GEOTECNOLOGIAS NA GESTÃO DE RESERVATÓRIOS: UMA REVISÃO

Helio Lopes[1]; Maria do Carmo Sobral[1]; Gustavo Melo[1]; Günter Gunkel[2] & Ana Candeias[1]

RESUMO - Uma visão geral dos Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento remoto é foco principal deste trabalho enfatizando suas aplicações na obtenção de informações da massa d'água. Essas informações são integradas ao quadro da diretiva da água, e nesse sentido busca-se propor a ligação dessas informações à Resolução 357/2005, de forma a servir de ferramenta para a tomada de decisão numa gestão estratégica da qualidade da água principalmente em grandes reservatórios. Assim é realizada uma revisão integrando as geotecnologias à ciência limnológica e a gestão de reservatórios ressaltando os possíveis potencias da interação interdisciplinar.

ABSTRACT - A overview of Geographical Information System and Remote Sensing is the main focus of this work, that emphasizes their application for obtain water body information. These information are integrated to the Framework Directive, and in this way seeks to propose the linkage of these information to the Resolution 357/2005, in order to serve as a tool for decision-making in strategic management of water quality mainly in large reservoirs . Thus is done a review that integrate geotecnologies to limnological science and reservoirs management highlighting the possible potential of interdisciplinary integration.

Palavras-chave: Qualidade da água, Geotecnologias, Legislação hídrica.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas vem se intensificando cada vez mais a poluição dos solos e consequentemente dos sistemas aquáticos, principalmente causado pelo desmatamento e pelo uso intensivo do solo causando erosão com carreamento de fertilizantes para os corpos hídricos (reservatórios), aumentando diversos constituintes na água.

Conforme Melo (2011) a tipologia e caracterização de um reservatório são fatores importantes para na implantação de planejamento e gestão. O conhecimento do sistema de operação de um reservatório e as informações armazenadas nesses ecossistemas artificiais tornam-se extremamente relevantes quando se considera o seu uso potencial para planejamento e gerenciamento de uma bacia hidrográfica, incluindo o controle da qualidade da água.

Normas ambientais para qualidade da água tem sido regulamentadas buscando o controle da qualidade da água em diversos reservatórios em todo o mundo. Nos grandes lagos da América do Norte, a concentração de nitrato nas águas continua aumentando em muitas bacias hidrográficas. Espécies de fitoplânctons no lago Erie mostram transição de espécies associadas com condições de eutrofização, necessitando de um monitoramento para avaliação do corpo hídrico (Fukue *et al.*, sd).

Muitas tecnologias existentes para o monitoramento de algas e cianobactérias são técnicas microscópicas que são laboriosas e altamente variável. O espectro eletromagnético utilizado em

1) Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Departamento de Eng Civil, R. Acadêmico Helio Ramos S/N, Recife-PE, heliovasf@hotmail.com,msobral@ufpe.br,analucia@ufpe.br
2) Universidade Técnica de Berlim, Faculdade de Engenharia Ambiental, Strasse 17 Juni, 135, Belim, guenter.gunkel@tu-berlin.de

sensoriamento remoto vem sendo aplicado através de instrumentação algal, denominado fluorômetro, para monitoramento da coluna d'água (Gregor; Marselék, 2004). O sensor pode detectar clorofila no primeiro canal (440 e 680 nm), e no segundo detecta ficocianina de cianobactérias (620 e 645 nm), podendo ser usado para monitoramento pontual em tempo real na coluna d'água.

A aplicação dessas técnicas pode ajudar pesquisadores, gestores ambientais e tomadores de decisão a conhecer quando, onde e porque a proliferação demasiada de algas ocorrem em determinado corpo hídrico (Zhang *et al.*, 2011). Dessa forma, para se ter um melhor entendimento, técnicas de sensoriamento remoto podem ser usadas suplementarmente à observações de campo e experimentos de laboratório (Zhang *et al.*, 2011). Nesse sentido, Le *et al.* (2009); Ma; Dai (2005) e Zhang *et al.* (2011) , conduziram uma análise para obter a distribuição temporal e espacial de clorofila-a e proliferação de algas no lago Taihu, China.

Observa-se que o sensoriamento remoto oferece diversas técnicas e maneiras de se monitorar recursos hídricos em diferentes áreas e escala de tempo (Goddijn-Murphy *et al.*, 2009). Além dessas diversas técnicas, há também uma variabilidade de parâmetros a serem monitorados por sensoriamento remoto, os quais: transparência secchi (Kloiber *et al.*, 2002), clorofila-a (Chen *et al.*, 2011b; Gitelson *et al.*, 2008; Kloiber *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2011), carbono orgânico particulado (Hadimitsis; Clayton, 2011), sólidos suspensos total (Artigas *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2006), turbidez (Wang *et al.*, 2006), entre outros.

O monitoramento em escala regional é fundamental na geração de informações para decisões na gestão de lagos (Kloiber *et al.*, 2002). Dados de programas de monitoramento são usados freqüentemente para estimar variações na qualidade da água em corpos hídricos de uma região, examinar diferenças regionais, e investigar relações entre as condições da paisagem (uso e cobertura do solo) e a qualidade da água. Essas informações podem ser usadas para desenvolver critérios da qualidade da água e guiar decisões referentes ao manejo (Kloiber *et al.*, 2002). Uma correta arquitetura estrutural de programa de monitoramento deve ter uma adequada representação no espaço e no tempo para prover informações necessárias para propostas científicas e de gestão. No entanto, o arranjo da escala regional de programas de monitoramento, freqüentemente requer um equilíbrio entre detalhes espaciais e temporais, mas devido a problemas logísticos e de custo, se sacrifica a cobertura espacial em favor de maior freqüência amostral (Kloiber *et al.*, 2002). Para cobrir esse vazio, o sensoriamento remoto pode prover algumas características do corpo hídrico, gerando informações com um certo nível de precisão, pois os dados espectrais gerados pelo sensor são correlacionados a diversas variáveis de qualidade da água que afetam as propriedades ópticas do corpo hídrico em estudo (Hadimitsis; Clayton, 2011).

Os dados coletados temporalmente e espacialmente por sensoriamento remoto podem ser integrados a uma política de monitoramento de recursos hídricos, conforme limiar estabelecido em lei de recursos hídricos. Pode ser observado que na Diretiva Quadro da Água-DQA (2000/60/CE), da União Européia, o monitoramento por satélite já vem sendo sugerido e implementado para se obter informações sobre a qualidade dos corpos hídricos, porém há incertezas que necessitam ainda ser modeladas para se obter uma melhor otimização dos algoritmos e consequentemente obter melhor precisão de acordo como os limiares estabelecidos na política de recursos hídricos.
Nesse sentido, este trabalho objetiva revisar a interligação de parâmetros de qualidade da água com sua modelagem por técnicas de sensoriamento remoto, guiados por limiares estabelecidos na Resolução 357/2005, para corpos hídricos.

Um monitoramento que explore as vertentes espacial e temporal é fundamental para se entender a dinâmica desse processo de modo a se ter subsídios para a tomada de decisão em escala de reservatório. Dessa forma os Sistemas de Informação Geográfica e Sensoriamento Remoto são ferramentas que contemplam esses pré-requisitos para a geração de informação sobre ecossistemas aquáticos de grande porte.

PROCESSAMENTO DE DADOS ESPACIAIS NA GESTÃO DE RESERVATÓRIOS

Diversas tecnologias de coleta de informações espaciais estão sendo usadas para entender o comportamento limnológico de reservatórios, lagos e rios (Alcântara *et al.*, 2011). As principais ferramentas utilizadas para análise espacial de dados limnológicos de reservatórios são o sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (Baban, 1999; Nellis *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2007), trazendo subsídios para a tomada de decisão, por conseguinte auxiliam num plano de gestão ambiental de um determinado corpo hídrico. Essas áreas do conhecimento são fundamentais no processamento e geração de informações em plantas, mapas e relatórios, e conforme Sanchez (2008) são essenciais para prover e sintetizar informações em qualquer estudo ambiental.

Poluição de origem agrícola, industrial e de áreas urbanas são as maiores fontes de degradação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Alexandridis *et al.*, 2007; Atkinson; Canter, 2011). O plano de recuperação da qualidade da água é dificultado pela falta de dados suficientes à modelagem e geração de informações (Sanchez, 2008), com lacunas evidentes nas dimensões espaciais e temporais (Alexandridis *et al.*, 2007). Em estudos realizados no Lago Korônia, na Grécia, Alexandridis *et al.* (2007) empregaram técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, tal como processamento digital de imagens e visualização geográfica em camadas para suprir lacunas usando processamento de imagens, dados hidrológicos e hidrogeológicos, para a construção do plano de restauração. O método empregado por Alexandritis *et al.* (2007), aplicando geotecnologias, teve como objetivo modelar um cenário sustentável para o

lago Korônia. Para isso, dados atuais e passados de sensoriamento remoto foram usados para avaliar o estado atual e o nível de degradação, de forma a definir melhor o meio de restauração.

Diversas camadas representando uma informação geográfica podem ser geradas usando dados de sensoriamento remoto em um ambiente de sistemas de informação geográfica. Segundo Alexandridis *et al.* (2007), essas informações aliadas a dados de campo são usadas para conhecer melhor o status atual e o nível de degradação de um determinado local geográfico. Por conseguinte, podem prover informações ambientais uteis à tomada de decisão.

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para monitoramento de parâmetros da superfície terrestre, incluindo:

- mudança de uso e cobertura do solo (Lopes *et al.*, 2010; Silveira; da Silva, 2010; Zhang *et al.*, 2009a,b);
- 2) estimativas de biomassa (Wang *et al.*, 2011) em bacias hidrográficas (Powell *et al.*, 2010); e
- 3) mapeamento de carbono no solo (Meersmans *et al.*, 2008; Anderson *et al.*, 2008; Fuchs *et al.*, 2009).

Também tem sido empregado em ecossistemas aquáticos para:

- estimativa de temperatura (Alcântara *et al.*, 2011; Giardino *et al.*, 2001; Kay *et al.*, 2005; Matsuoka *et al.*, 2011),
- avaliação da qualidade da água, espacializando o Índice de Estado Trófico e monitoramento da eutrofização (Sass *et al.*, 2007; Cheng; Lei, 2001; Zhengjun *et al.*, 2008; Duan *et al.*, 2008),
- avaliação da produção primária em reservatórios (Bergamino *et al.*, 2010).

Impactos antropogênicos também tem sido estudado com técnicas de sensoriamento remoto e SIGs, incluindo fontes pontuais e difusas (Johnson, 2009; Tripathi *et al.*, 2008).

Uma análise funcional a nível de bacia hidrográfica é necessária para desenvolver um plano de restauração sustentável (Alexandritis *et al.*, 2007). Na gestão hidro-ecológica de uma bacia, há a necessidade de informações espacial e temporal de forma a ter subsídio à tomada de decisão em diversos planos de manejo hidro-ambiental. Conforme Zalidis *et al.*, (2004), um plano de restauração procura identificar quais processos estão impactados e quais funções hidro-ecológicas necessitam ser restauradas. Dessa forma, um primeiro passo para restauração de um corpo hídrico é a avaliação da bacia hidrográfica de forma a identificar as primeiras forças de degradação, bem como os resultados da pressão no ecossistema aquático (Alexandridis *et al.*, 2007).

Nesta avaliação dados geográficos históricos, relacionados ao estado do ecossistema, derivados de análise de imagens de satélite, são empregados em Sistemas de Informação

Geográfica-SIG para examinar o processo de degradação. Conforme Johnson (2009), um exemplo de uma nova tecnologia de mapeamento é imagem de satélite, o qual mapas detalhados da superfície terrestre podem ser criados. Segundo Johnson (2009) parâmetros de qualidade de água como sedimentos suspensos, algas, matéria orgânica dissolvida, óleos, plantas aquáticas, variação termal, mudam o espectro de energia solar refletida e/ou da radiação termal emitida da superfície da água, e essa radiação pode ser medida usando técnicas de sensoriamento remoto.

Planos de bacias hidrográficas e modelos de gestão podem ser integrados a um SIG. Modelos para bacias hidrográficas incluem aqueles que simulam e otimizam a operação de reservatórios e instalações associadas, para servir a múltiplas propostas. De acordo com Alexandridis *et al.* (2007) o uso do SIG é principalmente para visualizar, analisar e combinar dados, de forma a gerar informações relacionadas ao estado ecológico de uma bacia, a disponibilidade de recursos naturais na área, e a avaliação da pressão e impactos da atividade humana em sistemas aquáticos (lagos, reservatórios, rios).

Nas últimas décadas, pesquisadores relacionados ao estudo de sistemas aquáticos, tem ressaltado a importância e os benefícios de dados de sensoriamento remoto em melhorar o conhecimento acerca do funcionamento desses ecossistemas (Leuven *et al.*, 2002). Isso porque há necessidade de se entender o funcionamento do ecossistema em um nível de paisagem, sendo necessário levar em conta a heterogeneidade espacial e variabilidade temporal. Baker *et al.* (2000) estudaram o impacto de tempestade de poeira em reservatório e comunidades afetadas com o objetivo de diminuir o impacto, e verificou a necessidade de conhecer espacialmente a área de forma a estabelecer um programa de plantio para mitigar os efeitos dos fenômeno. Para o estabelecimento da gestão do reservatório foram integrados aspectos sociais e físicos de forma a prover uma visão geral através dos planos de informação social, análise de solos e inventário florestal.

Dados de satélite vêm sendo utilizados, também, no auxílio de políticas de recursos hídricos e legislação. Conforme Paes *et al.* (2010), o uso do SIG como ferramenta de suporte à tomada de decisão tem crescido exponencialmente nos últimos anos. O monitoramento da qualidade da água, usando sensoriamento remoto, com foco na sua distribuição espacial através de observações com imagens de satélites, dá suporte a uma política de recursos hídricos. No seu estudo, Chen *et al.* (2007) apresentam uma espacialização da concentração de nitratos de forma a auxiliar na tomada de decisão conforme a Diretiva Quadro da Água-CE. Melo (2011) realizou estudo de parâmetros de qualidade de água em reservatórios do nordeste do Brasil, de forma a verificar temporalmente os valores que estão acima do estabelecido pela Resolução 357/2005. A implantação da diretiva de recursos hídricos e o alcance dos objetivos referente a qualidade da água, tem grande dependência

no conhecimento científico sobre o estado dos recursos hídricos e dos efeitos das medidas tomadas (Chen *et al.*, 2007).

Conforme mencionado anteriormente o sensoriamento remoto pode auxiliar na tomada de decisão. Logo a distribuição espacial da qualidade da água derivada de dados orbitais seria praticamente um relatório, de forma a detectar e monitorar se alcança ou excede valores críticos de padrões de qualidade da água considerando uma política de recursos hídricos, para um determinado ecossistema. Melo (2007) avaliou temporalmente e espacialmente parâmetros de qualidade da água tomando como base os limiares estabelecido nas condições e padrões de qualidade das águas. Nesse sentido, no desenvolvimento deste item, objetiva-se organizar um esquema de aplicação de SIG e SR em sistemas aquáticos, tendo como área de estudo o reservatório de Itaparica e seu entorno, para gestão do corpo hídrico, bem como, integrar a Resolução CONAMA 357/2005 em conjunto com SIG e SR, de forma a verificar parâmetros relevantes em que o SR e SIG possa auxiliar na sua determinação e monitoramento.

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Conforme Jessel e Jacobs (2005), a implementação da Diretiva Quadro da Água-DQA, traz padrões de uso do solo em bacias hidrográficas para a redução de poluição difusa, visando alcançar um bom estado ecológico, ou um bom potencial ecológico nos corpos hídricos superficiais referente a qualidade da água. Segundo Sobral *et al.* (2008), a DQA representa um laboratório das políticas da água, na qual se pretende estabelecer de forma efetiva, bases comuns para gestão dos recursos hídricos num espaço marcado por diversidade geográfica, sócio-econômica e cultural.

No monitoramento da qualidade da água, satélites de captação de informações da superfície terrestre armazenam regularmente dados espaciais utilizados em algoritmos da qualidade da água. Essa informações modeladas e espacializadas sobre a qualidade da água, praticamente seriam os dados de saída, ligados a uma tabela de classificação das águas para detectar e monitorar se está dentro do limite ou excede valores críticos de padrões de qualidade da água conforme estabelecidos em Resolução, que no caso do Brasil é a Resolução CONAMA 357/2005.

Para essa interação, relacionado ao monitoramento da qualidade da água, cinco passos são necessários, conforme Chen *et al.*(2007):

i) Identificação de medições apropriadas de qualidade da água e de indicadores do grau de degradação do corpo hídrico;
ii) Monitoramento da qualidade da água usando dados de sensoriamento remoto;
iii) Distribuição espacial de informação de qualidade da água em relação ao ecossistema aquático e mudanças ambientais;

iv) Ligação alfanumérica entre monitoramento da qualidade da água e políticas de recursos hídricos; e

v) Avaliação completa de monitoramento da qualidade da água usando sensoriamento remoto na diretiva dos recursos hídricos.

No primeiro passo, técnicas de medidas e indicadores variam conforme a bacia hidrográfica e corpos d'água, os quais são dependentes dos usos atuais, impactos, e características da paisagem, e são incorporados num plano de gestão baseado em GIS. De acordo com Xingtang *et al.* (2004), a resposta de como proteger o meio ambiente e efetivamente prevenir e reduzir desastres, é um ponto chave no desenvolvimento regional sustentável, especialmente no uso de modernas e avançadas tecnologias de informações espaciais, incluindo sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica, sistema de posicionamento global, e suas tecnologias integradas. Em um plano baseado em SIG, deve estar incluído: o impacto de atividades humanas nas águas superficiais; análise econômica do uso da água; o programa de coletas; informações públicas e consultas; e variação sazonal de todas essas medidas.

Em relação ao segundo passo, observações de satélites são usadas para provê a distribuição espacial de informações de qualidade da água tal como clorofila-a, matéria suspensa total, substâncias amarelas, turbidez, profundidade secchi, e temperatura da superfície da água da área em estudo (Chen *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010). Conforme Xingtang *et al.* (2004), para o controle da poluição dos recursos hídricos, especialmente em bacias hidrográficas e lagos continentais, dados de sensoriamento remoto como TM, SPOT, MODIS, ASTER, HYPERION, são usados para capturar dados da área em que necessitam informações do corpo hídrico e medidas de superfície sobre a qualidade da água. Por exemplo, dados de clorofila são usados para analisar mudanças de indicadores importantes de qualidade da água em escala espacial (Chen *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2009a). Por conseguinte, concentrações de nitrogênio (N) e fósforo (P), com sua distribuição espacial no corpo d'água podem ser correlacionadas.

Quanto ao terceiro passo, a análise é feita principalmente baseada no grau de mudanças dos parâmetros biofísicos e/ou ambientes socioeconômicos, que podem impactar os processos hidrológicos, todo o balanço de água, e o uso sustentável da água na bacia hidrográfica em no mínimo parte do ano. Segundo Sobral *et al.* (2008), os parâmetros relativos à natureza físico-química da água, às características hidrodinâmicas e à estrutura física dos meios hídricos, fazem parte da definição dos diversos tipos de água. A distribuição espacial da qualidade da água está relacionada diretamente com o sistema aquático, margens inundáveis e mudanças no meio ambiente. Essas mudanças incluem mudança no uso e cobertura do solo (ex. desmatamento), mudanças demográficas, desenvolvimento industrial, e formas do uso da água (Chen *et al.*, 2007; Fukue *et al.*, sd).

No quarto passo, o banco de dados relacionado a classificação de parâmetros de qualidade da água, pode estar conectado a distribuição espacial de informações de qualidade da água do corpo hídrico derivada de imagens de satélite, conforme os padrões de qualidade da água estabelecidos por lei. De acordo com Chen *et al.* (2007), a conexão indica alguma mudança na informação da qualidade da água, que nesse caso foi especialmente com o nitrogênio e o fósforo no corpo d'água. Os resultados de monitoramento da qualidade da água, usando sensoriamento remoto, mostram a situação atual do ambiente aquático, que pode ser comparado com medições futuras e possíveis problemas na superfície da água. Com essa comparação, pode-se identificar, que condições ou indicadores de qualidade da água podem alcançar ou exceder valores críticos estabelecidos na política de recursos hídricos.

Em relação ao quinto passo, aborda a avaliação do monitoramento, que é importante para determinar como o monitoramento da qualidade da água por sensoriamento remoto, contribui para a política de recursos hídricos na diretiva do quadro da água. Nesse sentido Chen *et al.* (2007) incluem as seguintes avaliações:

- assegurar que as descobertas são plausíveis e de uso potencial referentes aos padrões de valores críticos de qualidade da água;
- refinar a análise usando diferentes medidas de disponibilidade, e ajustar os indicadores ou limiares de segurança;
- avaliar a eficácia do monitoramento da qualidade da água usando sensoriamento remoto como suporte para a política de recursos hídricos.

No primeiro caso, observa-se que está relacionado a análise e validação dos modelos de qualidade da água por satélite, enquanto que no segundo verifica-se uma preocupação com a precisão da informação gerada. Já no terceiro caso, observa-se uma atenção ao monitoramento levando em consideração o viés temporal e espacial, proporcionado pelo sensoriamento remoto. Logo, o tempo e a resolução espacial devem ser considerados numa gestão da qualidade da água por satélite. Conforme Lee (2009), sistemas de sensoriamento remoto com alta resolução (~30m ou melhor) são necessários para o monitorar águas costeiras e continentais. Esses sistemas tem sensores embarcados com canais espectrais que possui largo comprimento de banda (50 nm ou maior), satisfazendo, assim os requisitos de sinal-ruído.

Essas características podem afetar o limiar estabelecido em padrões de qualidade da água, sendo necessário realizar avaliações de forma a criar uma amplitude de alerta quanto as informações geradas relacionadas ao próprio limiar da diretiva como também ao limiar de precisão do modelo.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E SENSORIAMENTO REMOTO, E SUAS RELAÇÕES COM GESTÃO DE CORPOS HÍDRICOS

Gestão de lagos é realmente uma ciência nova (Baban, 1999). Assim, há uma incerteza na estimativa de custo-benefício de algumas técnicas. Sensoriamento remoto e SIG podem ser empregados para prover um rápido entendimento em larga escala, de mudanças em lagos e reservatórios e em desenvolver uma estratégia de gestão dos mesmos (Baban, 1999; Chen *et al.*, 2007). A combinação de sensoriamento remoto como fonte de informação e SIG como uma ferramenta analítica, permite aos gerenciadores capturar e atualizar todas as informações relevantes (ex. parâmetros de qualidade dá água), elaborar planos, simular/implementar, comparar, visualizar e avaliar os resultados a partir da simulação de vários cenários de gestão.

A Figura 1, mostra um esboço de uma configuração básica de um SIG. Observar -se que a entrada de dados está esquematizada na parte superior que é representada por mapas que podem ser digitalizados após sua importação para um SIG. Como forma de geração de dados e de entrada em um SIG, tem-se o GPS que coleta informações pontuais, linhas e áreas, que podem ser um ponto de monitoramento, um riacho e um corpo d'água, respectivamente. Outra forma de entrada de dados, é através de dados tabulares, como por exemplo, tabela de parâmetros de qualidade da água associado a uma localização geográfica. Imagens de satélites ou fotografias aéreas são dados de entrada em um SIG, que podem abranger uma bacia hidrográfica, um município, uma rede de drenagem, ou um reservatório. Por fim, essas entradas são processadas e armazenadas um banco de dados geográfico para visualização, modelagem, cruzamento com outros dados, análise, para posterior saída em forma de gráficos, que pode ser um gráfico espacial ou temporal da qualidade da água, relatórios estatísticos (ex. parâmetros de qualidade da água), e/ou mapas (ex. mapa do índice de estado trófico de um reservatório).

Em termos de estudos de sistemas aquáticos, SIG pode ser definido como um grupo de ferramenta robusta para captura, estocagem, checagem, manipulação, combinação, análise, modelagem, e exibição de dados que são espacialmente referenciados a reservatórios e sua bacia hidrográfica, considerando um sistema de projeção cartográfica.

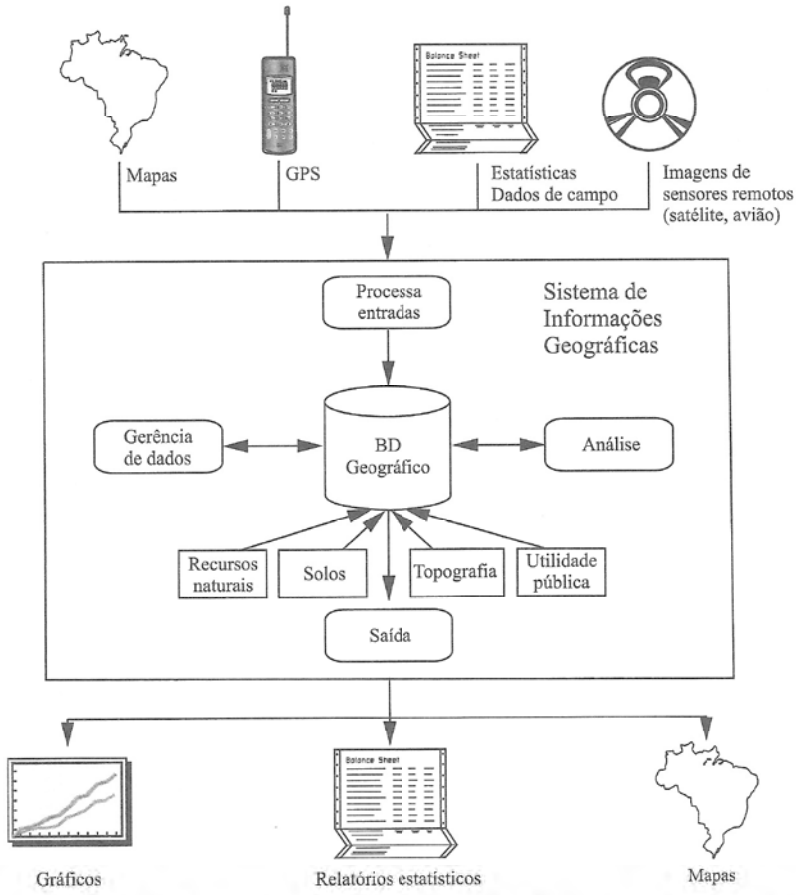

Figura 1. Esboço de uma arquitetura de SIG. Fonte: Miranda (2010)

Apesar da existência de diferentes pacotes de Sistemas de Informação Geográfica, com diferentes capacidades, devem conter os seguintes componentes básicos:

i) coleta e entrada de dados. Operações relacionadas com a entrada de dados no sistema, incluindo digitalização manual, escaneamento, entrada de atributos por teclado, e aceitação de dados de outros sistemas de banco de dados;

ii) mecanismos de armazenamento e recuperação que organiza os dados espaciais em uma que permite ser recuperada facilmente pelo usuário para uma análise subseqüente, como também permite atualização rápida e precisa dos dados, e correções a serem feitas na base de dados espacial.

iii) análise e manipulação dos dados representam um grupo de técnicas, que converte dados por meio de regras de agregação definidas pelo usuário, ou estimativas e restrições de parâmetros para diversos tipos de otimizações espaço-temporal, ou modelos de simulação;

iv) relatório de dados, que abrange uma variedade de operações relacionadas com a visualização de tudo ou parte da base de dados original, como também dados manipulados, e saídas de modelos espaciais na forma tabular ou de mapas.

A aquisição de dados representa uma parte importante em recursos hídricos baseada em projeto de SIG. O SIG pode, também, ser usado na avaliação de impacto ambiental em ecossistemas

aquáticos, e particularmente na avaliação de efeitos cumulativos, que tipicamente requerem a análise de grandes grupos de dados complexos envolvendo ações múltiplas, recursos ambientais e seus indicadores, e fatores de causa e efeito associados com a distribuição espacial e temporal (Atkinson; Canter, 2011). Nesse sentido, o SIG torna-se uma ferramenta útil devido à sua habilidade de trabalhar com dados geográficos georreferenciados e, por conseguinte, indicado à aplicações espaciais dessa natureza e complexidade (Warner; Diab, 2002).

Conforme Atkinson e Canter (2011), camadas de dados (feições vetoriais e imagens) são freqüentemente usados para uma exibição de informações ambientais passadas e atuais. Tais planos de informação podem ser combinadas ou eliminadas para uma análise específica ou visualização. Além disso, áreas com restrições ambientais, como relacionadas pelos indicadores selecionados, podem ser facilmente identificadas. Özyavuz (2011) utilizou SIG e sensoriamento remoto em diferentes datas para identificar mudanças ocorridas em lago, verificando aumento de áreas residenciais com conseqüentes descargas no entorno, causando poluição e efeitos negativos na qualidade da água. O Quadro 1, indica como o SIG pode ser usado em análise ambiental.

Quadro 1. Exemplo de SIG em etapas de Avaliação de Impactos Ambientais em ecossistemas aquáticos

Fase	Possível uso do SIG
Triagem e escopo	Útil na captura de dados, modelagem espacial, cálculo na magnitude do impacto, e avaliação de impacto.
Descrição do projeto	Relações do projeto no contexto geográfico.
Descrição das condições de base	Documentação e exibição de inventários biofísicos (por exemplo: vegetação, habitat, uso do solo, características da superfície da água etc), hidrologia, solo, mapas de propriedades, topografia, rodovia, e outros.
Identificação do Impacto	Uso de análise de camadas para mostrar a distribuição de poluentes por meio de mapas, ou integrar os resultados de modelagem da qualidade da água e análise de sustentabilidade do habitat.
Predição da magnitude do impacto	Usado para a avaliação quantitativa de parte do recurso afetado por poluentes. Também, pode criar mapas de magnitude do impacto derivado dos resultados de riscos e da modelagem da qualidade da água com outros dados em camadas, tal como susceptibilidade dos solos a erosão ou a salinização e a magnitude do impacto no corpo hídrico.
Avaliação da significância do impacto	Útil para a exibição da significância do impacto e como essa variação muda com diferentes alternativas, incluindo a opção "testemunha".
Controle e mitigação do	Pode ser usado para identificar áreas onde medidas de mitigação deveriam ser aplicadas. O SIG também pode ser utilizado para mostrar

impacto	a localização geográfica e extensão das atividades de mitigação, temporalmente.
Participação e consulta pública	O SIG pode ser usado para preparação do material de apresentação, para explicar o projeto ao público, e também para permitir uma resposta rápida a questões e mudanças sugeridas.
Monitoramento e auditoria	Pode-se usar o SIG para projetar o programa de monitoramento, para processar e armazenar dados de monitoramento, para comparar cenários atuais com cenários preditos, e para apresentação de dados mostrando a variação local de poluentes no tempo.

Fonte: Adaptado de Atkinson e Canter (2011).

O Quadro 2, mostra as situações de uso e estudo onde pode ser aplicado o SIG.

Quadro 2. Exemplos de estudos que são conduzidos com o uso do SIG

- Os dados necessários são usados além de um processo estático de avaliação do impacto;
- Ambientes complexos necessitam ser conhecidos e podem ser usado para mostrar inter-relações do sistema;
- Apresentação de informações básicas do meio ambiente;
- Identificação e avaliação de impacto (ex. agropecuária e recursos hídricos);
- Quando há disponibilidade de hardwares e softwares;
- Quando a informação ambiental não é estática;
- Na análise de cenários;
- Quando há necessidade de gerar dados para diferentes cenários;
- Quando há necessidade de interligar atributos espaciais do meio receptor às mudanças no espaço ocasionadas pelo corpo emissor.

Fonte: Adaptado de Atkinson e Canter (2011)

Atkinson e Canter (2011) ressaltam que o SIG pode ser uma ferramenta valiosa na avaliação atual de condições de ecossistema aquático resultantes do passado e de ações atuais. Tais avaliações podem ser baseadas no desenvolvimento de relações empíricas entre perdas de recursos naturais e degradação ambiental. Özyavuz (2011) mostrou como este estudo pode ser desenvolvido em ecossistema aquático. O estudo envolve o uso de imagem de satélite, dados de campo, correlações estatísticas, em um ambiente de SIG, utilizando técnicas de geoprocessamento para relacionar mudanças do ecossistema e o impacto na qualidade da água. Nesse sentido o SIG pode ser útil para analisar efeitos cumulativos em ecossistemas aquáticos no contexto de uma bacia hidrográfica, que é descrito nos exemplos a seguir (Johnson, 1994):

- No SIG pode descrever impactos cumulativos que afetam ecossistemas aquáticos tanto diretamente (ex. a localização de áreas alagadas dentro de ecossistemas aquáticos) quanto indiretamente (ex. fontes de poluição da água à montante do corpo hídrico);
- Informações sobre impactos cumulativos pode ser gerado como subproduto de atualização de dados em planos de informação num SIG. Por exemplo, pelo uso SIG para registrar a localização de licenças emitidas para a drenagem de zonas alagadas, informações sobre a

taxa e localização de perdas de áreas alagadas podem ser geradas. O SIG pode ser usado para analisar efeitos cumulativos temporalmente. Por exemplo, um SIG pode ser empregado para quantificar alterações em sistemas aquáticos por meio da comparação de mapas de superfícies hídricas representando épocas diferentes, podendo calcular a taxa de mundança do corpo d'água.

- O SIG também pode ser usado para avaliar como ecossistemas aquáticos funcionam como um componente da paisagem, principalmente quando é difícil de avaliar de outra forma. Uma variedade de cálculos quantitativos são facilmente executados com o SIG por meio de combinação de mapas adequados do corpo hídrico. Exemplos são: perda de áreas e volume, diminuição do número de áreas aquáticas, diminuição na densidade de corpos d'água, diminuição na conectividade, perdas de funções no sistema aquático etc.
- SIG interligado a modelos aplicados em bacias hidrográficas, também ajuda na análise do papel da paisagem para o equilíbrio do sistema aquático, porque ele pode simular a direção e magnitude do fluxo entre fontes de poluição (ex. fontes não pontual de escoamento originado de áreas agrícolas), e corpo receptor (ex. reservatório).

Áreas agrícolas tem grande potencial na poluição de corpos hídricos, principalmente pelas águas de escoamento que contem sedimentos de solos erodidos, fertilizantes e pesticidas, podem ser a maior contribuição para a entrada de fontes cumulativas de poluição difusa no local, nas superfícies aquáticas a jusante e a montante. Dados de sensoriamento remoto, SIG, e modelagem hidráulica podem ser utilizadas para predizer tais entradas. As entradas são em função de numerosas variáveis, incluindo declividade, classes de solo e tipo de cobertura, intensidade de chuva e taxa de aplicação de químicos (Atkinson; Canter, 2011). Logo, o impacto na qualidade da água de novos projetos agrícolas, e modificações nos existentes, podem ser preditos por meio de modelagem. Nesse sentido, a eficácia de combinações de melhores práticas de gestão na redução de entradas de fontes difusas podem, também, ser determinadas.

Portanto, o sensoriamento remoto pode ser aplicado no gerenciamento do uso das terras, monitoramento dos corpos hídricos e mapeamento de diversas variáveis tanto na área de contribuição quanto no próprio corpo hídrico. O sensoriamento remoto é uma ciência que obtém informação de um objeto sem o contato físico. O seu principal objetivo, em termos de estudo de reservatório, é gravar imagem do sistema aquático e sua área de contribuição usando a energia da radiação eletromagnética registrada por sensores embarcados em satélites ou aeronaves (Figura 2) (Baban, 1999).

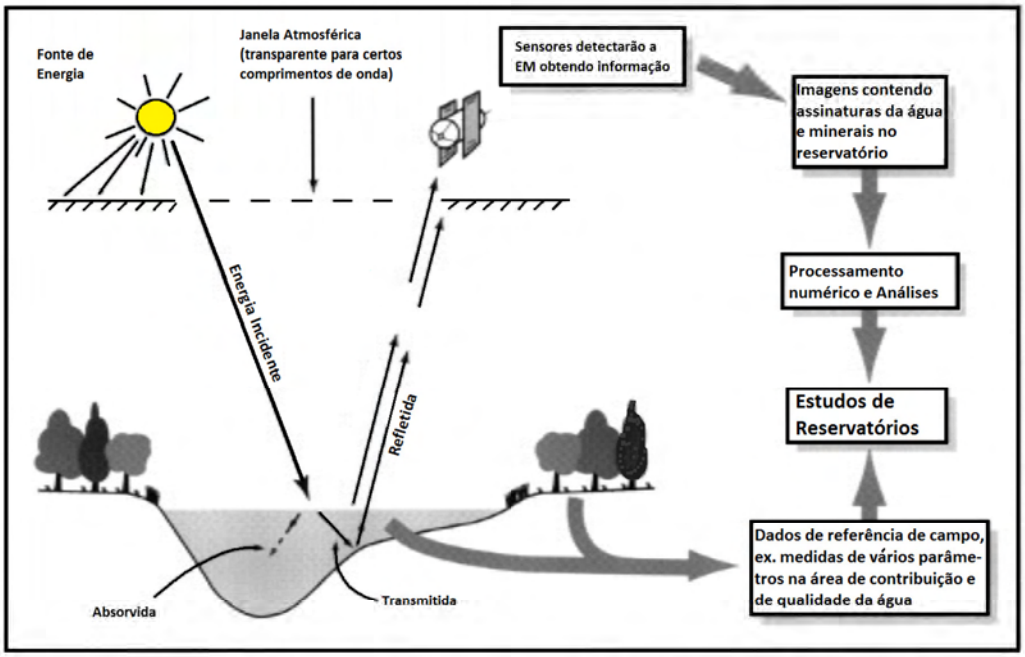

Figura 2. Esquema da interação da energia com a massa aquática no estudo de reservatórios. Fonte: Baban (1999).

Os comprimentos de onda que têm maior interesse em estudos de reservatórios são o visível (0,4-0,7 µm), que em água pura, a maior parte é transmitida, o infravermelho (0,7 - 2,0 µm), que a maior parte é absorvida, e o termal, conforme Quadro 3.

Quadro 3. Comprimentos de onda registrados pelo sensor TM (Mapeador Temático)

N° da Banda	Nome da Banda	Comprimento da Banda	Características
TM 1	Azul/Verde	0,45-0,52	Boa penetração na água, forte absorção pela vegetação
TM 2	Verde	0,52-0,60	Forte reflectância pela vegetação
TM 3	Vermelho	0,63-0,69	Extrema absorção da vegetação
TM 4	Infraverme-lho próximo	0,76-0,90	Alto contraste solo-água, extrema reflectância da vegetação
TM 5	Infraverme-lho médio próximo	1,55-1,75	Sensibilidade forte a umidade
TM 6	Infraverme-lho termal	10,4-12,5	Sensibilidade forte a umidade do solo e vegetação
TM 7	Infraverme-lho médio	2,08-2,35	Boa discriminação geológica

Os fatores que afetam a variabilidade na reflectância de um reservatório ou lago são usualmente determinados por sua configuração física, qualidade da água e clima. Os três principais fatores são: profundidade da água, material suspenso (ex. sedimentos inorgânicos, tanino e clorofila) e rugosidade da superfície (Lillesand; Kiefer, 1994).

A interação entre a energia eletromagnética, a água e o material contido nela, resulta em vários processos que dependem do comprimento de onda e da estrutura atômica da água e seu conteúdo. As relações de balanço de energia é expressa da seguinte forma:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (1)$$

em que, a energia incidente $E_I(\lambda)$ é em função da energia refletida $E_R(\lambda)$, absorvida $E_A(\lambda)$ e transmitida $E_T(\lambda)$. Nessa equação, todos os componentes da energia estão em função do comprimento de onda, o qual tem duas implicações importantes para estudos de reservatórios e lagos. Primeiramente, a proporção da energia refletida, absorvida e transmitida irá variar para diferentes corpos hídricos, dependendo da sua condição ambiental e ecológica. Segundo para uma condição particular do reservatório/lago (ex. profundidade da água), a proporção de energia refletida, absorvida e transmitida, irá variar em diferentes comprimentos de onda. Assim, duas feições (águas rasas e profundas) podem ser distinguíveis em uma banda espectral e ser muito diferente em outra banda. Dessa forma cada reservatório e sua área de contribuição podem prover características de assinaturas espectrais para uma determinada análise.

O uso do sensoriamento remoto na gestão de reservatórios é baseado no fato de que conseqüências de eutrofização e o aumento da produtividade está associada com a mudança nas propriedades ópticas da massa hídrica. Aumento da clorofila-a está associado com diminuição na quantidade relativa de energia da banda azul (0,45-0,52 µm) e aumento na verde (0,52-0,60 µm) (Friese *et al.*, 2010), e geralmente se utiliza para sua determinação a razão entre os canais 704 e 675 nm (LI, *et al.*, 2010). Aumento de sólidos suspensos está associado com aumento na energia refletida, e o pico de reflectância moverá na direção de comprimentos de onda maiores (Lillesand; Kiefer, 1994). Essas mudanças podem ser medidas por técnicas de sensoriamento remoto (Nellis *et al.*, 1998; Onderka; Perárová, 2008; Song *et al.*, 2010).

Muitas observações da superfície da Terra vistas do espaço, são realizadas por instrumentos abordo de satélites, os quais têm numerosos sensores operando em diferentes comprimento de onda. Segundo Baban (1999), os instrumentos mais utilizados como o Mapeador Temático Landsat-TM, o sistema para observação da Terra-SPOT, e o avançado radiômetro de alta resolução-AVHRR, tem grupo de sensores que operam na maior parte dos comprimentos de onda relevantes para estudos de reservatórios e lagos. Isso provê uma estrutura básica para limnologistas, hidrologistas e ecologistas, já que suas coberturas espectrais correspondem à regiões com alta interação da energia tanto do Sol (Incidente) quanto da Terra (refletida/emitida), e também possuem janelas atmosféricas, em que a energia eletromagnética tem menores distorções.

Na escolha de uma imagem de satélite, as seguintes características e conceitos são importantes (Novo, 2008; Centeno, 2004; Barrett; Curtis, 1992):

- Resolução espacial: é o menor tamanho da feição que pode ser estudado em uma imagem. Pode ser entendido como medida do menor objeto da superfície que pode ser distinguido como uma entidade separável, geralmente como um pixel único na imagem;
- Resolução espectral: capacidade do sensor de registrar informação espectral num intervalo particular de comprimento de onda. Alguns sensores possuem banda larga, projetados para registrar a energia em toda amplitude de comprimento de onda. Outros são finalmente ajustados em uma discreta banda do espectro eletromagnético para obter reflectância de uma variável particular de ecossistemas aquáticos;
- Resolução radiométrica: a quantidade de energia eletromagnética que o satélite registra, varia continuamente, mas o alcance real da energia que pode ser registrada e a precisão do registro, dependem da faixa de operação e da resolução radiométrica do instrumento. Assim, a resolução radiométrica de um sensor descreve sua habilidade de distinguir variações no nível de energia refletida, emitida ou retro-espalhada que deixa a superfície do alvo. quanto maior for a capacidade do sensor de distinguir as diferenças de intensidade do sinal, maior será sua resolução radiométrica;
- Resolução temporal: os satélites são lançados em uma órbita regular de forma que eles revisitem regularmente um dado local da Terra. O tempo entre visitas, depende do campo angular de visada do sensor, da latitude e longitude da área de interesse, e das características da órbita.

O sensor é projetado de forma a alcançar todos esses tipos de resoluções, já que um aumento de performance em uma resolução significa geralmente uma perda de outra. O equilíbrio das resoluções é feito de forma a otimizar o sensor para o objetivo a ser destinado. Os liminologistas necessitam considerar a importância espectral, radiométrica, espacial e temporal para um dado objetivo, como também a viabilidade orçamentária e econômica antes de decidir qual imagem obter.

Os sensores geram imagens digitais contendo características da água e seu conteúdo seja em lago ou reservatório, assim como atributos relevantes da área de contribuição (Baban, 1999; Novo, 2008). Essas imagens brutas necessitam ser ajustadas e processadas numericamente em diversos estágios (ex. correção de distorções e degradação da imagem, aumento da distinção aparente entre as feições para otimizar a interpretação visual, e maximizar o contraste entre feições de interesse) (Novo, 2008) produzindo uma imagem otimizada para uso pelos limnologistas e gestores. Por último, a imagem necessita ser calibrada com uma variedade da parâmetros medido no campo, as amostras correspondentes a verdade de campo.

Segundo Baban (1999), dados orbitais podem ser usados na gestão de corpos hídricos, porém nunca poderão substituir redes de observação hidrolimnológica convencional em reservatórios ou

lagos. Entretanto, esses dados podem prover informação essencial para desenvolver estratégias de gestão de reservatórios, principalmente devido a:

- fornecimento de informações que se assemelham com a realidade o mais próximo possível;
- habilidade de gerar medidas múltiplas (radiância/reflectância), que integram diversas características ecológicas do reservatório;
- habilidade de prover informações referentes à categorização e classificação das terras, como também elementos geomórficos requeridos na gestão de reservatórios;
- formato digital de dados de sensoriamento remoto faz com que haja facilidade de recuperação e análise de uma grande quantidade de informação com baixo custo e em um período curto de tempo.

Segundo Baban (1999), o sensoriamento remoto e SIG têm extraído e gerado com sucesso informações relevantes relacionadas às características da bacia hidrográfica, como por exemplo, mapeamento das mudanças das terras agrícolas em um determinado período (Honisch *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2009a; Zhang *et al.*, 2009b; Ahmed, *et al.*, 2009), como também providenciado dados de qualidade da água em sistemas aquáticos (reservatório, lagos e rios) para gestão, incluindo: clorofila-a, fósforo total, profundidade secchi, sólidos suspensos, salinidade e temperatura (Gitelson *et al.*, 1997; Honisch *et al.*, 2002; Hilton *et al.*, 2002; Giardino *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2010; Burrage *et al.*, 2003).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil possui corpos hídricos como reservatórios que contemplam superfícies de dezenas de quilômetros quadrados. Dessa forma, observa-se que o monitoramento por técnicas convencionais é muito dispendiosa em termos de tempo quanto de custos como também para comparação entre pontos amostrais. Nesse sentido o sensoriamento remoto aliado a técnicas de geoprocessamento traz vantagens relacionadas a essas duas exigências. Contudo há necessidade de modelagem de algoritmos para cada corpo hídrico principalmente pelas peculiaridades geográficas existentes à sua área de influência, ressaltando o erro existente em cada modelo. Nesse sentido, o sensoriamento remoto não vem substituir o monitoramento de campo, mas sim fazer parte do sistema de monitoramento integrado de um determinado corpo hídrico.

Outro ponto fundamental é a necessidade de estudo de parâmetros de qualidade de água em reservatórios por meio de sensoriamento remoto interligado aos limiares estabelecidos na Resolução Conama 357/2005. Estudos são necessários com bases estatísticas visando identificar a precisão dos modelos de determinação de parâmetros de qualidade de água relacionados aos limites aceitáveis para cada um. Verifica-se que há estudos em andamento na Europa principalmente com relação a clorofila-a, objetivando o seu mapeamento para relacionar com os padrões da Diretiva Quadro da

Água. Assim, é visto o papel importante das geotecnologias na política de recursos hídricos notadamente no monitoramento e geração de informações fundamentais à tomada de decisão dos gestores.

AGRADECIMENTOS

Este estudo faz parte da tese do primeiro autor interligada com o programa de pesquisa teuto-brasileiro INNOVATE (Interplay among multiple uses of water reservoirs via innovative coupling of substance cycles in aquatic and Terrestrial Ecosystems) e é apoiado pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa da Alemanha. A bolsa de doutorado sandwich é financiada pelo CNPq/DAAD (Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M. H.; EL LEITHY, B. M.; THOMPSON, J. R.; FLOWER, R. J.; RAMDANI, M.; AYACHE, F.; HASSAN, S. M. (2009). Application of remote sensing to site characterisation and environmental change analysis of North African coastal lagoons. Hydrobiologia, v.622, p.147–171.

ALCÂNTARA, E. H.; NOVO, E. M. L. DE M.; STECH, J. L. (2011). Novas tecnologias para o monitoramento e estudo de reservatórios hidrelétricos e grandes lagos. Rio de Janeiro: Parênteses, 328p.

ALEXANDRIDIS, T. K.; TAKAVAKOGLOU, V.; CRISMAN, T. L.; ZALIDIS, G. C. (2007). Remote Sensing and GIS Techniques for Selecting a Sustainable Scenario for Lake Koronia, Greece. Environmental Management, v. 39, p.278-290.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HOUBORG, R.; STARKS, P. J.; AGAM, N. (2008). A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales. Remote Sensing of Environment, v. 112, p. 4227-4241.

ARTIGAS, F.; MARTI, A.; YAO, N.; PECHMANN, I. (2008). Chlorophyll Detection and Mapping of Shallow Water Impoundments Using Image Spectrometry. Research Letters in Ecology, pp. 1 - 4.

ATKINSON, S. F.; CANTER, L. W. (2011). Assessing the cumulative effects of projects using geographic information systems. Environmental Impact Assessment Review, v. 31, p. 457-464.

BABAN, S. M. J. (1999). Use of remote sensing and geographical information systems in developing lake management strategies. Hydrobiologia, v. 395/396, p. 211-226.

BAKER, D.; YOUNG, J.; AROCENA, J. M. (2000). An Integrated Approach to Reservoir Management: The Williston Reservoir Case Study. Environmental Management, v. 25, n. 5, p. 565–578.

BARRETT, E. C.; CURTIS, L. F. (1992). Introduction to Environmental Remote Sensing. London: Chapman & Hall, 3ª Ed. 426 p.

BERGAMINO, N.; HORION, S.; STENUITE, S.; CORNET, Y.; LOISELLE, S.; PLISNIER, P.-D.; DESCY, J-P. (2010). Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and primary production in Lake Tanganyika using a MODIS based bio-optical time series. Remote Sensing of Environment, v. 114, p. 772–780.

BURRAGE, D.M.; HERON, M.L.; HACKER, J.M.; MILLER, J.L.; STIEGLITZ, T.C.; STEINBERG, C.R.; PRYTZ, A. (2003). Structure and influence of tropical river plumes in the Great Barrier Reef: application and performance of an airborne sea surface salinity mapping system. Remote Sensing of Environment, v. 85,p. 204-220.

CENTENO, J. A. S. (2004). Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais. Curitiba: Ed. Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, 219p.

CHEN, Q.; ZHANG, Y.; HALLIKAINEN, M. (2007). Water quality monitoring using remote sensing in support of the EU water framework directive (WFD): A case study in the Gulf of Finland. Environment Monitoring Assessment, v. 124, p.157–166.

CHEN, S.; FANG, L.; LI, H.; CHEN, W.; HUANG, W. (2011b). Evaluation of a three-band model for estimating chlorophyll-a concentration in tidal reaches of the Pearl River Estuary, China. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v.66, p.356-364.

CHENG, K.-S.; LEI, T.-C. (2001). Reservoir trophic state evaluation using landsat tm images. Journal of the American water resources association, v. 37, n. 05, p. 1321-1334.
DUAN, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, B.; SONG, K.; WANG, Z.; LIU, D.; LI, F. (2008). Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states for inland lakes in Northeast China from Landsat TM data and field spectral measurements. International Journal of Remote Sensing, v. 29, n. 3, p. 767–786.
FRIESE, M.; MIGDALL, S.; BACH, H.; KRÄTZ, D.; BORCHARDT, D.; HANK, T.; MAUSER, W. (2010). Water quality assessment using hyperspectral techniques for the river main and its riparian water. Proc. Hyperspectral 2010 Workshop (ESA SP-683, May 2010), Frascati, Italy, 17–19 March 2010. Disponível em: http://earth.esa.int/ workshops/hyperspectral_2010/papers/s4_1friese.pdf Acessado em: 04 nov 2011.
FUCHS, H.; MAGDON, P.; KLEINN, C.; FLESSA, H. (2009). Estimating aboveground carbon in a catchment of the Siberian forest tundra: Combining satellite imagery and field inventory. Remote Sensing of Environment, v. 113, p. 518–531.
FUKUE, M.; SATO, Y.; MULLIGAN, C. Monitoring of surface water quality, sustainable built environment. UNESCO: EOLSS. Acesso em: 23/05/2011. Disponível em: http://www.eolss. net/Sample-Chapters/C15/E1-32-07-02.pdf
GIARDINO, C.; PEPE, M.; BRIVIO, P. A.; GHEZZI, P.; ZILIOLI, E. (2001). Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. The Science of the Total Environment, v.268, p. 19-29.
GITELSON, A.; STARK, R.; DOR, I. (1997). Quantitative near-surface remote sensing of wastewater quality in oxidation ponds and reservoirs: a case study of the Naan system. Water Environment Research, v.69, p. 1263-1271.
GITELSON, A. A.; DALL'OLMO, G.; MOSES, W.; RUNDQUIST, D. C.; BARROW, T.; FISHER, T. R.; GURLIN, D.; HOLZ, J. (2008). A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. Remote Sensing of Environment, v. 112, p. 3582–3593.
GODDIJN-MURPHY, L.; DAILLOUX, D.; WHITE, M.; BOWERS, D. (2009). Fundamentals of in Situ Digital Camera Methodology for Water Quality Monitoring of Coast and Ocean. Sensors, v. 9, p. 5825-5843.
GREGOR, J.; MARSÁLEK, B. (2004). Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll *a*: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. Water Research, v. 38, p. 517-522.
HADJIMITSIS, D. G.; CLAYTON, C. (2011). Field Spectroscopy for Assisting Water Quality Monitoring and Assessment in Water Treatment Reservoirs Using Atmospheric Corrected Satellite Remotely Sensed Imagery. Remote Sensing, v. 3, p. 362-377.
HILTON, J.; BUCKLAND, P.; IRONS, G. P. (2002). An assessment of a simple method for estimating the relative contributions of point and diffuse source phosphorus to in-river phosphorus loads. Hydrobiologia, v. 472, p. 77–83.
HONISCH, M.; HELLMEIER, C.; WEISS, K. (2002). Response of surface and subsurface water quality to land use changes. Geoderma, v. 105, p. 277-298.
JESSEL, B.; JACOBS, J. (2005). Land use scenario development and stakeholder involvement as tools for watershed management within the Havel River Basin. Limnologica, v. 35, p. 220–233.
JOHNSON, LYNN E. (2009). Geographic information systems in water resources engineering. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, EUA. 340p.
KAY, J.E.; KAMPF, S. K.; HANDCOCK, R. N.; CHERKAUER, K. A.; GILLESPIE, A. R.; BURGES, S. J. (2005). Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images. Journal of the American Water Resources Association, n. 41, v. 5, p.1161-1175.
KLOIBER, S. M.; BREZONIK, P. L.; BAUER, M. E. (2002). Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. Water Research, v. 36, p. 4330–4340.
LE, C. F.; LI, Y. M.; ZHA, Y.; SUN, D. Y.; HUANG, C. C.; LU, H. (2009). A Four-Band Semi-Analytical Model for Estimating Chlorophyll-A in Highly Turbid Lakes: The Case of Taihu Lake, China. Remote Sensing of Environment, v. 113, n. 6, p. 1175-1182.
LEE, Z. P. (2009). Applying narrowband remote-sensing reflectance models to wideband data. Applied Optics, v. 48, n. 17.
LEUVEN, R.S.E.W.; POUDEVIGNE, I.; TEEUW, R. M. (2002). Application of geographical information systems and remote sensing in river studies. Leiden: Backhuys Publishers, 247p.

LI, L.; SENGPIEL, R. E.; PASCUAL, D. L.; TEDESCO, L. P.; WILSON, J. S.; SOYEUX, E. (2010). Using hyperspectral remote sensing to estimate chlorophyll- a and phycocyanin in a mesotrophic reservoir. International Journal of Remote Sensing, v. 31, n. 15, 4147-4162.
LILLESAND, T M.; KIEFER, R. W. (1994). Remote Sensing and Image Interpretation. New York: John Wiley & Sons, 3rd ed., U.S.A, 750 p.
LOPES, H. L.; CANDEIAS, A. L. B.; ACCIOLY, L. J. O.; SOBRAL, M. DO C. M.; PACHECO, A. P. (2010). Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.11, p.1210–1219.
MA, R.; DAI, J. (2005). Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurement in Taihu Lake, China. International Journal of Remote Sensing, v. 26, n. 13, p. 2779-2795.
MATSUOKA, Y.; KAWAMURA, H.; SAKAIDA, F.; HOSODA K. (2011). Retrieval of high-resolution sea surface temperature data for Sendai Bay, Japan, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Remote Sensing of Environment v. 115, p. 205–213.
MEERSMANS, J.; DE RIDDER, F.; CANTERS, F.; DE BAETS, S.; VAN MOLLE, M. (2008). A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). Geoderma, v.143, p.1- 13.
MELO, G. L. (2007). Estudo da qualidade da água no reservatório de Itaparica localizado na Bacia do Rio São Francisco. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 97p.
MELO, G. L. (2011). Avaliação da qualidade da água em reservatórios de bacias hidrográficas do nordeste setentrional interligadas com o rio São Francisco. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 144p.
MIRANDA, J. I. (2010). Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília, DF: Embrapa Informática Tecnológica, 2ª Ed., 425p.
NELLIS, M. D.; HARRINGTON JR., J. A.; WU, J. (1998). Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993. Geomorphology, v. 21, p. 281-293.
NOVO, E. M. L. DE M. (2008). Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.São Paulo: Ed Blucher, 3ª Ed., 363p.
ONDERKA, M.; PEKÁROVÁ, P. (2008). Retrieval of suspended particulate matter concentrations in the Danube River from Landsat ETM data. Science of The Total Environment, v. 397, p. 238- 243.
ÖZYAVUZ, M. (2011). Determination of Temporal Changes in Lakes Mert and Erikli Using Remote Sensing and Geographic Information Systems. Journal of Coastal Research, v. 27, n. 01, p. 174–181.
PAES, R. F. De C.; CANDEIAS, A. L. B.; SOBRAL, M. Do C. M. (2010). Sistemas de informações geográficas para subsidiar a tomada de decisão na gestão ambiental de reservatórios. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife.
POWELL, S. L.; COHEN, W. B.; HEALEY, S. P.; KENNEDY, R. E.; MOISEN, G. G.; PIERCE, K.B.; OHMANN, J. L. (2010). Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. Remote Sensing of Environment, v.114, p.1053– 1068.
SÁNCHEZ, L. E. (2008). Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 445p.
SASS, G.Z.; CREED, I.F.; S.E. BAYLEY; DEVITO, K. J. (2007). Understanding variation in trophic status of lakes on the Boreal Plain: A 20 year retrospective using Landsat TM imagery. Remote Sensing of Environment, v. 109, p. 127 – 141.
SILVEIRA, C. S.; DA SILVA, V. V. (2010). Dinâmicas de regeneração, degeneração e desmatamento da vegetação provocadas por fatores climáticos e geomorfológicos: uma análise geoecológica através de SIG. Revista Árvore, v.34, n.6, p.1025-1034.
SOBRAL, M. C. M.; GUNKEL, G.; BARROS, A. M. DE L.; PAES, R.; FIGUEIREDO, R. DE C. (2008). Classificação de corpos d'água segundo a Diretiva-Quadro da Água da União Européia – 2000/60/CE. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 11, p. 30-39.
SONG, K.; DONGMEI, L.; LIU, D.; WANG, Z.; LI, L.; ZHANG, B.; WANG, Y. (2010). Retrival of total suspended matter (TSM) using remotely sensed images in shitoukoumen reservoir, northeast china, IEEE, p. 405-408.

TRIPATHI, N. K.; VENKOBACHAR, C.; SINGH, R. K.; SINGH, S. P. (1998). Monitoring the pollution of river Ganga by tanneries using the multiband ground truth radiometer. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v.53, p. 204-216.
XINGTANG, H.; BING, Z.; XIA, Z.; QINGXI, T.; LANFEN, Z.; QIAO, W.; JIANLIN, Y. (2004). A new architecture for Remote sensing environmental Monitoring System REMS: Design and Implementation. IEEE Geoscience and Remote Sensing, v. 3, 2015-2018.
WANG, F.; HAN, L.; KUNG, H.-T.; VAN ARSDALE, R. B. (2006). Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee. International Journal of Remote Sensing , v. 27, n. 23, pp. 5269–5283.
WANG, H.; HLADIK, C. M.; HUANG, W.; MILLA, K.; EDMISTON, L.; HARWELL, M. A.; SCHALLES, J. F. (2010). Detecting the spatial and temporal variability of chlorophyll- a concentration and total suspended solids in Apalachicola Bay, Florida using MODIS imagery. International Journal of Remote Sensing, v. 31, n. 2, p. 439-453.
WANG, M.; SHI, W.; TANG, J. (2011). Water property monitoring and assessment for China's inland Lake Taihu from MODIS-Aqua measurements. Remote Sensing of Environment v. 115, p. 841- 854.
WARNER, L. L., DIAB, R. D. (2002). Use of geographic information systems in an environmental impact assessment of an overhead power line. Impact Assessment of Project Appraisal, v. 20, p. 39–47.
ZHANG, J.; ZHENGJUN, L.; XIAOXIA, S. (2009a). Changing landscape in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River from 1977 to 2005: Land use/land cover, vegetation cover changes estimated using multi-source satellite data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 11 p. 403-412.
ZHANG, Y.; WANG, Y.; WANG, Y.; XI, H. (2009b). Investigating the Impacts of Landuse-landcover (LULC) Change in the Pearl River Delta Region on Water Quality in the Pearl River Estuary and Hong Kong's Coast. Remote Sensing, v. 1, p. 1055-1064.
ZHANG, Y.; LIN, S.; QIAN, X.; WANG, Q.; QIAN, Y.; LIU, J.; GE, Y. (2011). Temporal and spatial variability of chlorophyll a concentration in Lake Taihu using MODIS time-series data. Hydrobiologia v. 661, p.235–250.
ZHENGJUN, W.; JIANMING, H.; GUISEN, D. (2008). Use of satellite imagery to assess the trophic state of Miyun Reservoir, Beijing, China. Environmental Pollution, v. 155, p. 13-19.