



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS
AUTORES **AUTHORS** REGIÕES COSTEIRAS REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA
 SENSORIAMENTO REMOTO

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
Roberto Pereira da Cunha
 Roberto Pereira da Cunha
 Diretor Sens. Remoto

AUTOR RESPONSÁVEL
 RESPONSIBLE AUTHOR
Cláudia Zuccari
 Cláudia Zuccari F. Braga

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION
 INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY
Alberto Waingort Setzer
 Alberto Waingort Setzer

CDU/UDC
 528.711.7:551.463

DATA / DATE
 Setembro 1989

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-4935-PRE/1525
	SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTUDOS DE QUALIDADE DE ÁGUA EM REGIÕES COSTEIRAS - UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
AUTORES/AUTHORSHIP	Cláudia Zuccari Fernandes Braga Myrian de Moura Abdon

ORIGEM
 ORIGIN
 DPA

PROJETO
 PROJECT

Nº DE PAG.
 Nº OF PAGES
 19

ULTIMA PAG.
 LAST PAGE
 18

VERSÃO
 VERSION

Nº DE MAPAS
 NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Este trabalho dá suporte a uma pesquisa sobre qualidade da água no litoral do país com utilização de dados de sensoriamento remoto. São apresentados parâmetros de qualidade de água que melhor se correlacionam com dados espectrais obtidos através de satélites. São citadas e discutidas metodologias para análise e tratamento destes dados, as quais são empregadas no monitoramento de diferentes tipos de poluição em regiões costeiras.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Este trabalho foi enviado para apresentação no III Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente, no Rio de Janeiro, no período de 24 a 28 de julho de 1989.

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTUDOS DE QUALIDADE DE ÁGUA DO MAR EM REGIÕES COSTEIRAS - UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

por

C.Z.F. BRAGA¹ e M.M.ABDON²

RESUMO -- Este trabalho dá suporte a uma pesquisa sobre qualidade da água no litoral do país com utilização de dados de sensoriamento remoto. São apresentados parâmetros de qualidade de água que melhor se correlacionam com dados espectrais obtidos através de satélites. São citadas e discutidas metodologias para análise e tratamento destes dados, as quais são empregadas no monitoramento de diferentes tipos de poluição em regiões costeiras.

INTRODUÇÃO

O ambiente marinho ao longo das zonas costeiras e estuários tem sido degradado continuamente durante os últimos anos. Esta situação torna-se cada vez mais relevante à medida que a demanda de recursos naturais do mar aumenta e as áreas responsáveis pela manutenção e equilíbrio de estoques de espécies marinhas são alteradas ou diminuem. Muitos estudos têm sido feitos em áreas que sofrem impacto ambiental no sentido de monitorar e até mesmo evitar que danos cada vez mais sérios venham a ocorrer.

O objetivo deste trabalho é mostrar como técnicas de sensoriamento remoto que utilizam o espectro ótico têm complementado técnicas convencionais em estudos de qualidade da água, apresentando inclusive inúmeras vantagens em certos casos. Com este intento, foram consultadas bibliografias, em sua maioria publicadas nos últimos 7 anos, referentes à aplicação de dados de sensores remotos na detecção e monitoramento de poluentes em meio aquático.

No decorrer deste trabalho são também apresentados alguns conceitos básicos referentes ao sensoriamento remoto da água do mar, poluída ou não, e discutidas metodologias de tratamento de dados e análise de resultados alcançados.

SENSORIAMENTO REMOTO DA ÁGUA

Interação da radiação eletromagnética com a água do mar

Draeger (1974) citado por Geraci et alii (1980), descreveu o sistema estuarino, onde ocorre a confluência entre o mar e sistemas de água doce, i.e., onde há uma combinação dinâmica de fluxo de saída com correntes de maré que se combinam e misturam. Fisher e Koepke (1984) constataram que a quantidade de material em suspensão e matéria orgânica dissolvida geralmente é desprezível

¹ Técnica Superior Bióloga I, Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE, Caixa Postal 515 - 12201 - São José dos Campos, SP.

² Pesquisadora Auxiliar, Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE, Caixa Postal 515 - 12201 - São José dos Campos, SP.

vel em águas de alto mar, mas bastante grande em áreas costeiras. São necessários diversos tipos de informação, cada vez mais abrangentes, no monitoramento destes ambientes, e o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto pode agilizar a obtenção de dados e minimizar os custos de estudos de qualidade da água. Conforme pode-se observar na figura 1, os trabalhos de campo apresentam custos bem mais altos que todas as outras técnicas de sensoriamento remoto citadas.

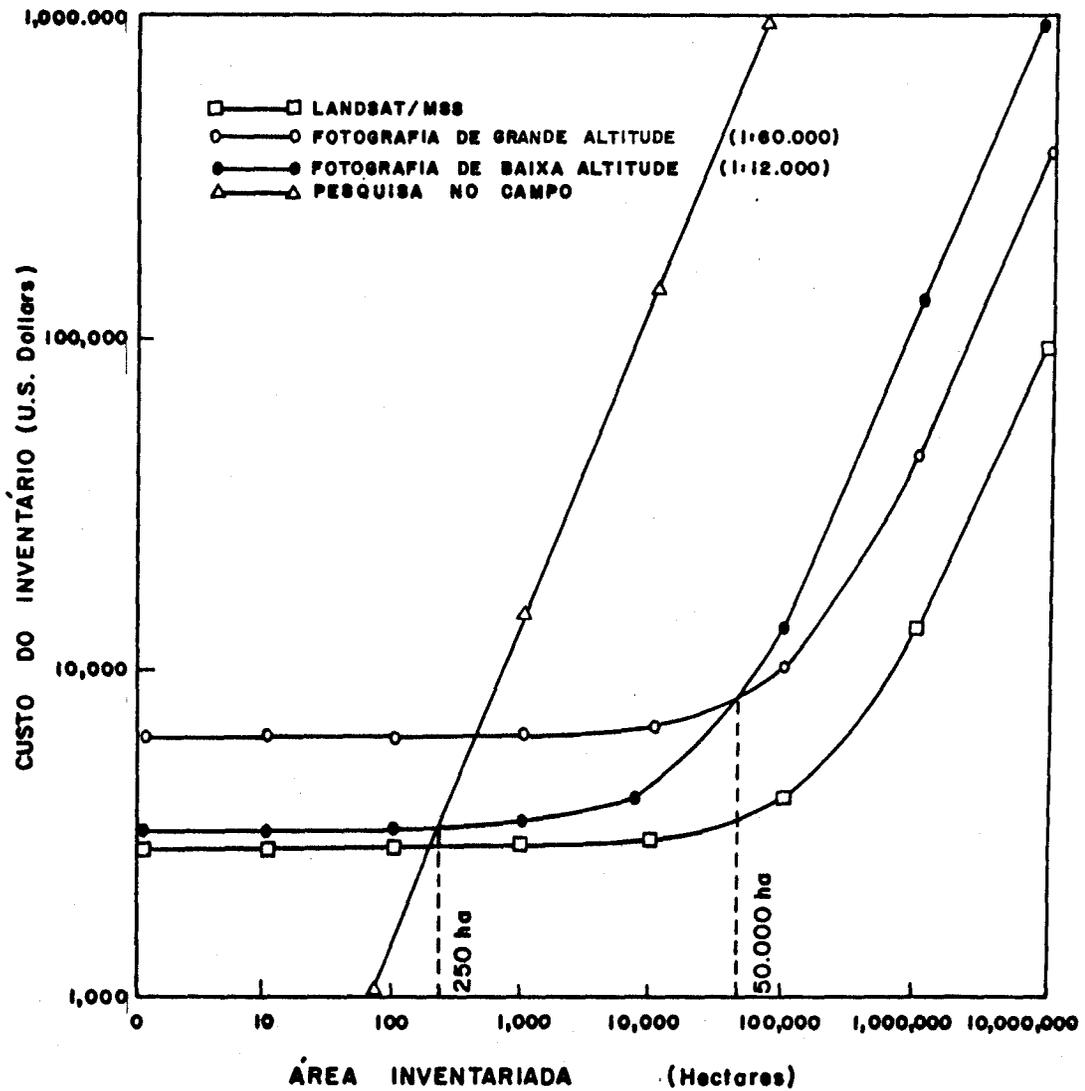


Figura 1 - Custo de inventário vs área total inventariada para 3 plataformas de sensoriamento remoto e pesquisa no campo.

FONTE: Klemas e Hardisky (1983).

A água é razoavelmente transparente à radiação eletromagnética (REM), na região do espectro visível na faixa de 0,4 a 0,6 μ m (NASA, 1971 e Sherman, 1971 in Herz, 1977). O conhecimento das propriedades que regem a penetração desta radiação na água pura é fundamental para a determinação dos coeficientes de atenuação em água turbidas.

Na água pura, isenta de solução e suspensão, a estrutura iônica e molecular do líquido determina os efeitos de absorção e espalhamento da radiação incidente (Morel, 1974, in Jerlov and Nielsen, 1974).

O espalhamento da energia eletromagnética na água ocorre basicamente através de três fenômenos físicos: difração, refração e reflexão. Deve-se considerar, no entanto, dois casos distintos de espalhamento: um causado pela própria água e outro pelas partículas em suspensão, sendo este último responsável pelo maior número de variações produzidas no comportamento espectral do alvo (Jerlov, 1968).

Uma série de curvas representativas da transmitância da radiação eletromagnética, em função do comprimento de onda e da densidade ótica, é apresentada na figura 2, segundo Sabins (1978) para águas de diversos ambientes. A variação dos índices de atenuação da REM é condicionada pela concentração das partículas em suspensão e dissolvidas. Pode ser observado na mesma figura que a água pura apresenta o menor índice de atenuação e águas costeiras pertencentes a ambientes que recebam sedimentos trazidos por rios e esgotos, maiores índices.

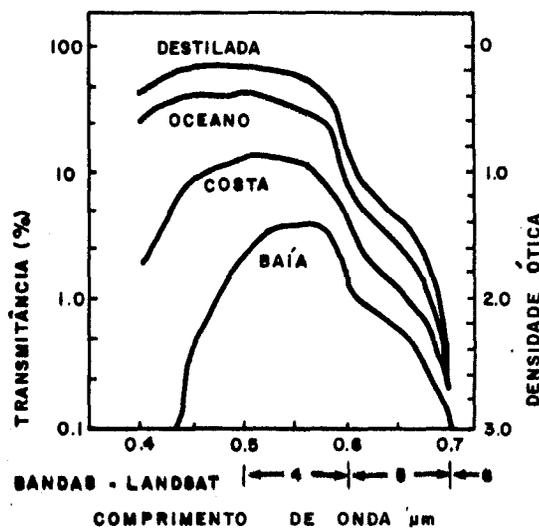


Figura 2 - Transmitância espectral, a 10m de profundidade, para vários tipos de água.

FONTE: Specht et alii (1973) in Sabins (1978).

Características espectrais das substâncias dissolvidas e em suspensão na água

As informações que se pode obter da água por sensoriamento remoto dependem das características espectrais de reflectância deste alvo. Na região do espectro ótico estes valores resultam das propriedades óticas da água do mar e também das propriedades óticas de seus eventuais constituintes, substâncias dissolvidas e particulares, presentes em quantidades variáveis.

Bricaud and Sathyendranath (1981), dividiram estas substâncias em quatro grupos: i) fitoplancton vivo; ii) detritos biogênicos associados; iii) partículas terrígenas e sedimentos suspensos; e iv) matéria orgânica dissolvida (substância amarela). Qualquer interpretação de reflectância do ambiente costeiro dependerá do conhecimento do comportamento espectral destas substâncias. Como o fitoplancton vivo e seus detritos associados são geralmente semelhante pigmentados e covariantes um com o outro, sua distinção torna-se extremamente difícil, sendo então tratados como um único grupo.

i) Fitoplancton vivo e detritos biogênicos associados - os resultados de mostraram que a eficiência de absorção por unidade de concentração de pigmento é altamente variável de um corpo d'água para outro. Contrariamente, a variabilidade do comportamento espectral de absorção parece ser mínimo. Vide figuras 3 e 4.

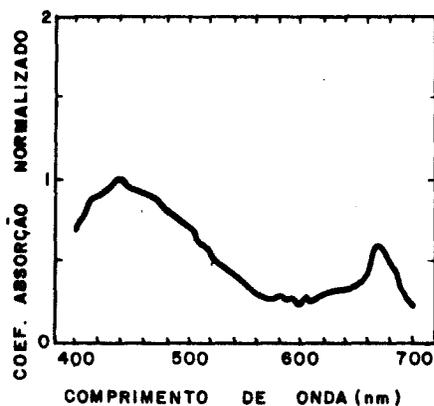


Figura 3 - Curva de absorção (normalizada em 440nm) de fitoplancton e detritos biogênicos covariantes.

FONTE: Prieur and Sathyendranath, (1981), in Bricaud and Sathyendranath, (1981).

Supondo que as partículas sejam esféricas, para uma dada concentração de pigmento a absorção num determinado comprimento de onda diminui com o aumento no tamanho das partículas (figura 5).

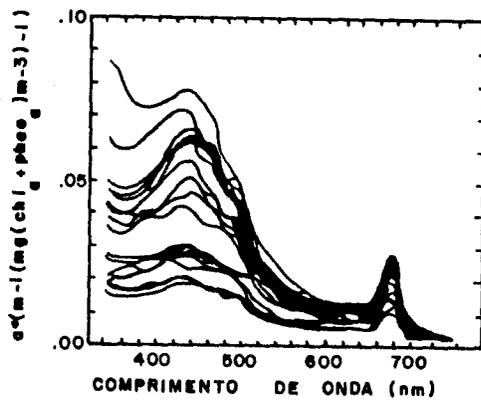


Figura 4 - Valores espectrais de absorção específica, determinados em células intactas durante crescimento exponencial, para culturas de diferentes espécies de algas.

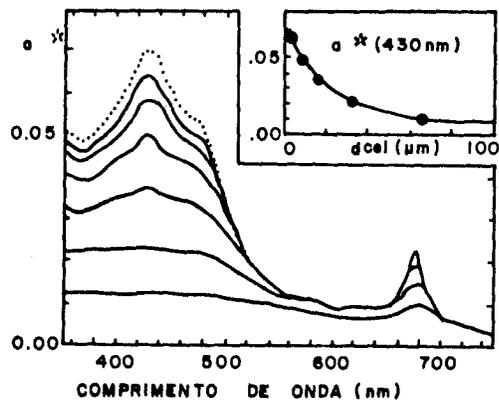


Figura 5 - Mudança nos valores espectrais dos coeficientes de absorção específica [expressos em $\text{m}^{-1} (\text{mg chl a m}^{-3})^{-1}$, para células de algas contendo o mesmo material mas diferindo em tamanho (diâmetro, d , em μm). A curva pontilhada representa os valores de absorção espectral para este material (arbitrariamente escolhido) disperso em solução ($d \rightarrow 0$). As curvas contínuas, do topo para a base, correspondem respectivamente aos diâmetros 2, 4, 8, 16, 32 e $64 \mu\text{m}$. Inserindo: variações em função do diâmetro da célula do valor absoluto específico de absorção em 430nm.

FONTE: Bricaud and Sathyendranath (1981).

Medidas do coeficiente de retroespalhamento de suspensões de algas mostram uma forte influência de absorção neste coeficiente. Todos os estudos demonstram que o mínimo de espalhamento está associado ao máximo do espectro de absorção.

ii) Partículas terrágenas e sedimentos em suspensão - Prieur e Sathyendranath (1981), in Bricaud and Sathyendranath (op. cit.) comparam uma curva através de dados obtidos em três estações costeiras (Mauritânia), onde a absorção se deve principalmente a partículas inorgânicas em suspensão (figura 6). Na região do espectro visível o coeficiente de absorção apresenta-se menor em torno de 500nm, e os autores sugeriram a repetição do estudo em diferentes tipos de águas.

Quanto às características de espalhamento, estas são extremamente variáveis e seu equacionamento depende do tamanho e do índice de refração das partículas. Neste sentido, são ainda necessários levantamentos experimentais relativos aos diferentes tipos de partículas não-clorofiladas para o conhecimento de suas assinaturas espectrais.

iii) Matéria orgânica dissolvida - o coeficiente de absorção da matéria orgânica dissolvida (i.e., das substâncias amarelas que são opticamente) varia com o comprimento de onda de acordo com uma lei exponencial. A curva "típica" de absorção é apresentada na figura 7.

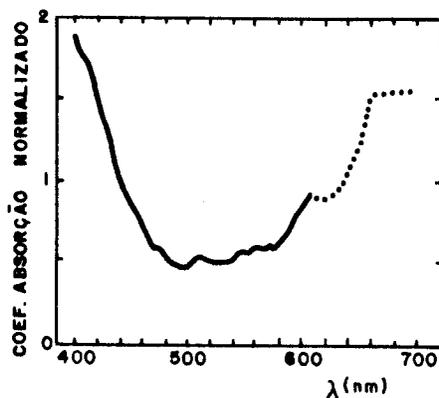


Figura 6 - Curva de absorção (normalizada em 440nm) de partículas não clorofiladas. A parte pontilhada da curva foi obtida utilizando-se valores de apenas uma estação.

FONTE: Prieur and Sathyendranath (1981), in Bricaud and Sathyendranath (1981).

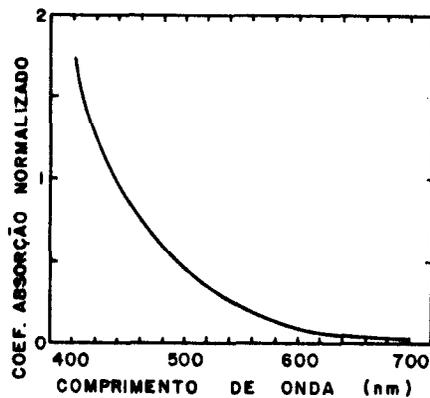


Figura 7 - Curva "típica" de absorção de substância amarela, obedecendo à lei $a(\lambda) = C \exp(-0,014\lambda)$ (λ em nm).

FONTE: Bricaud and Sathyendranath (1981).

Mc Cluney (1976) concluiu que a concentração de sal exerce pouca influência na atenuação da luz, podendo portanto ser desprezado. Este resultado é confirmado por Morel (1974) e Smith e Baker (1981), citados por Witte et alii (1982). Portanto, experimentos realizados em lagos e rios também podem oferecer subsídios valiosos para a compreensão da influência das substâncias que interferem no comportamento espectral das águas estuarinas e costeiras.

Witte et alii (op.cit.) estudaram a influência de substâncias orgânicas dissolvidas na turbidez da água, através de medidas de radiância no campo (em 5 dos maiores rios da Georgia, EUA) e de medidas de absorção e espalhamento controladas em laboratório. Seus resultados indicaram que as substâncias amarelas reduzem a reflectância inerente a misturas de águas turvas no espectro visível, principalmente na faixa do azul, através de uma relação não-linear.

Segundo Philpot and Klemas (1979), a maior intensidade de um alvo pode estar relacionada tanto à distribuição de profundidade do material quanto a variações físicas ou químicas em sua natureza.

O comportamento espectral das águas oceânicas turvas com fitoplâncton, em relação àquele das águas oceânicas com material em suspensão, caracteriza-se por uma atenuação na radiância emergente na região do azul e por um realce na região do verde do espectro eletromagnético visível. Águas com fitoplâncton e sedimentos em suspensão misturados apresentam um realce de radiância nas regiões do verde e do vermelho do espectro em relação a águas oceânicas puras. Com o aumento da concentração de substâncias amarelas a radiância se reduz, principalmente na região do azul. Estes resultados, obtidos de águas que apresentam o mesmo coeficiente de extinção de fitoplâncton, demonstram a variabilidade do efeito da adição de material em suspensão e matéria orgânica dissolvida. Qualquer relação simples entre uma razão ou diferença de radiâncias e concentração de fitoplâncton será modificada para todas as diferentes

composições de substâncias. O erro produzido por um dado algoritmo bio-ótico depende principalmente das variações de concentração de sedimento em suspensão e de substância amarela (Fischer and Koepke, 1984). Vide figura 8.

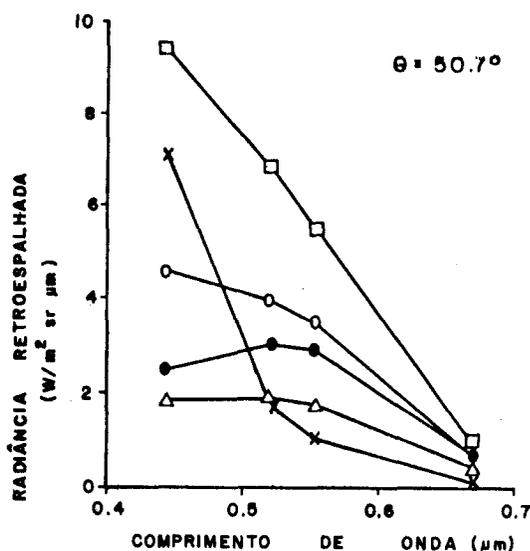


Figura 8 - Radiação retroespalhada na direção nadir, logo abaixo da superfície oceânica vs comprimento de onda para um ângulo zenital solar de $50,7^\circ$.

Água oceânica limpa (x); oceano com fitoplâncton [$a_{\text{p}}(0.552\mu\text{m}) = 0.4\text{m}^{-1}$,]; com fitoplâncton e material em suspensão [$a_{\text{p}}(0.552\mu\text{m}) = a_{\text{s}}(0.552\mu\text{m}) = 0.2\text{m}^{-1}$, o]; com fitoplâncton, material em suspensão e substância amarela [$a_{\text{p}}(0.552\mu\text{m}) = a_{\text{s}}(0.552\mu\text{m}) = 0.2\text{m}^{-1}$, $a_{\text{ys}}(0.445\mu\text{m}) = 0.1\text{m}^{-1}$, o].

onde: p = fitoplâncton
s = material em suspensão
ys = substâncias amarelas

Áreas de utilização e disponibilidade de dados de sensoriamento remoto

As áreas de utilização do sensoriamento remoto incluem morfologia costeira, investigações de limite da costa, topografia do fundo próximo à costa, com posição da água e análises de profundidade, zonas de maré, correntes de maré, correntes em geral, recursos pesqueiros e poluição, i.e., tanto características estáticas quanto características dinâmicas (detecção de variações). A detecção de padrões e de limites requerem a análise da relação entre sensor x resolução espectral; objeto x escala de tempo; sistema sensor x resolução temporal; e imagem x resolução visível (Gierloff-Emden, 1982). Vide figura 9.

Para o estudo das águas costeiras o sensoriamento remoto na faixa do espectro ótico dispõe no presente principalmente dos satélites de órbita polar LANDSAT (NOAA/TIROS N, NIMBUS 7, SPOT e também dos geoestacionários meteoroló

gicos GOES e METEOSAT). Com estes satélites podem-se obter informações sobre a temperatura superficial do mar e sobre sua cor (que é devida às soluções e suspensões presentes).

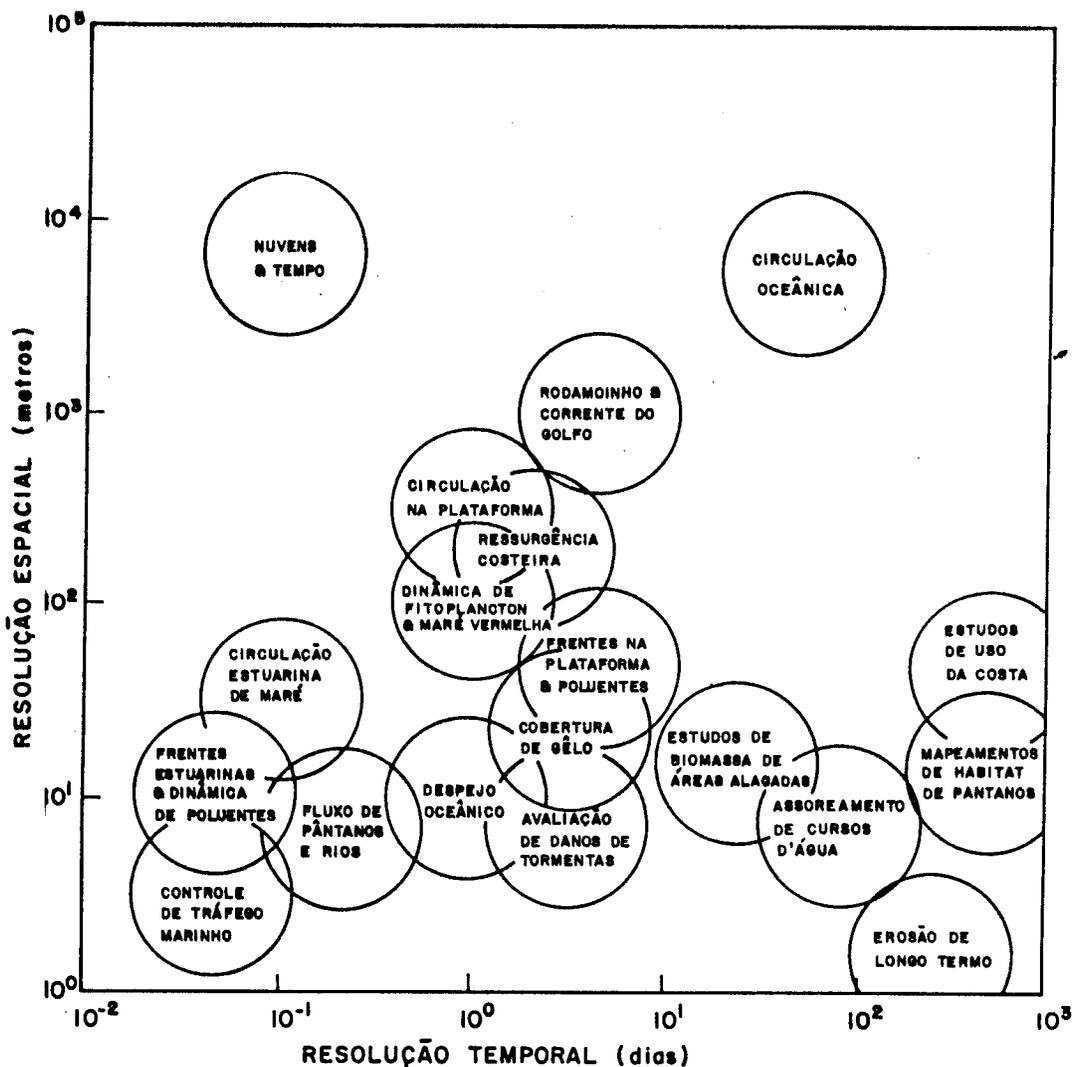


Figura 9 - Exigências de resolução temporal e espacial para processos e fenômenos costeiros.

FONTE: Gierloff-Emden (1982).

CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS E DE ELEVAÇÃO SOLAR

O sinal medido por um equipamento de sensoriamento remoto a bordo de uma aeronave ou satélite é resultado da radiância medida logo acima da superfície da água, atenuada pela atmosfera e realçada pela radiação retroespalhada na atmosfera "path radiance" (Fisher e Koepke, 1984).

A turbidez atmosférica, que é função da concentração de partículas de aerossol, é o maior fator causador de variabilidade, na radiância medida por um satélite nos comprimentos de onda da luz visível e infravermelho próximo. A variabilidade na radiância causada pelos outros constituintes óticamente ativos na atmosfera (ozônio, vapor d'água e moléculas de ar) é comparativamente pequena nesta faixa do espectro. No entanto, a contribuição da atmosfera se torna menor efetiva no caso de alvos com maiores valores de reflectância. Os efeitos de reflectância devido à rugosidade da superfície e aos "carneiros" ("White caps") são incluídos nos valores medidos da reflectância da superfície oceânica (Quenzel e Kaestner, 1980).

A radiância que atinge o detetor de um instrumento de sensoriamento remoto consiste de 80 a 95% de radiância retroespalhada presente na atmosfera e de apenas 5 a 20% devido à radiância emergente do corpo d'água (Kirk, 1983; Quenzel e Kaestner, op. cit.).

Para se remover os efeitos atmosféricos torna-se necessário aplicar algoritmos de correção que levem em conta os fatores de interferência de maior peso, turbidez atmosférica e "carneiros". No entanto, tais algoritmos são extremamente complexos e a variabilidade atmosférica não permite que se estabeleça um modelo único. Na prática, em muitos casos utilizam-se correlações entre dados de radiância não corrigidos e dados de concentração das componentes medidas no campo (Kirk, op. cit.).

No caso de se utilizarem imagens multitemporais, torna-se necessário corrigir os efeitos das diferentes condições de iluminação. Dias et alii (1981), Kirk (op. cit.), NASA (1971) e Munday et alii (1979), dentre outros, apresentaram métodos aplicáveis a esta problemática.

ESTUDOS DE QUALIDADE DA ÁGUA VIA SENSORIAMENTO REMOTO

A maioria dos trabalhos desenvolvidos sobre qualidade da água utilizando o sensoriamento remoto geralmente caracterizou os corpos d'água em termos de sua turbidez. A turbidez é função das substâncias óticamente ativas encontradas, já detalhadamente discutidas na Seção 2, item 2.2. O parâmetro mais comumente estimado em campo é o total de sólidos em suspensão, em unidades de peso/volume, que apresenta-se bem correlacionado com dados de imagens multiespectrais. O tratamento dos dados geralmente envolve técnicas de análise de regressão simples e múltiplas, de razão e diferença entre canais espectrais em conjunção com técnicas de classificação espectral.

Klemas et alii (1974), utilizando dados LANDSAT, mostraram que as respostas espectrais na banda 5 são melhor correlacionadas com as concentrações de sólidos em suspensão e que pode-se inferir, através do mapeamento da distribuição dos sedimentos, o padrão de circulação de um corpo d'água. A determinação de padrões de circulação através deste método foi também utilizada por Le Croy (1981) e Herz (1977).

A razão entre os valores digitais dos canais 4 e 5 do LANDSAT fornece informações sobre os materiais em suspensão contidos na coluna d'água até onde penetra a radiação eletromagnética (Saitoh et alii, 1979 e Muralikrishna, 1983) e a razão entre os valores digitais dos canais 6 e 7, informações sobre material boiando ou em suspensão na subsuperfície (Saitoh et alii, op. cit.).

Bartolucci et alii (1977) encontraram uma relação linear entre a turbidez de água e a banda 5 do mesmo satélite. Klemas and Polis (1977) mapearam frentes estuarinas (localização, tipo e extensão) utilizando realce e classificação supervisionada na banda 5 do LANDSAT 1 e 2.

Graham and Hill (1980), trabalhando com as quatro bandas do MSS LANDSAT correlacionaram isolinhas de salinidade e turbidez superficial com isolinhas de cor (medidas de calorimetria, turbidez, pH e oxigênio dissolvido de amostras de água). Concluíram também que a intensidade da cor varia com o pH.

A presença de algas na superfície causa aumento na reflectância nos quatro canais do MSS/LANDSAT, e o maior contraste entre algas e água ocorre no canal 6 (800-1100nm) (Nielsen et alii, 1983).

Munday et alii (1979), desenvolveram um método para medir concentração de sedimentos em suspensão a partir de valores digitais de imagens multitemporais LANDSAT. Os valores digitais são transformados em valores de radiância e a seguir em coordenadas de cromaticidade que são corrigidas para os efeitos atmosféricos. A transformação dos valores digitais em coordenadas de cromaticidade compensa também os efeitos das variações de forma e tamanho das partículas do sedimento, já que ele ocorre na mesma proporção em todas as bandas. A matéria orgânica dissolvida não afeta os resultados, mas em presença de grandes quantidades de clorofila a correção atmosférica torna-se impossível.

Schiebe et alii (1984) fizeram uma comparação entre dados coletados em campo no Lago Chicot, Arkansas e dados do Mapeador Temático (TM/LANDSAT) de 23 de setembro de 1982. Uma análise preliminar dos dados mostrou que o TM pode ser útil no monitoramento de sedimentos em suspensão e clorofila em um lago com altas cargas. A banda 3 pareceu ser a mais útil, com as bandas 1, 2 e 4 também contendo informações relativas a sedimentos em suspensão.

Utilizando dados do sensor CZCS (Coastal Zones Colour Scanner) do satélite NIMBUS 7 (Ferrari et alii 1984) encontraram boa correlação com as concentrações de sedimentos em áreas de sistema lagunar. No entanto concluíram que este sensor tende a superestimar a concentração de sedimentos em áreas com grandes concentrações de argila.

Tassan (1981), trabalhando também com dados do CZCS empregou algoritmos de determinação da concentração de sólidos em suspensão e de clorofila, para casos em que os montantes destes dois parâmetros não estejam correlacionados. A diferença entre as radiâncias na banda de 590nm e na de 680nm permitiu discriminar a concentração de sedimentos na maioria das aplicações práticas, e o par (520, 550nm) teve o melhor desempenho na determinação da distribuição de clorofila.

Whitlock et alii (1982) estabeleceram critérios para a utilização de análises de regressão para estimativas de sedimentos e poluentes através da aplicação de métodos de regressão linear múltipla e medidas radiométricas com espectralômetro no campo. A técnica se aplica a situações ambientais em que tanto a água quanto a atmosfera possuem efeitos óticos lineares e não-lineares. Assinala-se a necessidade de conhecimento prévio da variabilidade atmosférica ao longo da cena, da hidráulica do corpo d'água, e de medidas da profundidade do disco de Secchi (através da qual determina-se a penetração da radiação ele

tromagnética na água. Segundo Mc Cluney (1974) em Whitlock et alii, op. cit., a máxima penetração é da ordem de 20 a 50% da profundidade de Secchi). Conforme estes autores, devidos aos altos custos, esta técnica é particularmente apropriada para experimentos de estabelecimento de modelo de difusão e transporte de poluentes.

A nível de aeronave, podem ser citados os trabalhos de Lillesand et alii (1975) - que delinearão zonas de misturas de refugos através de medidas densitométricas em fotografias - de Azuara e Hidalgo (1977) - que encontraram correlação entre a cor da água medida por microdensitometria em filme infravermelho e o pH medido em campo - e o trabalho de Johnson, 1977 - que utilizando dados de sensores multiespectrais e técnicas de análise de regressão encontrou diferentes valores de razão entre bandas espectrais para plumas de sedimentos de esgoto e plumas de esgoto ácido.

Segundo Sydor (1980), na ausência de dados de verdade de campo, os valores digitais relativos a áreas de água límpida (que possuem reflectância mínima) podem ser subtraídos de todos os pontos da imagem LANDSAT para se estimar a reflectância residual e inferir a concentração de sólidos em suspensão.

A determinação do estado trófico de um corpo d'água no sensoriamento remoto também tem sido objeto de estudos frequentes. Welby et alii (1979), utilizaram uma técnica foto-ótica, combinando as bandas 5 e 6 do LANDSAT, principalmente, que permite caracterizar estudos tróficos (com um único número) de lagos rasos costeiros e monitorá-los sazonalmente, bastando estabelecer de início uma curva de trabalho com dados de coletas no campo. Blackwell (1982) desenvolveu métodos de processamentos de imagens para o monitoramento da qualidade da água e determinação do estado trófico.

Thomann (1973), através de estudos no campo, encontrou correlação entre a salinidade superficial do mar e a temperatura aparente medida radiometricamente.

Olhorst and Bahn (1979) trabalhando com dados de um imageador multiespectral aerotransportado e com medidas de concentração de ferro e profundidade do disco de Secchi no campo, utilizaram uma razão entre as radiancias nas bandas 440-490nm e 540-580nm para quantificar o sedimento de dejetos ácido. Foi encontrada uma forte correlação entre a assinatura espectral e a concentração de ferro na água. Le Croy (1982), também encontrou correlação de dados LANDSAT com a concentração de ferro.

A detecção de óleo na água é feita utilizando-se principalmente os instrumentos de sensoriamento remoto que operam na faixa das microondas. No entanto, a menor emissividade termal do óleo em relação à água torna possível a detecção e o monitoramento de manchas de óleo através de dados de sensoriamento remoto na faixa da radiação termal, disponíveis a nível orbital nos satélites NOAA, LANDSAT e SPOT. Através da análise digital de imagens AVHRR (NOAA 6, 7 e 8), Muasher and Ince (1984) realizaram um experimento neste sentido. Os resultados demonstraram uma grande variabilidade, de um dia para o outro, na assinatura espectral do óleo, que muda continuamente com a intemperização. Nestes casos fazem-se necessárias muitas coletas de dados reais, em campo, para se obterem melhores resultados.

Cabe também citar o uso de fotografias multi-banda em estudos de poluição de óleo, uma técnica de baixo custo relativo, mas limitada a boas condições de iluminação solar - ver por exemplo Rudder et alii, 1972.

CONCLUSÕES

Os conceitos básicos do comportamento espectral da água e seus componentes, e os resultados obtidos nos trabalhos de pesquisa citados, são suficientes para se constatar a eficácia da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto a estudos de qualidade da água. É possível detectar e monitorar diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos, através dos quais inferem-se as condições e aptidões de utilização de corpos d'água, com diversas vantagens sobre as técnicas tradicionais que somente empregam análises de amostras obtidas no campo.

A verificação da verdade de campo passa a ser um método auxiliar (indispensável para fins de quantificação) na identificação dos padrões referentes às substâncias de interesse por sensoriamento remoto. Os locais de amostragem devem ser escolhidos tomando-se cuidado para que sejam obtidos dados referentes a todas as classes, e para esta escolha o tratamento automático de uma imagem (através de uma classificação não-supervisionada) pode ser de grande valia. Devido ao grande dinamismo das regiões costeiras e estuarinas, que estão continuamente recebendo cargas de fluxo de rios, esgotos e sob a influência de variações de marés, a precisão da classificação de imagens ou fotografias aéreas e orbitais dependerá da maior ou menor simultaneidade na obtenção dos produtos de sensoriamento e coletas de dados de verdade no campo.

É importante que os pesquisadores que atuem nesta área, ao concluírem seus trabalhos, façam sugestões para o aperfeiçoamento dos sistemas sensoriais objetivando melhorar seu desempenho.

Ressalta-se a multidisciplinaridade dos estudos de qualidade da água em regiões costeiras e estuarinas, e a necessidade de se explorar todas as áreas de atuação que forneçam subsídios para a caracterização de uma dada região de estudo. A implementação de sistemas geográficos de informação é um importante passo neste sentido. Os parâmetros ambientais variáveis, tais como vento, chuvas e mais devem ser também levados em conta na análise de quaisquer resultados.

Finalmente, este trabalho de levantamento bibliográfico faz parte de um estudo de monitoramento de poluição na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, que se encontra em desenvolvimento no INPE.

BIBLIOGRAFIA CITADA E CONSULTADA

- ALBEROTANZA, L., ZANDONELLA, A. (1980), LANDSAT Imagery of the Venetian Lagoon: A Multitemporal Analysis. NASA-CR-164772.
- ALVARADO, U.R., TOMIYASU, K.; GULATSI, R.L. (1980), "Assessment of space sensor for ocean pollution monitoring". In: Sensor Systems for the 80's Conference, Colorado Springs, Colo., December 2-4, Technical Papers.

- AZUARA, P., HIDALGO, L. (1977), A study of suspended solids in the Requena Dam by remote sensing". Proceedings of the 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 495-504.
- BARTOLUCCI, L.A., ROBINSON, B.F., SILVA, L.F. (1977), "Field Measurements of the spectral response of natural waters", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43, nº 5, 595-598.
- BARTON, G., ROBERTS, B., RICCIO, E. (1986), Satellite Remote Sensing of the marine environment: literature and data sources. National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C. National Environmental Data Referral Service.
- BENTANCURT, J.J.V. (1981), Processamento de dados multiespectrais obtidos por plataformas orbitais da série LANDSAT, para estudos da qualidade da água na Baía de Guanabara. São José dos Campos, INPE. (INPE-2181-TDL/058).
- BLACKWELL, R.J. (1982), Image processing developments and applications for water quality monitoring and trophic state determination. NASA-CR-169139.
- BRICAUD, A., SATHYENDRANATH, S. (1981), "Spectral signatures of substances responsible for the change in ocean color". In: Signatures Spectrales d'objets en télédétection, Avignon, 8-11.
- CAMAGNI, S. et alii. (1983), Marine remote sensing activities of the Joint Research Center, Ispra, Italy. In: ESA Remote Sensing Appl. for Environ. Studies, 35-49.
- CUO, F. (1983), "Contribution de la télédétection satellitaire a la connaissance du littoral de l'embouchure de la Loire a celle de La Gironde". In: ESA Remote Sensing Appl. for Environ. Studies, 27-29.
- DIAS, L.A.V., PEREIRA, A.E.C., CÂMARA NETO, G., BENTANCOURT, J.J.V. (1981), Correção de efeitos atmosféricos em imagens de satélite. São José dos Campos, INPE. (INPE-2281-PRE/059).
- FERRARI, G.M. et alii. (1984), "Remote monitoring of sediments and chlorophyll as tracers of pollutant movements in a Mediterranean Coastal Area". Proceedings of IGARSS'84 Symposium, Strasbourg 27-30 August 1984.
- FISCHER, J., KOEPKE, P. (1984), "The influence of perturbing water properties in chlorophyll mapping". Proceedings of IGARSS'84 Symposium, Strasbourg 27-30 August 1984.
- GERACI, A.L., COLWELL, R.N., KHORRAM, S. (1981), "Remote sensing of water quality for estuarine environments". In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, DC, June 8-10, 2:800-810.
- GIERLOFF-EMDEN, H.G. (1982), Remote Sensing for coastal areas". In: 1982 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, West Germany June 1-4.
- GRAHAM, D.S., HILL, J.M. (1980), "Field study for LANDSAT water quality verification". In: Civil engineering applications of remote sensing; Proceedings of the specially Conference, Madison, WI, August 13-14, 1980.
- HERZ, R. (1977), Circulação das águas da superfície da Lagoa dos Patos. Contribuição metodológica ao estudo de processos lagunares e costeiros do Rio Grande do Sul através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. Tese de Doutorado em Geografia. São Paulo, USP.

- JERLOV, N.G. (1968), Optical Oceanography. Amsterdam, Elsevier.
- JERLOV, N.G., NIELSEN, E.S. (1974), Optical aspects of oceanography.
- JOHNSON, R.W., HARRISS, R.C. (1980), "Remote sensing for water quality and biological measurements in coastal waters". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46, n^o 1, 77-85.
- JOHNSON, R.W. (1977), "Multispectral Analysis of Ocean Dumped Materials". Proceedings of the Eleventh International Symposium on Remote Sensing of Environment, 2, 1619-1627.
- JOHNSON, R.W. (1980), "Remote sensing and espectral analysis of plumes from ocean dumping in the New York Bight Apex". Remote Sensing of Environment, 9:3, 197-209.
- KIRK, J.T.D. (1983), Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. CAMBRIGE UNIVERSITY PRESS.
- KLEMAS, V., BARTLETT, D., PHILPOT, W. "Coastal and estuarine studies with ERTS-1 and Skylab". Remote Sensing of Environment, 3:153-174.
- KLEMAS, V., POLIS, D. (1977), "Remote sensing of estuarine fronts and their effects on pollutants". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43:5, 599-612.
- KLEMAS, V. (1981), "Remote sensing of coastal processes and resources". In: NASA Goddard Space Flight Center Eastern Reg. Remote Sensing Appl. Conf. 139-154.
- KLEMAS, V., HARDISKY, M. (1983), "The use of Remote sensing in global biosystem studies". Adv. Space Res., 3, n^o 9, 115-122.
- LAUER, D.T. et alii. (1984), "LANDSAT-4 Investigation of Thematic Mapper an Multispectral Scanner Applications". In: NASA Goddard Space Flight Center LANDSAT-4 Sci. Invest. Summ., Including Dec. 1983. Workshop Results, 2, 144.
- LE CROY, S.R. (1982), Determination of turbidity patterns in Lake Chicot from LANDSAT MSS Imagery. NASA-CR-165870.
- LE CROY, S.R. et alii. (1981), Determination of circulation and turbidity patterns in Kerr Lake from LANDSAT MSS Imagery. NASA-CR-1-7598.
- LE CROY, S.R. (1982), Kerr Reservoir LANDSAT experiment analysis for March 1981. Hampton, Va. NASA. Langley Research Center.
- LILLESAND, T.M., SCARPACE, F.L., CLAPP, J.L. (1978), "Water Quality in Mixing Zones". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 41(3).
- MASSIN, J.M. (1983), "Remote sensing applied to Marine Pollution Control". In: ESA Remote Sensing Appl. for Environ. Studies 197-202.
- Mc CLUNEY, W.R. (1976), "Remote measurement of ocean color". Remote Sensing of Environment, 5, 3-33.
- MEINERT, D.L. et alii. (1980), Trophic classification of Tennessee Valley Area Reservoirs derived from LANDSAT Multispectral Scanner Data. NASA-CR-163528.

- MIDDLETON, E.M. (1981), "The use of LANDSAT by the states of water quality assessment". In its 2d Eastern Reg. Remote Sensing Appl. Conf. 211-218.
- MIDDLETON, E.M., MARCELL, R.F. (1983), Literature relevant to remote sensing of water quality. NASA-TM-85077.
- MUASHER, M.J., INCE, F. (1984), "Detection and monitoring of the 1983 NOWRUZ Oil Spill Using AVHRR Data". In: ESA IGARSS 84 Remote Sensing: From Res. Towards Operational Use, 2,721-728, Aug. 1984.
- MUNDAY, Jr., J.C., ALFOLDI, T.T., AMOS, G.L. (1979), "Bay of fundy verification of a system for multivariate LANDSAT measurements of suspended sediment". In: Satellite Hydrology; Proceedings of the Fifth Annual William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing, Sioux Falls, SD, June 10-15, 1979.
- MURALIKRISHNA, I.V. (1982), "LANDSAT application to suspended sediments evaluation". In: Remote Sensing Applications in Marine Science and Technology; Proceedings of the Advanced Study Institute, Dundee, Scotland, August 1-21, 1982.
- MURALIKRISHNA, J.V. (1985), "Optical remote sensing for coastal zone management". In: ESA Remote Sensing Appl. in Civil Eng, 175-191, March 1985.
- NASA Langley Research Center. (1971), Remote Measurement of Pollution. NASA SP-285.
- NIELSEN, A., HANSEN, P., MALMGREN, A., HANSEN, V. (1983), "Introductory studies of natural contamination and man-made pollution in danish waters". In: Proceedings of a EARSEL ESA Symposium on Remote Sensing Applications for Environmental Studies, Brussels, Belgium, 26-29 April 1983.
- OHLHORST, C., BAHN, G. (1979), "Mapping of particulate iron in an ocean dump". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 45:8, 1117-1122.
- PHILPOT, W., KLEMAS, V. (1979), "Remote sensing of coastal pollutants using multispectral data". In: Satellite hydrology; Proceedings of the Fifth Annual William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing. Sioux Falls, SD, June 10-15.
- QUENZEL, H., KAESTNER, M. (1980), "Masking effect of the atmosphere on remote sensing of chlorophyll". In: Oceanography from space; Proceedings of the Symposium, Venice, Italy, May 26-30, 1980.
- RIMMER, J.C., COLLINS, M.B., PATTIARATCHI, C.B. (1987), "Mapping of water quality in coastal waters using Airborne Thematic Mapper data". International Journal of Remote Sensing 8:85-102, Jan.
- RUDDER, C.L., REINHEIMER, C.J., BERREY, J.L. (1972), Aerial surveillance spill prevention system. U.S.E.P.A. - EPA-R2-72-007.
- SABINS, Jr., F.F. (1978), Remote sensing - Principles and Interpretation, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- SAITOH, S., ISSAKA, J., ASAOKA, O. (1979), "Marine Pollution Analysis in Tokyo Bay by LANDSAT 1 and 2". Proceedings of the 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 1657-1679.

- SCHIEBE, F.R., RITCHIE, J.C., BOATURIGHT, G.O. (1984), "A first evaluation of LANDSAT/TM data to monitor suspended sediments in lakes". Goddard Space Flight Center LANDSAT-4 Sci. Invest. Summ., Including Dec. 1983 Workshop Results, 2, 141, July 1984.
- SYDOR, M. (1980), "Remote sensing of particulate concentrations in water". *Applied Optics*, 19:16, 2794-2800.
- SYDOR, M. et alii. (1980), "Measurement of suspended solids in Lakes and Oceans using satellite remote sensing data". In: Minnesota Univ. A study of Minn. Land and Water Resources Using Remote Sensing, 13, 107-137.
- TASSAN, S. (1981), A method for the retrieval of phytoplankton and suspended sediment concentrations from remote measurements of water colour". In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15th, Ann Arbor, MI, May 11-15, 1981, Proceedings, 2.
- THOMANN, G.C. (1973), "Remote measurement of salinity in an Estuarine Environment". *Remote Sensing of Environment*, 2, 249-259.
- TREES, C.C., EL-SAYED, S.Z. (1986), "Remote sensing of chlorophyll concentrations in the northern Gulf of Mexico". In: Ocean Optics VIII. Proceedings of the meeting, Orlando, FL, March 31-April 2, 1986.
- WELBY, C.W., WHITERSPOON, A.M., HOLMAN, R.E. (1979), "Trophic state determination for shallow coastal lakes from LANDSAT imagery". In: Satellite Hydrology; Proceedings of the Fifth Annual William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing, Sioux Falls, SD, June 10-15, 1979.
- WHITLOCK, C.H., KUO, C.Y., Le CROY, S.R. (1982), "Criteria for the use of regression analysis for remote sensing of sediment and pollutants". *Remote Sensing of Environment*, 12, 151-168.
- WITTE, W.G. et alii. (1982), "Influence of dissolved organic materials on turbid water optical properties and remote-sensing reflectance". *Journal of Geophysical Research*, 87, 441-446, Jan. 20.

REMOTE SENSING APPLIED TO SEA WATER QUALITY RESEARCHES IN COASTAL REGIONS -
A REVIEW

ABSTRACT

This work gives support to researches on water quality in coastal areas with remote sensing data utilization. Water quality parameters which gives better correlations with spectral data, obtained by satellites, were present. Methods for treatments and analyses of data used for monitoring different types of pollution in coastal areas are discussed.