

ESTIMATIVA DE TURBIDEZ E TEMPERATURA DA ÁGUA A PARTIR DE DADOS DOS SENSORES TM E ETM+ PARA A BAÍA DE GUANABARA

RAFAEL SILVA DE BARROS ¹
CARLA BERNADETE MADUREIRA CRUZ ²
ALEXANDRE FONSECA FERNANDES DE MEDEIROS ²
VINÍCIUS DA SILVA SEABRA ²

¹IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Rua Tirol, 861 – Bl. 6 – Ap. 202 – 22750-007 – Rio de Janeiro - Brasil
rsbarros@ibge.gov.br

²UFRJ – Universidade federal do Rio de Janeiro
Rua Comendador Siqueira – 1904 - Ap. 503 – 22743-030 - Rio de Janeiro - Brasil
cmad@domain.com.br

Abstract. This work was carried through in intention to supply an extra tool to the inquiry of the coastal waters quality through the data acquisition by remote sensing. Water samples – in a total of collecting station varying from 13 to 18 - had been acquired at the depth of 50 cm in the Guanabara Bay in the same day of the pass of the Landsat 5 and Landsat 7 satellites. Three parameters (Temperature of the Water and Turbidity) beyond being mapped, had been studied through regression analysis, which had indicated correlation with the data gotten from the digital processing of two of the satellite images (which had passed through atmospheric correction and conversion from digital number to reflectance and radiance), making possible the establishment of models that, based in the TM and ETM+ sensors data, estimate the value of such parameters. The generated models had presented good performance, with significance above of 95 % and errors verified in the showed points, in general, below of 30 %. The resultant maps of the application of the models had been compared with the maps generated from the interpolation of the field data. The evaluated mistakes for the models were also mapped, using the same technique, making it possible to verify the areas in which models are more reliable and those in which its use can meet more restricted.

Keywords: remote sensing, Baía de Guanabara, water quality.

1. Introdução

Em geral, estudos de qualidade de água necessitam de uma série de dados mensurados em campo ou amostrados e levados para análise em laboratório. Porém nem sempre estes dados estão disponíveis ou há recursos para obtê-los. A modelagem de parâmetros ambientais, através da contribuição de dados oriundos de imagens de satélite, pode se tornar uma importante ferramenta para estes tipos de estudo. Braga (1988 e 1998) encontrou bons resultados ao utilizar dados dos sensores Landsat em ambientes costeiros como a própria Baía de Guanabara e a Lagoa de Araruama.

Este trabalho visa apresentar a utilização dos recursos de sensoriamento remoto a fim de se identificar a existência de relacionamentos entre dados espectrais e alguns parâmetros ambientais, indicadores da qualidade da água, obtidos em campanhas de campo concomitantes às passagens dos satélites. O principal interesse no desenvolvimento deste trabalho consiste na definição de uma metodologia para o estabelecimento de modelos estocásticos que estimem a concentração da turbidez e da temperatura da água usando os dados dos satélites Landsat 5 e 7.

2. Área de Estudo

A Baía de Guanabara (**Figura 1**), localizada entre as latitudes de $-22^{\circ} 40'$ e $-23^{\circ} 00'$ e as longitudes de $-43^{\circ} 00'$ e $-43^{\circ} 17'$, possui águas classificadas, segundo a FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente), como sendo salinas que poderiam ter como usos a recreação, turismo, lazer, navegação, atividades portuárias, abastecimento industrial,

amenização ambiental e estética, conservação da biodiversidade e pesca (comercial e artesanal). Infelizmente é bem claro que muitos destes usos estão impossibilitados ou reduzidos em função da condição ambiental apresentada pela baía nas últimas décadas.

Apesar de todos os problemas que assolam este importante ecossistema, que reúne em sua bacia hidrográfica aproximadamente 7,3 milhões de habitantes, localizados, em geral, próximos à sua margem, especialmente nas porções oeste / noroeste, a Baía de Guanabara se mantém viva e indica que há esperança de sua recuperação à medida que haja um trabalho de gestão sério. Sua manutenção se explica por suas características ambientais, tais como: sua posição geográfica que favorece a reciclagem dos elementos em virtude do clima predominante ser favorável para tal; seu formato, tamanho, batimetria e disposição em relação à costa que propiciam uma circulação e renovação de suas águas; sua bacia de drenagem, relativamente pouco extensa, o que limita o aporte de poluentes e sedimentos e que pode facilitar sua fiscalização e controle (Mayr & Paranhos, 2000).

Este tipo de ambiente costeiro está sujeito a um processo natural de assoreamento. Porém no caso da Baía de Guanabara o assoreamento vem sendo em muito ampliado pelo processo de ocupação desordenado de toda sua bacia hidrográfica. Considerando-se apenas o esgoto doméstico estimava-se uma taxa de lançamento de $17\text{m}^3/\text{s}$ de esgoto sem tratamento nas águas da baía, totalizando 465 t/dia (Canedo, 2000). Estes valores devem ser recalculados em função do início do PDBG (Programa de Despoluição da Baía de Guanabara), que prevê um tratamento primário de grande parte do esgoto lançado neste corpo d'água.

3. Metodologia

Uma vez que se desejava realizar os trabalhos de campo para a coleta das amostras de água no mesmo dia da passagem do satélite sobre a Baía de Guanabara, esta acabou constituindo-se numa etapa muito árdua desta pesquisa, fazendo-se necessários diversos ajustes até o estabelecimento de uma rotina apropriada.

A amostragem *in situ* se deu através da coleta de água, ao nível de superfície (50 cm de profundidade), entre 13 e 18 estações amostrais, como pode ser verificado na **figura 2** sendo que o posicionamento de 8 das quais coincide com o das estações monitoradas pela FEEMA há duas décadas. As campanhas de coleta foram realizadas por duas equipes divididas entre o fundo e a entrada da baía (**figura 3**). Os dois barcos utilizados pelas equipes são rápidos, a fim de permitir que toda a campanha se realize em um período de até 4 horas, sendo previsto 2 horas antes e 2 horas depois da passagem do satélite, procurando-se garantir que não haja mudança no ciclo da maré. Vale ressaltar que este problema é maior nas áreas mais estreitas da baía – onde a intensidade de corrente é aumentada – e menor nas áreas de maior seção transversal (Amador, 1997).

Foi realizado um total de 6 trabalhos de campo, porém este trabalho contou com 2 imagens apenas (21/03/99 e 28/02/2000), pois em duas oportunidades (05/03/1999 e 18/12/1999) as condições atmosféricas não estavam adequadas, uma vez que a área sobre a baía apresentava cobertura de nuvens. Nos dias 21/07/2000 e 10/11/2000 as empresas fornecedoras de imagens não possuíam produtos disponíveis para esta área.

No campo foram feitas medições com equipamentos portáteis para medição de salinidade, pH, temperatura da água e profundidade (ecobatímetro). A temperatura do ar foi medida com termômetro de mercúrio à sombra, com precisão de $0,1\text{ }^\circ\text{C}$. A profundidade secchi foi medida com um disco de 20 cm e trena. Outros parâmetros foram analisados em laboratório como será visto no próximo item.

Todo o trabalho de laboratório foi realizado pelo Departamento de Oceanografia da UERJ, sob a liderança do Professor David Zee, que está participando como parceiro nesta pesquisa.

Após a coleta das amostras – armazenadas em recipientes de 1 litro e conservadas em gelo - no campo, elas foram levadas para o laboratório para análise dos seguintes parâmetros: material em suspensão, com separação das parcelas orgânica e inorgânica; clorofila-a; amônia; turbidez; oxigênio dissolvido (em alguns campos apenas).

3.3.1. Processamento Digital de Imagens

As imagens foram georreferenciadas garantindo-se um erro médio (RMS) de até 25 metros, o que era compatível com o posicionamento em campo por GPS, que na época da primeira imagem apresentava a função S.A. (*Selective Availability*) ativa, degradando a precisão do sistema para algo entre 100 e 140 metros (Monico, 2000).

Para a correção atmosférica das imagens foram utilizados o *software* SCOTM7, específico para imagens Landsat 7, desenvolvido e gentilmente cedido pelo professor Jurandir Zullo, da UNICAMP, que ainda nos auxiliou nos momentos de dúvidas (Zullo, 1994), e a metodologia proposta por Chavez (1988), para correção da imagem Landsat 5, implementada através da criação de um programa em LEGAL no Spring.

As bandas do infra-vermelho distante (termal) não sofreram correção atmosférica pois não se dispunha de um sistema para fazê-lo. Em virtude deste fato, tais bandas foram transformadas diretamente para valores de radiância, utilizando-se o sistema *Idrisi for Windows*. Para a banda 6 do *Landsat 5* o *Idrisi 32* já há um algoritmo preparado. Para as bandas 61 e 62 do *Landsat 7* o algoritmo ainda não está implementado, tendo sido necessário informar os valores de Máximo *DN* (nível de cinza); Radiância espectral no *DN 0* e Radiância espectral no *DN 255*.

A extração dos valores dos *pixels* foi realizada através de um programa desenvolvido em LEGAL, que obtém a média dos valores lidos em uma determinada região. Esta região corresponde às estações de amostragem, considerando-se círculos de 100 metros de raio. Este valor se deve ao fato da incerteza de posicionamento por GPS apresentar-se nesta ordem de grandeza.

No desenvolvimento dos modelos foi utilizada a análise de regressão linear múltipla *stepwise*, considerando-se os dados medidos em campo para temperatura da água e turbidez, e os dados espectrais obtidos após o processamento digital das imagens. Para o parâmetro temperatura da água, testou-se o modelo proposto pela própria Landsat para conversão dos dados espectrais em valores de temperatura em Kelvin, convertendo-os em seguida para grau Celsius.

Após a definição dos modelos, os valores estimados pelos mesmos para os pontos relativos às estações de coleta foram mapeados utilizando-se dos recursos de MNT (média ponderada pelo inverso da distância ao quadrado). A estabilidade dos modelos foram testadas e seus resíduos foram verificados e mapeados usando-se as mesmas técnicas de MNT.

4. Resultados

A utilização da correção atmosférica pelos métodos de Chavez (1988), para a imagem Landsat 5, de 21/03/99, e de Zullo (1994), para a de 28/02/2000 – Landsat 7, aliada às conversões das bandas 1 a 5 e 7 para valores de reflectância e banda 6 para radiância, melhorou o desempenho dos modelos, permitindo seus usos em trabalhos futuros.

O uso de *stepwise* na regressão melhorou o desempenho dos modelos e reduziu as incertezas e resíduos dos mesmos. Esperava-se estabelecer um único modelo para as duas datas consideradas, o que não alcançou o resultado desejado, provavelmente por causa das diferenças entre os sensores, as marés e as metodologias de correção atmosférica. O reduzido número de estações amostrais, ainda que justificada em função de custos, da extensão da área e intervalo de tempo que se busca considerar, é um inconveniente para o uso de análise de regressão.

Foi testado o uso de Regimes Espaciais (Câmara, 2000), definidos a partir da interpretação da classificação digital da imagem e dos mapas gerados por interpolação. Desta forma, e levando em conta o pequeno número de estações de coleta, decidimos dividir a Baía de Guanabara em duas porções que apresentavam um comportamento distinto. As estações localizadas próximo à entrada da baía ou próximas ao canal central, ficaram agrupadas no regime espacial 1 (entrada) e as demais estações, no regime espacial 2 (fundo). Apesar de se esperar uma melhora no ajuste dos modelos, esta situação não foi verificada, tendo-se optado por considerar a baía como um todo.

A seguir são apresentados os resultados encontrados para os três parâmetros avaliados nas duas datas consideradas, chamando-se a atenção para o fato de que em 21/03/1999 a situação era de maré vazante enquanto em 28/02/2000 a maré era enchente:

- Turbidez

Imagem Landsat 5 (21/03/1999):

$Turb = -262.5701 - 11.9498 (B1) + 4,3791 (B3) + 188.3865 (B5) + 35.0399 (B6)$, com $R^2 = 0.95$, R^2 ajustado = 0.92 e significância (p-level) < 0.00004.

O mapeamento dos valores estimados pelo modelo (**figura 4B**) mostrou-se muito semelhante ao verificado na interpolação dos valores observados em campo (**figura 4A**). Como era de se esperar, os maiores valores de turbidez foram observados no fundo da baía, onde a influência fluvial é maior. O mapeamento dos erros percentuais (**figura 4C**) mostrou-se dentro de limites aceitáveis, com o maior erro (32%) ocorrendo numa estação na entrada da baía, na enseada de Botafogo. As outras 12 estações apresentaram erros abaixo de 20 %. O erro médio para toda a área foi de 10,66%.

Imagem Landsat 7 (28/02/2000):

$Turb = - 572.96 + 66.5708 (B62)$, com $R^2 = 0.72$, R^2 ajustado = 0.70 e significância (p-level) < 0.00012.

Nesta data o mapeamento dos valores estimados pelo modelo (**figura 4E**) apresentou alguma diferença na parte do fundo da baía, quando comparado com a interpolação dos valores observados em campo (**figura 4D**), ainda que em linhas gerais haja grande semelhança entre os mesmos. O erro percentual médio foi mais alto (23,18%), com um extremo de 86,27 % de erro numa estação localizada no fundo da baía (**figura 4F**). Outras três estações apresentaram erros entre 36 e 38 %. De forma geral este modelo apresenta uma maior confiabilidade para as porções central e de entrada da Baía de Guanabara.

- Temperatura da água

Como mencionado anteriormente, para a temperatura da água foi testado o uso do modelo sugerido pela própria Landsat, porém foram encontrados resultados inferiores aos obtidos a partir da modelagem por regressão, tendo-se, por isso, dado preferência a esta última forma.

Imagem Landsat 5 (21/03/1999):

$T_{\text{agua}} = - 153.115 + 23.22813 (B6) + 1.900882 (B3) - 6.17583 (B1) + 73.78739 (B5) - 3.57679 (B4) + 0.952768 (B2)$, com $R^2 = 0.90$, R^2 ajustado = 0.80 e significância (p-level) < 0.008.

Este foi o parâmetro que apresentou o melhor desempenho, com erros percentuais muito baixos em toda a baía. O resultado do mapeamento dos dados obtidos em campo (**figura 5A**) e dos estimados pelo modelo (**figura 5B**) guardam bastante semelhança e os erros (**figura 5C**) se encontraram sempre abaixo de 4,9 %, valor este verificado na entrada da baía.

Imagem Landsat 7 (28/02/2000):

$T_{\text{agua}} = - 165.7597 + 21.96557 (B61) - 4796.2599 (B4) + 209.9963 (B1)$, com $R^2 = 0.90$, R^2 ajustado = 0.87 e significância (p-level) < 0.00002.

Novamente o modelo apresentou um excelente desempenho representado de forma muito próxima a verificada pelo mapeamento dos dados obtidos em campo (**figuras 5D e E**), e

apresentando erros percentuais (**figura 5F**) muito baixos (menores que 3,70 %). Ao contrário do mapeamento com os dados estimados pelo modelo para o sensor Landsat 5, os erros mais altos se espelharam por 4 pontos distribuídos pela baía.

5. Conclusão

De forma geral este tipo de modelagem apresenta uma boa potencialidade para a otimização de estudos na linha de qualidade de água em ambientes costeiros, sendo imprescindível para tal que os dados de campo sejam obtidos com os menores intervalos de tempo possível entre sua aquisição e a passagem do sensor sobre o local.

Um possível ganho para a segurança dos modelos, além do uso de outras imagens dos mesmos sensores, seria a consideração de dados de radiossondagem na correção atmosférica, eliminando ao máximo o efeito dos diversos componentes da atmosfera.

6. Bibliografia

- AMADOR, E. S. (1997). Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza. Edição do Autor. Reprodução e Encadernação: Reproarte Gráfica e Editora Ltda. Rio de Janeiro. Brasil. 539 pp.
- BARROS, R. S. (2002). Estimativa de Parâmetros Ambientais com o Suporte do Sensoriamento Remoto – Estudo de Caso: Baía de Guanabara. Dissertação de Mestrado – IGEO / UFRJ. 142 pp.
- BRAGA, C. Z. F. (1988). Utilização de Imagens dos Satélites Landsat 5 e NOAA 9 na identificação de parâmetros Físico-Químicos da Água na Baía de Guanabara. São José dos Campos. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. (INPE-4761-TDL/349).
- BRAGA, C. Z. F. (1998). Sensoriamento Remoto Aplicado ao Estudo da Concentração de Clorofila-a, Transparência e Profundidade da Água na Lagoa de Araruama, RJ. Tese de Doutorado. INPE. (INPE-7261-TAE/41).
- CÂMARA, G. (2000). Notas de Aula do Curso Análise Espacial de Dados Geográficos. Disciplina do curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto do INPE. São José dos Campos - SP.
- CANEDO, E. (2000). Despoluindo a Baía de Guanabara. A situação Ambiental e a Gestão. Gestão Sustentável da Baía de Guanabara - Seminário Internacional –Centro Internacional de Desenvolvimento Sustentável – Escola Brasileira de Administração Pública – Fundação Getúlio Vargas.
- CHAVEZ, P. S. (1988). An Improved Dark-object Subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24:459-479.
- MAYR, L. M.; PARANHOS, R. (2000). Baía de Guanabara – Qualidade das Águas. Gestão Sustentável da Baía de Guanabara - Seminário Internacional –Centro Internacional de Desenvolvimento Sustentável – Escola Brasileira de Administração Pública – Fundação Getúlio Vargas.
- MONICO, J. F. G. (2000). Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora UNESP. 287p.
- ZULLO, J. Jr. (1994). Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações. Tese de Doutorado. Unicamp. Campinas – SP.

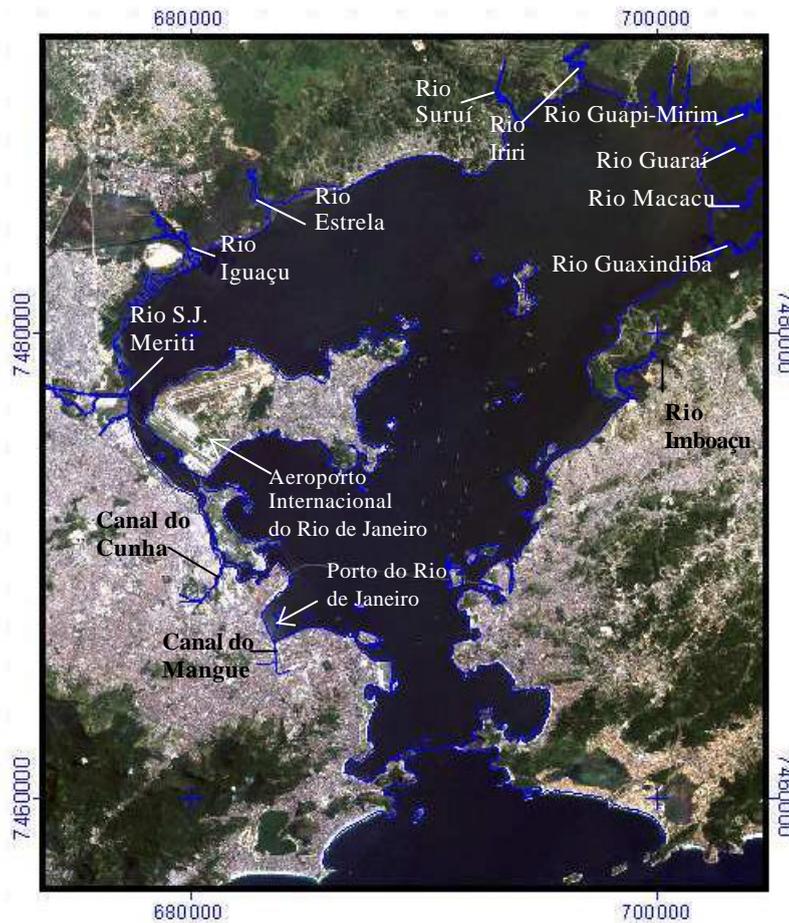


Figura 1: Baía de Guanabara e algumas feições de destaque

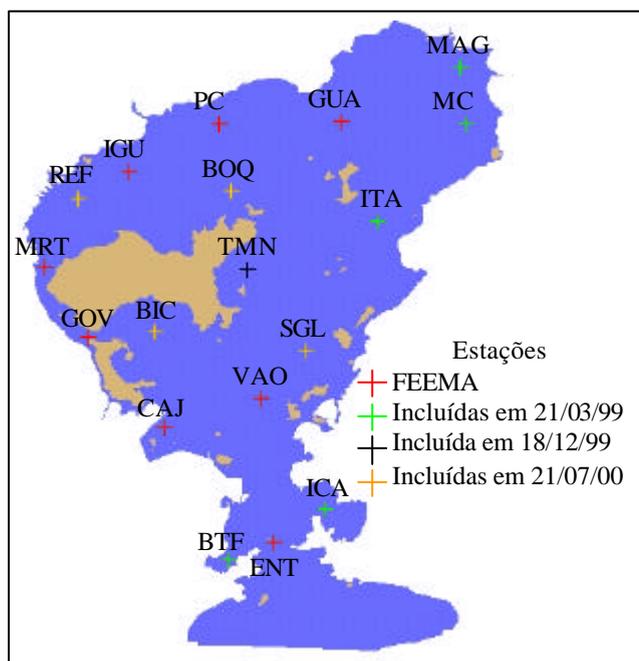


Figura 2: Localização das estações de coleta

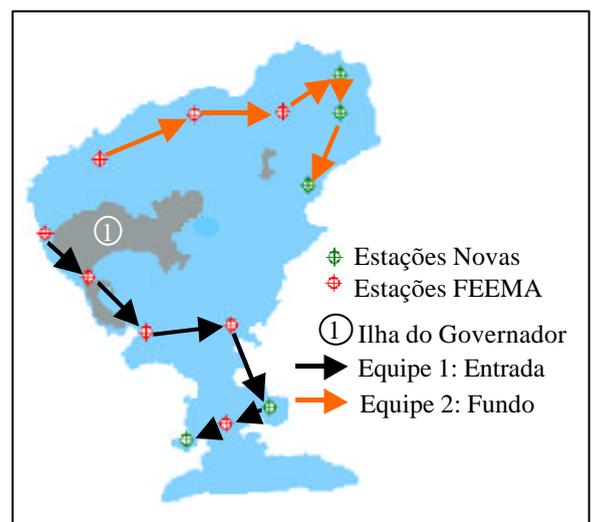


Figura 3: Campanha de coleta de 21/03/99. Duas equipes divididas entre fundo e entrada da baía, percorrendo uma rota especificada em função da maré e da hora de passagem do satélite.

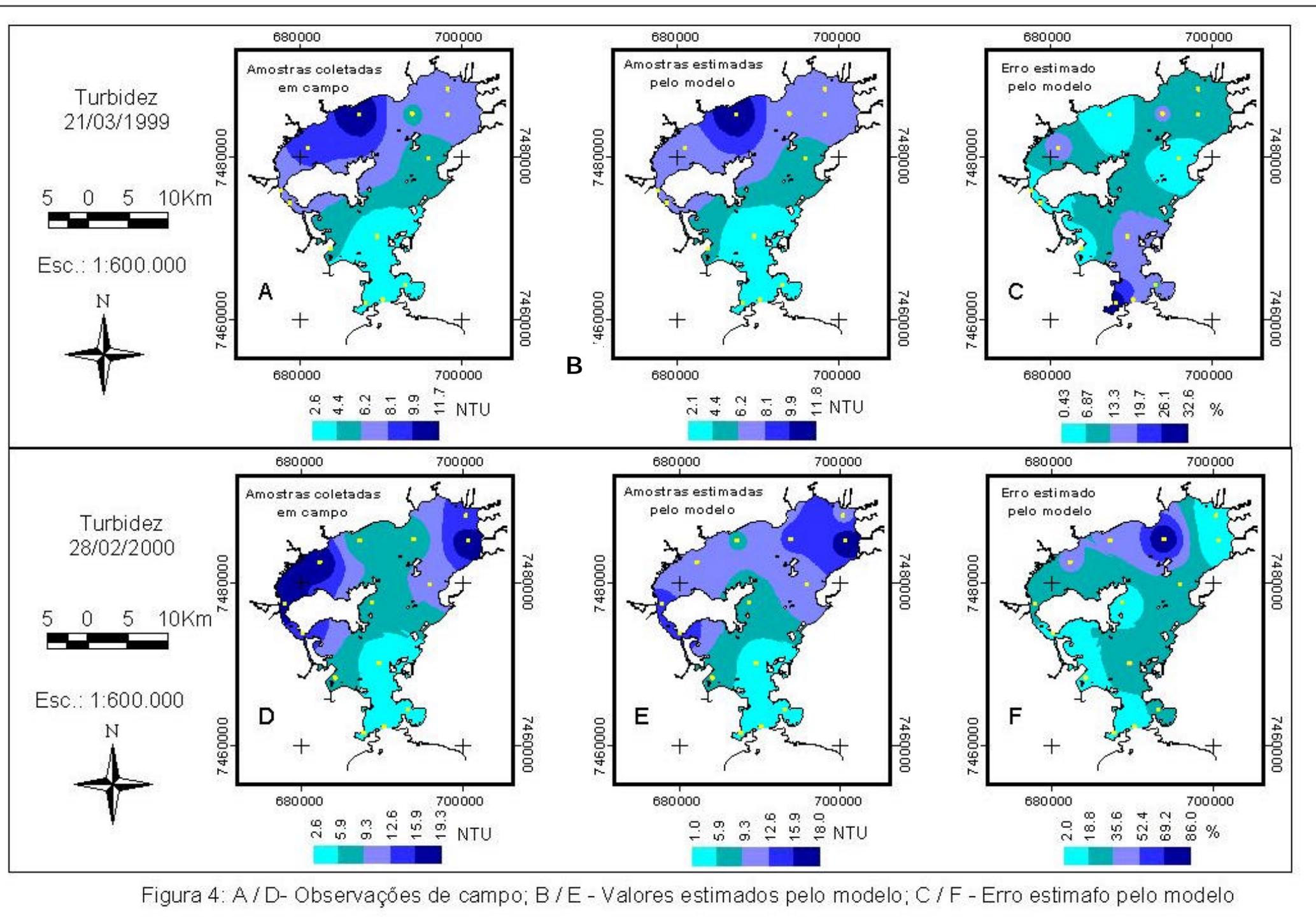


Figura 4: A / D- Observações de campo; B / E - Valores estimados pelo modelo; C / F - Erro estimado pelo modelo

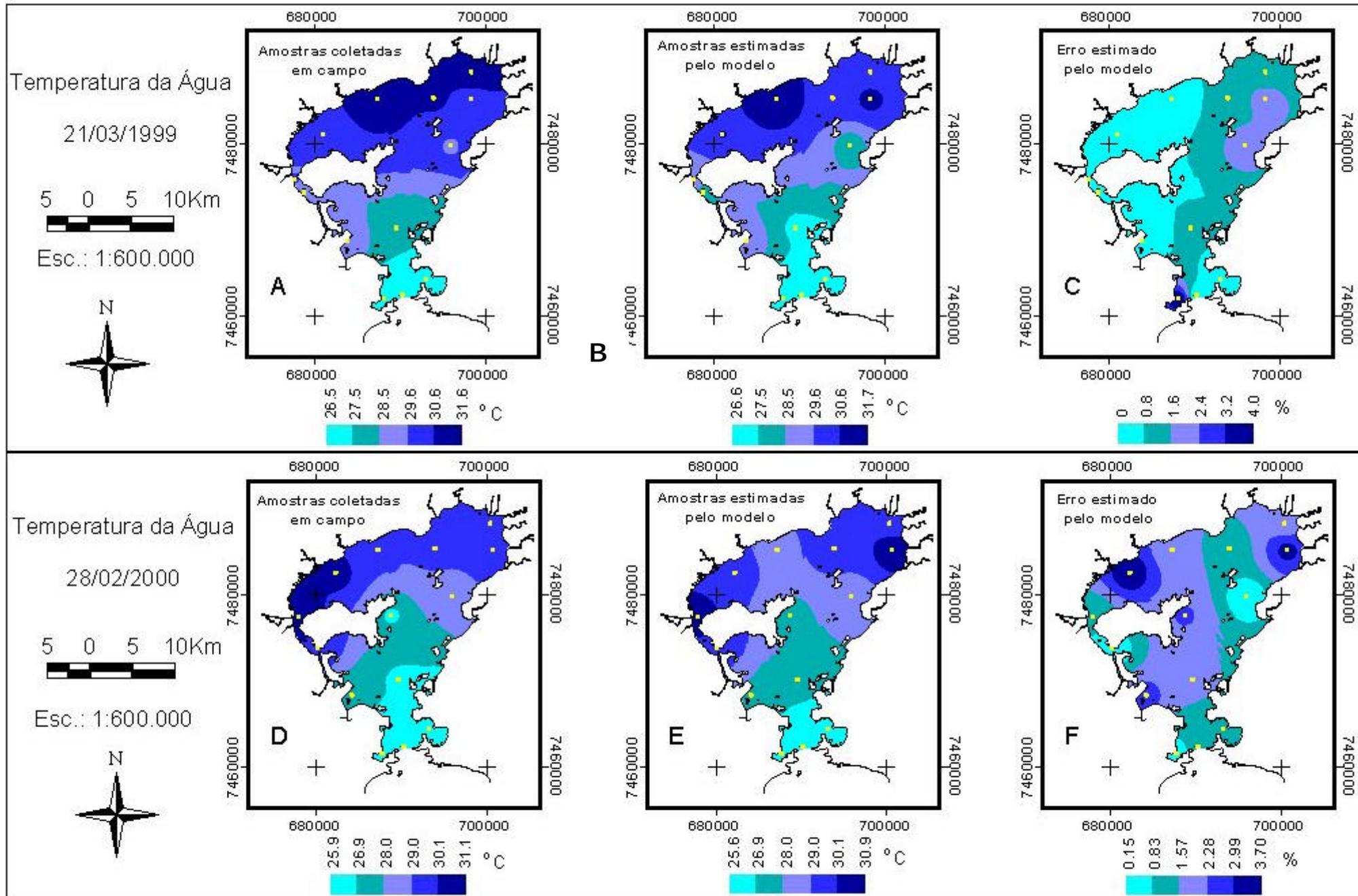


Figura 5: A / D- Observações de campo; B / E - Valores estimados pelo modelo; C / F- Erro estimado pelo modelo