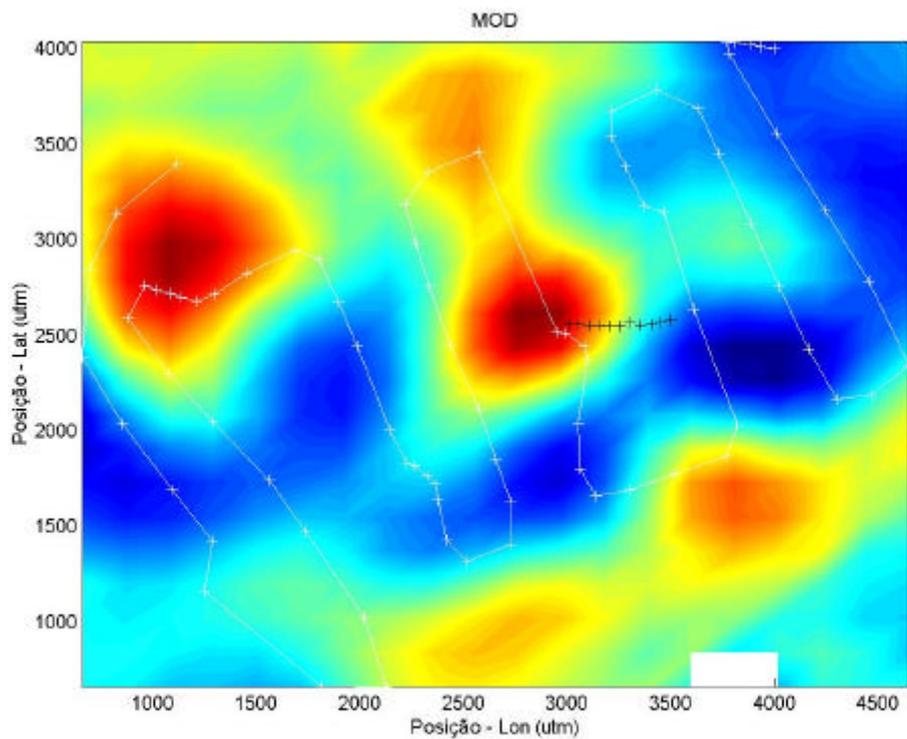


Figura 61 - Mapa de MOD relativa gerado por *kriging* ordinário

5.4.4.Região de alto mar, Baía de Campos

Em campanha na região da Baía de Campos (região 3, na Figura 33), 96 espectros foram obtidos. A distância total percorrida foi de 110km, cobrindo uma seção de aproximadamente 70km. As concentrações relativas de clorofila a e MOD foram calculadas. O coeficiente de correlação entre as medidas de concentração relativa de clorofila a e MOD foi de $-0,2896$.

A Figura 62 apresenta espectros típicos desta campanha comparado com um espectro típico de águas oligotróficas e outro típico de águas costeiras. Fica patente a ocorrência de um alto valor da banda de clorofila a em alto mar nesta campanha. Comparando a média da concentração relativa de clorofila a dos 52 primeiros dados (0,7037) com outros conjuntos obtidos em alto mar (0,0019) ou mesmo em área costeira (0,1415), verifica-se a excepcionalidade dessas medidas. Para as medidas (as últimas 25 medidas) obtidas mais próximas à costa, o valor médio da concentração relativa de clorofila a (0,2056) é similar ao obtido em outras campanhas.

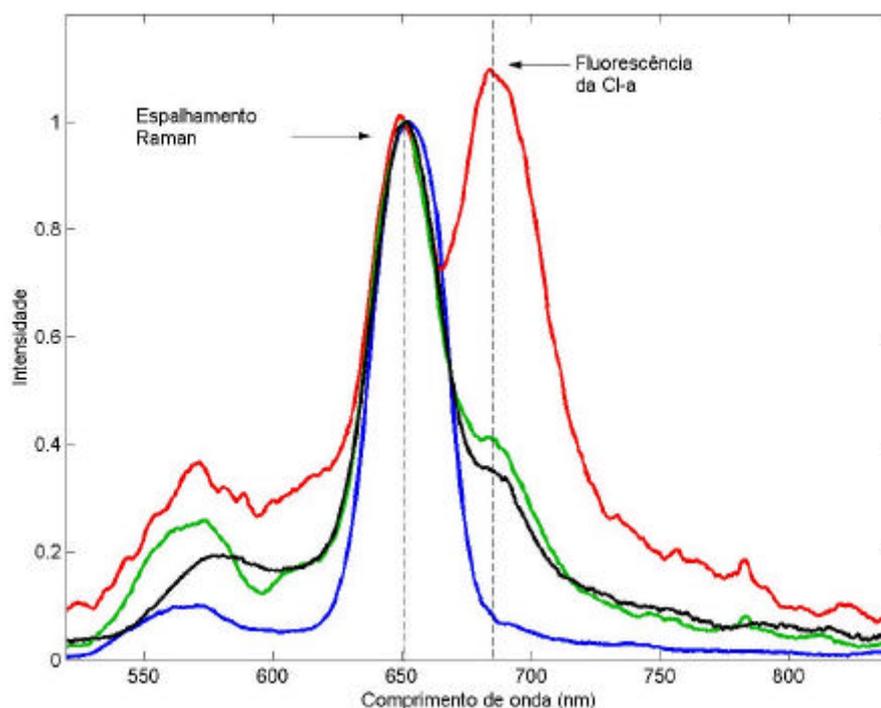


Figura 62 – Comparação de espectros. O espectro em vermelho foi obtido na região de maior fluorescência de clorofila (n. 12). O espectro em verde foi obtido nesta campanha em região mais próxima à costa. O espectro em preto é característico de áreas costeiras. O espectro em azul é característico de alto mar (águas oligotróficas).

O mapa da Figura 63 mostra o aumento da concentração relativa de clorofila a com o distanciamento da costa, em desacordo com o esperado, pois as águas de alto mar são geralmente oligotróficas. A variação dos valores da concentração relativa de clorofila a pode ser numericamente observada no gráfico da Figura 64. É notável a variação da intensidade entre as amostras n47 (1,0344) e n61 (0,3832), distantes 9,7km.

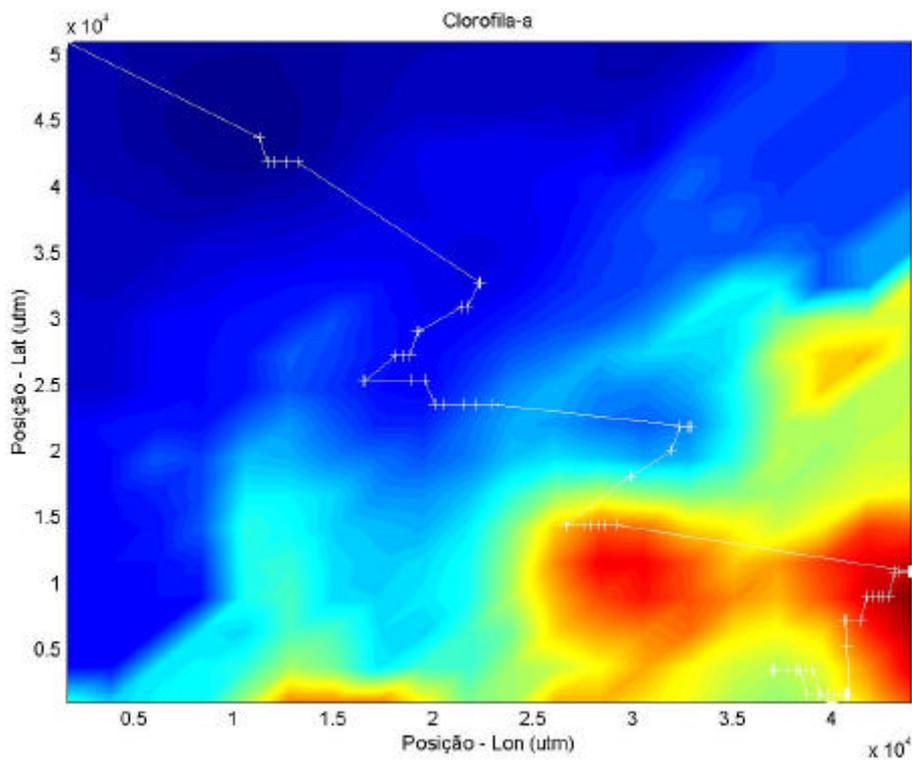


Figura 63 - Mapa de clorofila a relativa gerado por *kriging* ordinário

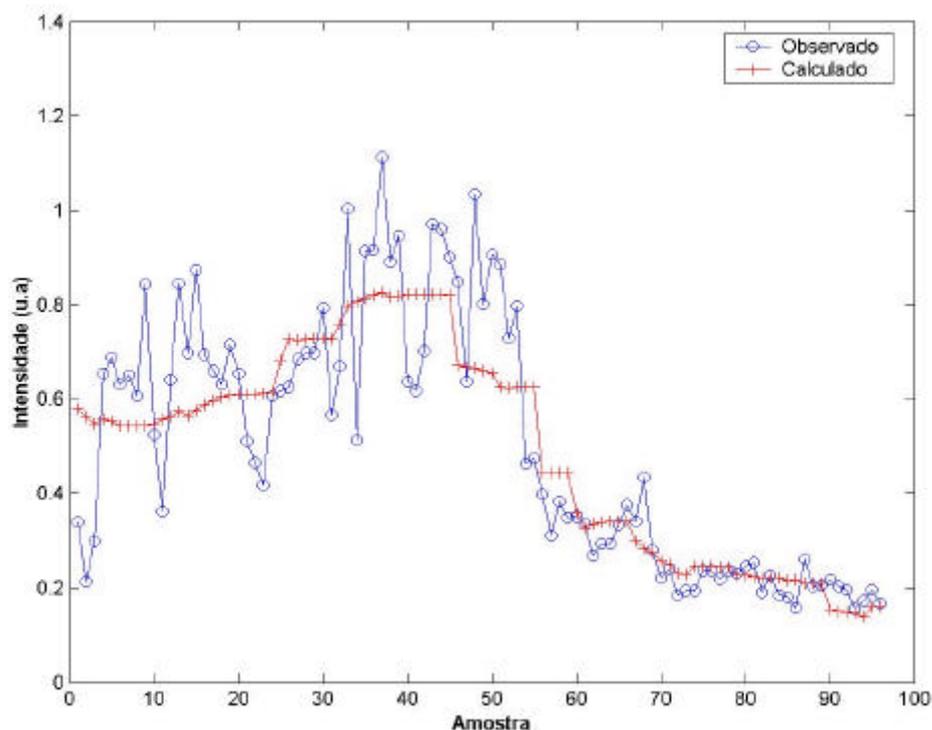


Figura 64 - Valores observados e calculados de clorofila *a* relativa utilizando *kriging* ordinário.

É interessante observar o comportamento do coeficiente de correlação localizado entre as concentrações relativas de clorofila *a* e MOD. Mesmo em alto mar a correlação é pequena ou mesmo os valores estão anticorrelacionados (Figura 65 e Figura 66). Em massas d'água com condições estáveis esta relação não é o esperado, como discutido anteriormente. Aproximando-se da costa esta correlação passa a flutuar, criando *spots* de correlação, como observado em outras áreas costeiras.

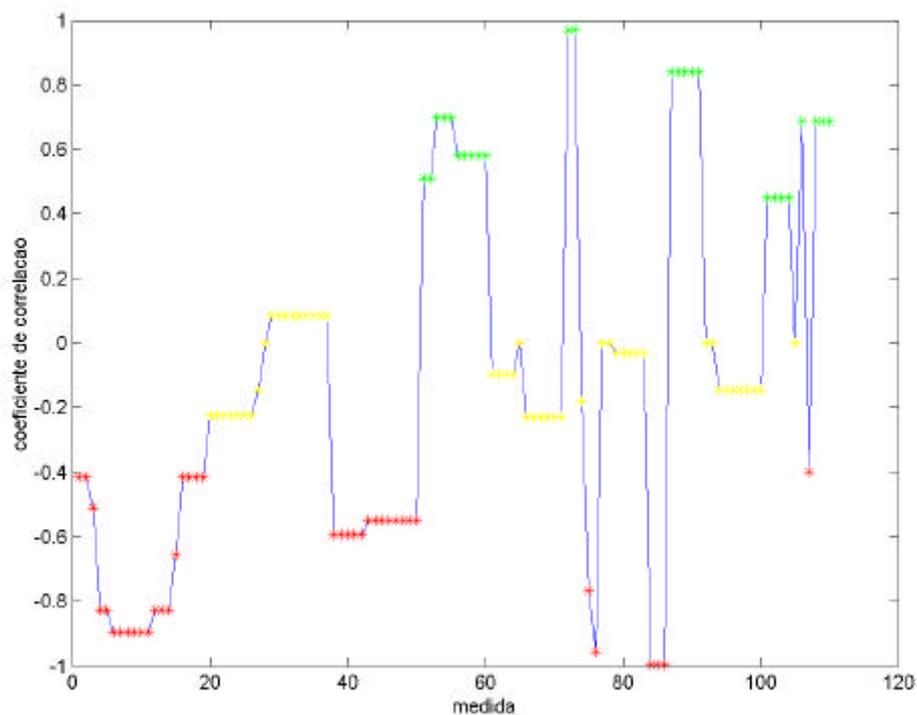


Figura 65 - Coeficiente de correlação entre MOD e clorofila a relativa, localizado. Raio de definição de proximidade: 1500m.

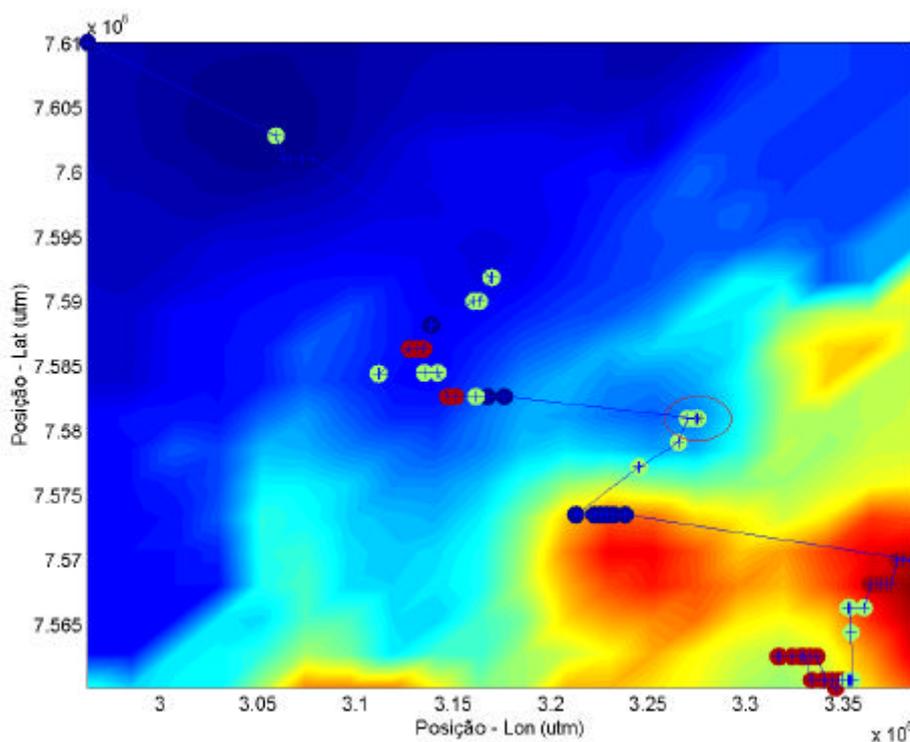


Figura 66 - Mapa de distribuição de [Clorofila a] superposto com a informação da correlação localizada entre as concentrações relativas de MOD e clorofila a. Coeficiente de correlação entre clorofila a e MOD de medidas próximas (1500m, conforme o círculo).

Coeficiente de +correlação: maior que 0,35 (● - correlacionados), entre 0,35 e -0,35 (● - descorrelacionados) e menor que -0,35 (● - anticorrelacionados). O fundo colorido mostra a variação da concentração relativa de clorofila a. Correlação MOD x clorofila a relativa. Os valores dos coeficientes de correlação estão coligidos na Figura 65, com os pontos coloridos como referenciados neste mapa.

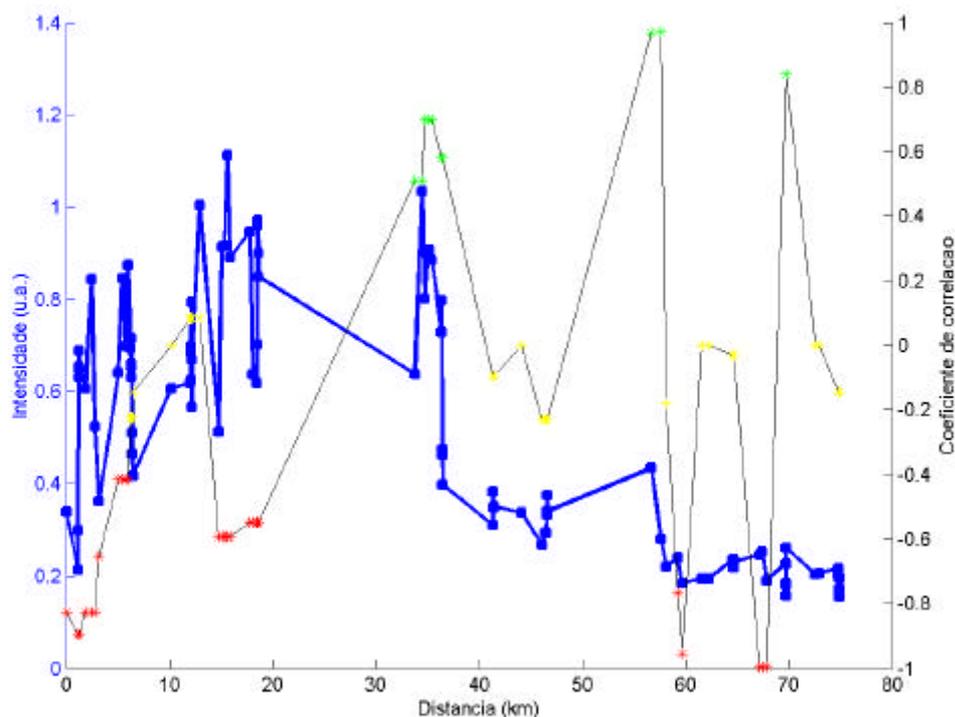


Figura 67 - Comparação entre concentração relativa de clorofila a e coeficiente de correlação localizado entre concentração relativa de clorofila a e concentração relativa de MOD. As intensidades de concentração estão associadas ao eixo vertical esquerdo (azul) e os coeficientes de correlação estão associados ao eixo direito (preto). O eixo horizontal apresenta a distância entre os locais de medição adjacentes.

Foram realizadas amostragens durante esta campanha e os valores obtidos para a concentração absoluta da clorofila a estão listados na tabela abaixo:

Tabela 5 – Concentração absoluta de clorofila a para as amostra de testemunho

Estação	[Cl-a abs] (µg/l)
P1	1,365
P2	1,320
P2 A	1,278
P2 B	1,106
P3	1,619
P3 A	1,986
P3 B	1,245
P4	3,623
P4 A	3,911
P4 B	4,067

A localização desses pontos está apresentada na Figura 68, bem como as intensidades relacionadas.

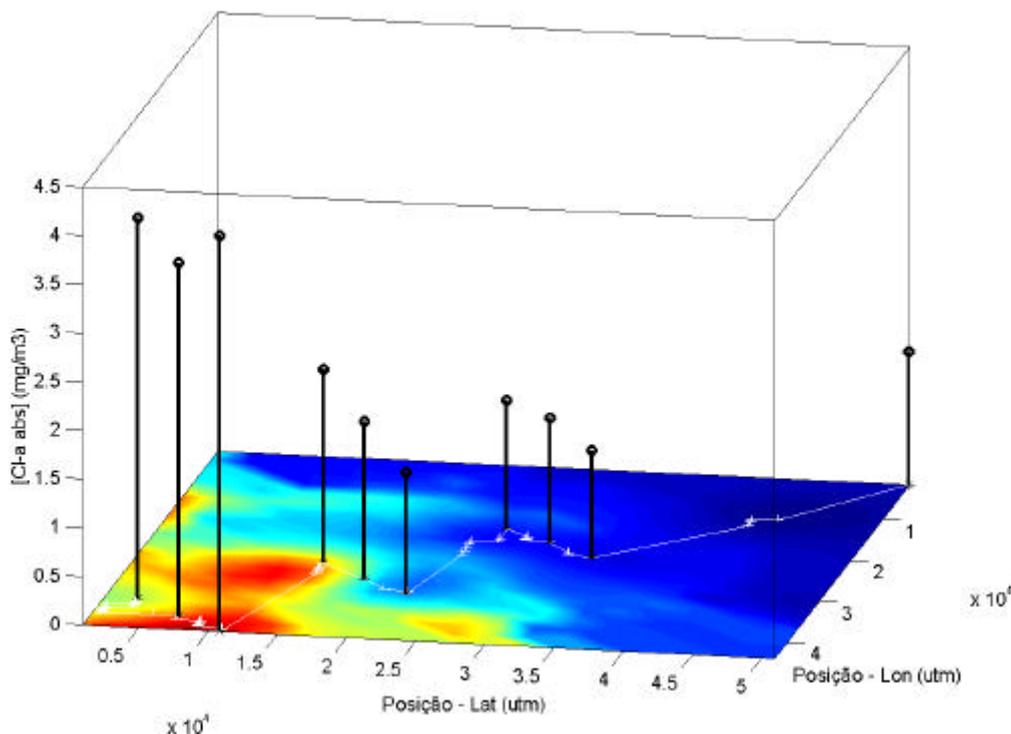


Figura 68 – Localização dos pontos de amostragem tendo como fundo o mapa da concentração relativa da clorofila a. A altura das hastes representa a intensidade da concentração absoluta de clorofila a.

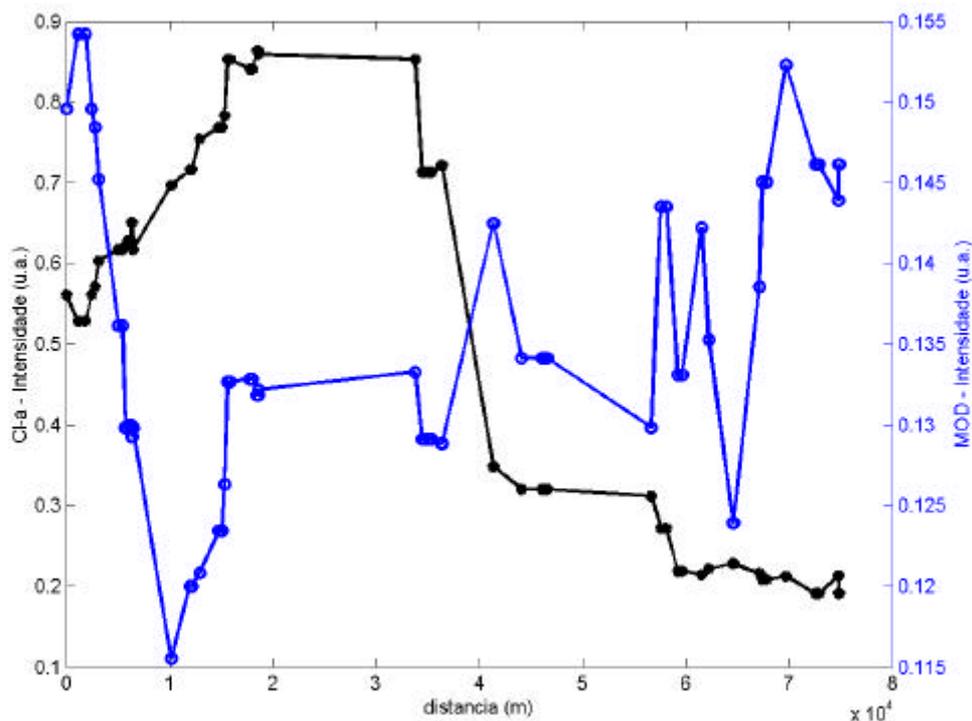


Figura 69 – Comparação entre as médias locais (raio de 2500m) das concentrações relativas de clorofila a (preto) e MOD (azul)

Os espectros desta campanha foram observados entre 14:40 e 24:00 do dia 7 de setembro de 2002. O mapa da concentração relativa de clorofila a foi comparado com uma imagem de radar da região (Figura 70), obtida na mesma ocasião (09/09/2002 às 5:10hs) por satélite. RADARSAT usa um radar de abertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*), um sensor ativo de microondas, com coleta de dados independente das condições climáticas ou de iluminação. O sensor SAR opera com comprimento de onda de 5.6cm, conhecido como *C-band*, e polarização HH (transmissão horizontal, recepção horizontal). No modo ScanSAR Narrow A, as imagens têm tamanho de 300x300km, com resolução nominal de 50m por pixel e o ângulo de incidência varia entre 19,3° e 38,9°.

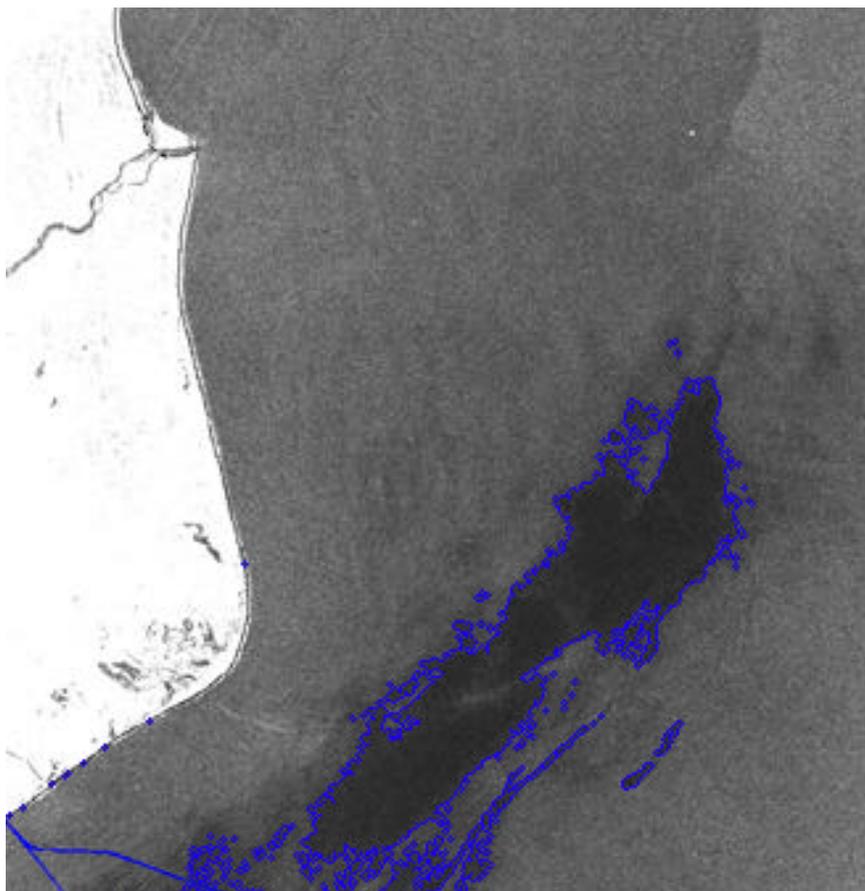


Figura 70 – Imagem RADARSAT – modo ScanSAR Narrow A - da região de estudo. As manchas escuras foram ressaltadas.

A luminosidade da imagem de radar está associada à rugosidade da superfície analisada. De acordo com representação de Huygens-Fresnel, utilizando a condição de interferência de Bragg, microondas de radar apresentam comprimento de onda da mesma ordem de grandeza das ondas oceânicas. As interferências construtivas das ondas estão relacionadas com o comprimento de onda do radar e o das ondas oceânicas na forma

$$I_o = \frac{I_r}{2 \sin \theta},$$

onde λ_o é o comprimento de onda das ondas oceânicas, λ_r é o comprimento de onda do radar e θ é o ângulo de incidência da onda do radar. Como as ondas estão em movimento, o padrão retroespalhado também irá variar espacialmente. Ou seja, o ângulo θ vai variar não só com o ângulo de incidência do radar como também com a ocorrência em cada instante das ondas longas [Clemente-Colón & Yan, 2000].

De maneira geral, portanto, quanto mais lisa for a superfície (na escala de centímetros a decímetros, no caso em estudo), maior será a reflexão especular das ondas de rádio e menor será o retroespalhamento observado pelo radar. Desta forma, a área mais escura da Figura 70 é a representação de uma região menos encapelada. Este fenômeno pode ter diferentes origens. Vale destacar especialmente dois: o regime de ventos é fator crucial para a definição de efemérides por meio de imagens de radar. Pouco vento significa pouca movimentação da superfície da água, tornando a imagem menos brilhante, independente de outras ocorrências. Da mesma forma, ventos fortes demais irão invariavelmente produzir rugosidade na escala de trabalho dos radares. Imagens adquiridas com ventos entre 3 e 8m/s são consideradas válidas para análises de artefatos na superfície dos oceanos.

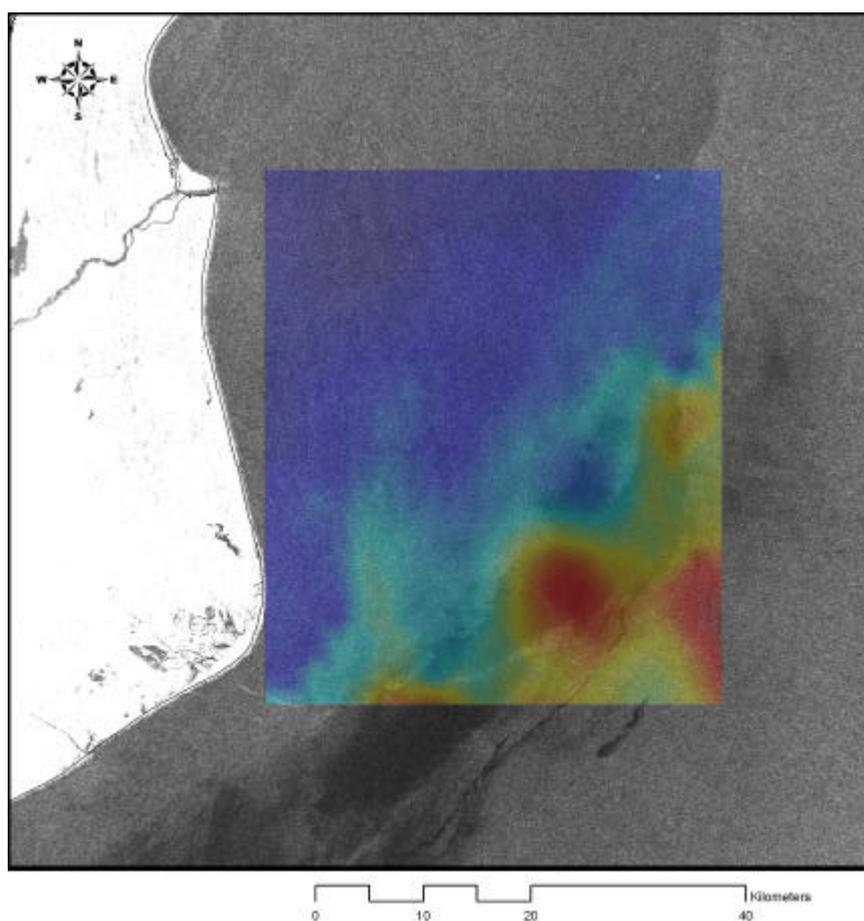


Figura 71 – Mapa de concentração relativa de clorofila a, sobreposto à imagem de radar. A razão de aspecto do mapa foi transformada para a apresentação de pixel quadrado, conforme a imagem de satélite.

Por outro lado, a tensão superficial do oceano é fator diretamente relacionado com a geração de rugosidade. Quanto maior a tensão superficial, mais “difícil” será dobrar esta superfície. Os óleos, em geral mais leves que a água, formam películas que aumentam a tensão superficial e que, portanto, se extensas o suficiente para serem discriminadas por satélite, aplainam a região analisada, gerando áreas mais escuras.

Filmes de óleo produzidos por explosões de algas (fitoplâncton) são reportados na literatura assim como sua detecção por imagens de satélite.

Portanto, é necessária informação do contexto de onde a imagem foi produzida para se evitar falsas detecções de óleo. Informações como a localização, o formato das manchas e o regime dos ventos são auxiliares na interpretação dessas imagens [Bentz & Lorenzetti, 2003].

A geração de imagens de satélite pela composição de índices a partir de bandas no espectro visível vem se tornando ultimamente uma ferramenta valiosa para essas avaliações, especialmente para ocorrências em alto mar. Entretanto, zonas costeiras ainda não têm algoritmos consistentes para avaliação de concentração de clorofila a em virtude da interferência do material orgânico dali oriundo. Além disso, regiões tropicais e equatoriais apresentam grande densidade de nuvens. As nuvens bloqueiam a radiação na região do visível e tornam indisponíveis esses dados de interesse. Neste caso em particular, as imagens geradas pelo satélite SeaWiFS na região de estudo, à época da campanha, revelaram-se inutilizáveis, pois apenas um pequeno número de pixels apresentou dados válidos.

A área deste estudo apresenta de maneira recorrente o fenômeno da ressurgência [BioRio, 1999], isto é, o afloramento das águas da corrente antártica, mais frias, carreando nutrientes para a zona eufótica. Nesta ocasião é comum a ocorrência de crescimento acelerado da população fitoplanctônica.

A associação do mapa de concentração relativa de clorofila a com a imagem de radar, sugere a ocorrência de tal fenômeno na ocasião. Sobrepondo-se o mapa de concentração relativa de clorofila a à imagem de radar (Figura 71) observa-se a concordância entre a região associada a valores excepcionalmente altos de concentração de clorofila a com a mancha escura destacada na Figura 70. É

relevante observar que a presença de filmes oleosos sobre a água não foi visualmente observada durante a campanha. Da mesma forma, os espectros do LIDAR também não apresentaram a interferência típica da ocorrência de filme de óleo, que é a atenuação do sinal do Raman na água.

Há que se ressaltar que os dados não estão perfeitamente sincronizados. Existe uma defasagem de mais de 24h entre a última aquisição do LIDAR e a imagem de satélite.