UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Revista Ambiente & Água

An Interdisciplinary Journal of Applied Science

ISSN = 1980-993X (Online)
www.agro.unitau.br/ambi-agua

Edição 04 da Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 1-102, Agosto 2007. ([doi:10.4136/ambi-agua.v2.n2](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.v2.n2))

COMITÊ EDITORIAL

Editor

Getulio Teixeira Batista

Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi), Brasil

Editores Associados

Amaury Paulo de Souza

Universidade Federal de Viçosa (UFV),
Brasil

Antonio Evaldo Klar

Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, UNESP, Brasil

Dar Roberts

Universidade de Stanford; BA pela
Universidade da Califórnia, EUA

Hans Raj Gheyi

Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG), Brasil

Hélio Nóbile Diniz

Instituto Geológico, Secretaria do Meio
Ambiente do Estado de São Paulo
(IG/SMA), Brasil

João Viane Soares

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
(INPE), Brasil

Editor da Seção Editorial

Editora de Texto

Editora de Referência

Editor de Layout

Suporte Técnico

Nelson Wellausen Dias, PPGCA, UNITAU, Brasil

Maria de Jesus Ferreira Aires, GELP, UNITAU, Brasil

Liliane Castro, Biblioteca ECA/Civil, UNITAU, Brasil

Adam Querido Mazzei Ribeiro, LAGEO, UNITAU, Brasil

Marcio Vinicius Gagliotti, LAGEO, UNITAU, Brasil.

Luis A. Bartolucci

Florida International University (FIU), EUA

Marcelo dos Santos Targa

Universidade de Taubaté (UNITAU), Brasil

Nelson Wellausen Dias

Universidade de Taubaté (UNITAU), Brasil

Paul W. Mausel

Indiana State University (ISU), EUA

Paulo Renato Schneider

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM),
Brasil

Sebastião do Amaral Machado

Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil

Silvio Jorge Coelho Simões

Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho (UNESP), Brasil

Yosio Edemir Shimabukuro

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
(INPE), Brasil

Ficha catalográfica elaborada pelo
SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

**Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal
of Applied Science / Instituto de Pesquisas Ambientais
em Bacias Hidrográficas. Taubaté. v. 2, n. 2 (2006) -
Taubaté: IPABHi, 2007.**

Quadrimestral
ISSN 1980-993X

1. Ciências ambientais. 2. Recursos hídricos. I. Instituto
de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas.
III. Título.

CDD - 333.705
CDU - (03)556.18

ÍNDICE

CAPA

Mapa de Potencial de Recarga da bacia do Rio da Palma, DF.

Fonte: Gonçalves, T. D.; Campos, J. E. G.; Batista, G. T.; Diniz, H. N.; Targa, M. S. Metodologia para elaboração de mapas hidrogeológicos: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio da Palma, DF, Brasil. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 47-68, 2007. ([doi:10.4136/ambi-agua.26](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.26))

EDITORIAL

Indexação de Periódicos Científicos ([doi:10.4136/ambi-agua.22](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.22)) 3

Getulio Teixeira Batista

ARTIGOS

Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para a gestão de recursos hídricos do rio Pirapama, Pernambuco, Brasil ([doi:10.4136/ambi-agua.23](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.23)) 7

Celso A. G. Santos; Richarde Marques da Silva

Comunidade de palmeiras no entorno de escorregamentos no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Santa Virgínia, SP ([doi:10.4136/ambi-agua.24](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.24)) 21

Adriano Teixeira Bastos Neto; Simey Thury Vieira Fisch

Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil ([doi:10.4136/ambi-agua.25](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.25)) 33

Andréa Sanae Horikoshi; Gilberto Fisch

Metodologia para elaboração de mapas hidrogeológicos: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio da Palma, DF, Brasil ([doi:10.4136/ambi-agua.26](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.26)) 47

Tatiana Diniz Gonçalves; José Eloi Guimarães Campos; Getulio Teixeira Batista; Hélio Nóbile; Marcelo dos Santos Targa

Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Alto Rio Jamanxim, Pará, Brasil ([doi:10.4136/ambi-agua.27](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.27)) 69

Ana Katiuscia Pastana de Souza; Getulio Teixeira Batista

Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais ([doi:10.4136/ambi-agua.28](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.28)) 88

Fábio Marcelo Breunig; Flávio Wachholz; Waterloo Pereira Filho; Conrado de Moraes Rudorff

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

Scientific Journal Indexing

(doi:10.4136/ambi-agua.22)

Getulio Teixeira Batista

Professor at the Master Degree Program in Environmental Sciences of the University of Taubaté.
Estrada Municipal Dr. José Luiz Cembranelli, 5.000; Bairro Itaim; 12.081-010 - Taubaté, SP
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br.

INTRODUCTION

Since the proposition by Eugene Garfield, in 1955, of a system to grade journals, the “Journal Impact Factor” has been widely used as a measure of quality and citations in science (Testa, 1998). The follow up was the establishment of The Institute of Scientific Information (ISI), which compiled a Science Citation Index (SCI), and finally the *Journal Citation Reports*[®] (JCR[®]) in 1975. Today JCR[®] presents statistical data to evaluate the world's leading journals and their impact in the global research community (Thomson Scientific, 2007). Marziale and Mendes (2002) define the impact factor of a journal as the ratio between numbers of citations by the total number of published articles in a period of two years. In the QUALIS CAPES, a Brazilian system that classifies scientific journals, several scientific committees include in their evaluation the JCR[®]. However, this situation is changing, especially with the increasing number of scientific journals worldwide, in particular, electronic journals published via Internet. Seglen (1997) pointed out many limitations of the “Journal Impact Factor”. The editorial of Nature (Impact Factor, 2005) stated:

Attempts to quantify the quality of science are always fraught with difficulty, and the journal impact factors are among the few numbers to persist. The result is an overemphasis of what is really a limited metric.

With the increasing availability of full texts, freely available, powered by searching tools on the Internet, many articles have the chance to be read and referenced. Thus the quality of the published articles can be judged by the readers rather than by an index that covers only few traditional journals. Even Thompson Scientific recognizes this change in editorial concept. From over 43,000 scholarly journals in print worldwide and a rapidly growing number of open access and electronic journals, Thomson Scientific has selected 8,700 journals as the most significant publications, covering the sciences, social sciences, and arts and humanities and is considering a continually shifting core of approximately 2,000 journals and also recognizes that Open Access data enhances their ‘users’ journal coverage. The Institute for Scientific Information (Philadelphia, USA) had, in 1974, only four Brazilian journals indexed and only 17 appeared in their list in 1999. This corresponds to 0.37% of all registered Brazilian scientific journals at that time, according to Targino e Garcia (2000). Marziale and Mendes (2002) discuss the impact factor of journals concerned with the health care science in Brazil.

Jafari e Jawaid (2007) raised some questions about how to calculate the ‘impact factor’ of journals and pointed out several flaws of current systems such as: “asking authors to add citations to previous articles from the same journals; journals with good ‘impact factor’ may reject studies submitted from less developed parts of the world but important papers, under the fear that such articles would not attract sufficient citation attention” and they suggested

other ways to measure the quality of the journals, such as "PageRank algorithm" and "H-index":

PageRank algorithm: it has been proposed by Bollen et al. (2006) to use PageRank algorithm used by Google to distinguish the quality of citations and hence improve Impact Factor. It is a modified system that combines the calculations made by ISI Impact Factor and PageRank. (Jafary; Jawaaid, 2007)

To evaluate the individual impact, the Research in International and Cross-cultural Management developed the "*Publish or Perish*" (<http://www.harzing.com/pop.htm>) which is a software program that retrieves and analyzes academic citations. It uses Google Scholar to obtain the raw citations, then analyses these and presents the following statistics: Total number of papers; Total number of citations; Average number of citations per paper; Average number of citations per author; Average number of papers per author; Average number of citations per year; Hirsch's h-index and related parameters; Egghe's g-index; The contemporary h-index; The age-weighted citation rate; An analysis of the number of authors per paper.

Many authors stated that online journals, especially those with free, full text availability, facilitate access to the researchers and improve citation rates of articles. Jafary and Jawaaid (2007) indicated that new tools, facilitating increased visibility of online journals, are now coming up and that research is needed to evaluate the Impact Factor and other measures of journals and articles' quality.

INCREASING VISIBILITY OF ARTICLES

It is quite impressive the visibility of online publishing compared to offline. Lawrence (2001) computed the percentage increase across 1,494 venues containing at least five offline and five online articles. Results shown an average of 336% more citations to online articles compared to offline articles published in the same venue. If articles published in the same venue are of similar quality, then they concluded that online articles are more highly cited because of their easier access.

Thomson Scientific, traditionally concerned with printed journals, announced on November 28, 2005, the launch of Web Citation Index™, the multidisciplinary citation index of scholarly content from institutional and subject-based repositories (<http://scientific.thomson.com/press/2005/8298416/>). The Web Citation Index from the abstracting and indexing (A&I) connects together pre-print articles, institutional repositories and open access (OA) journals (Chillingworth, 2005).

The Open Archives Initiative Protocol for Metadata Harvesting (OAI-PMH) provides an application-independent interoperability framework based on metadata harvesting (<http://www.openarchives.org/OAI/openarchivesprotocol.html>). There are two classes of participants in the OAI-PMH framework: "Data Providers" administer systems that support the OAI-PMH as a means of exposing metadata; and "Service Providers" use metadata harvested via the OAI-PMH as a basis for building value-added services. The OAI has its roots in an effort to enhance access to e-print archives as a means of increasing the availability of scholarly communication. The fundamental technological framework relevance is to broaden up access to a range of digital materials.

A repository is a network accessible server that can process OAI-PMH requests in standard manner. A repository is managed by a data provider to expose metadata to harvesters. A unique identifier unambiguously identifies an item within a repository. Many

Service Providers are registered in OAI-PMH. Among them, there are several related to scholarly journals such as:

Avano, a marine and aquatic sciences OAI harvester, implemented by Bibliothèque La Pérouse; **BASE**: Bielefeld Academic Search Engine, implemented by Bielefeld University (http://www.bassearch.net/about_project_english.html); **Callima**, implemented by Infoball Callima as a search engine for scientific articles from various subject areas and sources; **CASSIR** (Cross Archive Search Services for Indian Repositories), implemented by National Centre for Science Information (NCSI), Indian Institute of Science, Bangalore; **citebaseSearch**, implemented by Southampton University that provides users with the facility for searching across multiple archives with results ranked according to many criteria, such as creation date and citation impact; **Clio-i** Service Provider of Science Documents implemented by Liber Laboratory, UFPE, Brazil collects information about science from OAI repositories; **DL-Harvest** implanted by the University of Arizona; **GEO-LEO**, implemented by Lower Saxony State and University Library Göttingen (SUB) and the University Library "Georgius Agricola" of the Technische Universität Bergakademie Freiberg (UBF); **iCite**, implemented by iCite for indexing system covering physics journals; **OAIster** University of Michigan Libraries Digital Library (<http://www.openarchives.org/service/listproviders.html>); **Openarchives.eu**, implemented by Horizons Unlimited srl, Bologna, Italy, a section on "Digital Objects" allows metadata searching through a number of other service providers (**OAIster**, **arXiv**, **RePEc**, **CiteSeer**, **NCSTRL**, **PubMed Central**, **Pleiadi**); **Perseus**, implemented by Perseus; **SAIL-Eprints**, implemented by CNR - Area della Ricerca di Bologna; **ScientificCommons**, implemented by ScientificCommons; **Scirus**, implemented by Scirus to provide scientists with one comprehensive search platform covering both the web and the normally "invisible" databases.

FINAL REMARKS

Basically all research funds are government granted funds, tax payer's supported and therefore, results should be made freely available to the community. Free online availability facilitates access to research findings, maximizes interaction among research groups, and optimizes efforts and research funds efficiency. Therefore, *Ambi-Água* is committed to provide free access to its articles.

An important aspect of *Ambi-Água* is the publication and management system of this journal. It uses the Electronic System for Journal Publishing (SEER - <http://www.ibict.br/secao.php?cat=SEER>). This system was translated and customized by the Brazilian Institute for Science and Technology Information (IBICT) based on the software developed by the Public Knowledge Project (Open Journal Systems) of the British Columbia University (<http://pkp.sfu.ca/ojs/>). The big advantage of using this system is that it is compatible with the OAI-PMH protocol for metadata harvesting what greatly promotes published articles visibility. Currently, there are 687 conformably registered repositories in OAI. The Public Knowledge Project – Open Archives Harvester2. lists *Ambi-Água*: <http://pkp.sfu.ca/harvester2/demo/index.php/browse/index/677>. At the OAI base the URL of *Ambi-Água* is <http://www.agro.unitau.br/seer/index.php/ambi-agua/oai?verb=Identify>. Therefore, all *Service Providers* are automatically capable of harvesting metadata from *Ambi-Água* articles.

In addition to requesting attention from the OAI-PMH *Service Providers*, the Editorial Board of *Ambi-Água* is seeking indexing in several other data bases. Many of them have quality assessment before incorporating a journal in their bases. Therefore, it may take

sometime before Ambi-Água is actually listed in such bases. Up to present the following indexing bases have been contacted: Directory of Open Access Journals (DAOJ - <http://www.doaj.org>); SCOPUS (<http://info.scopus.com/detail/facts/>); ROAR; LANIC; OAISTER; RoMEO; PKP; OAI-PMH; LivRe, Web Citation Index™ and Latindex. In addition, all coordinators of QUALIS CAPES representatives of committees related to Ambi-Água themes have been contacted. Several indexing bases already accepted to include Ambi-Água. A continuously list of these bases will be updated in the news section of the journal.

REFERENCES

- BOLLEN, J.; RODRIGUEZ, M. A.; VAN DE SOMPEL, H. Journal Status. **Scientometrics**, Budapest, v. 69, n. 3, p. 669-687, 2006. Disponível: <<http://arxiv.org/abs/cs.DL/0601030>>. Acesso em: 24 ago. 2007.
- CHILLINGWORTH, M. Thomson herds open access into single index: web citation index creates a global listing of institutional repositories and open access articles. **Information World Review News**. 23 nov. 2005. Disponível: <<http://www.iwr.co.uk/information-world-review/news/2146510/thomson-corals-open-access>>. Acesso: 24 ago. 2007.
- IMPACT FACTOR: A valid measure of journal quality? **Nature**, v. 435, p.1003-04, 2005. Disponível em: <www.nature.com/nature/journal/v435/n7045/full/4351003b.html>. Acesso em: 23 ago. 2007.
- JAFARY, M. H.; JAWAID, S. A. How relevant are impact factor and indexation in medline?: Impact factor and indexation in MEDLINE. **Pak. J. Med. Sci**, v. 23, n. 1, p. 1-3, 2007. Disponível em: <www.pjms.com.pk>. Acesso em: 23 agosto 2007.
- LAWRENCE, S. Online or invisible? **Nature**, v. 411, n. 6837, p. 521, 2001.
- MARZIALE, M. H. P.; MENDES, I. A. C. O fator de impacto das publicações científicas. **Rev. Latino-Am. Enfermagem**, Ribeirão Preto, v. 10, n. 4, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-11692002000400001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 Ago. 2007.
- SEGLIN, P. O. Why the impact factor of journals should not be used for evaluating research. **BMJ**, v. 314, p. 497, 1997. Disponível em: <<http://www.bmj.com/cgi/content/full/314/7079/497>>. Acesso em: 20 ago. 2007.
- TARGINO, M. G.; GARCIA, J. C. R. Ciência brasileira na base de dados do Institute for Scientific Information (ISI). **Ciência da Informação**, Brasília, v. 29, n. 1, p. 103-117, jan./abr. 2000.
- TESTA, J. The ISI Database: the journal selection process. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 27, n. 2, 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-19651998000200022&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 27 ago. 2007.
- THOMSON SCIENTIFIC. **The <little> book of <BIG> VALUE**. Disponível em: <<http://scientific.thomson.com/media/pdfs/littlebookofbigvalue.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2007.

Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para a gestão de recursos hídricos do rio Pirapama, Pernambuco, Brasil (doi:10.4136/ambi-agua.23)

Celso A. G. Santos¹; Richarde Marques da Silva²

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba
E-mail: celso@ct.ufpb.br

²Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba
E-mail: richardemarques@yahoo.com.br

RESUMO

Este estudo apresenta a aplicação do modelo hidrológico distribuído baseado em Sistema de Informações Geográficas – AÇUMOD na estimativa das vazões e potencialidades hídricas das sub-bacias do rio Pirapama, para uso do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Pirapama (COBH-Pirapama). A aplicação do modelo abrangeu diversas etapas, tais como: seleção dos dados de precipitação, discretização da bacia em uma malha de células e calibração empírica dos parâmetros do modelo. O modelo foi calibrado e validado com dados mensais de pluviometria para o período de 1987 a 2001. Foi constatado que os parâmetros função de infiltração, capacidade mínima de água no solo para gerar escoamento e capacidade média de armazenamento de água no solo foram os mais importantes durante o processo de calibração, influenciando diretamente no volume escoado calculado. A diferença entre o volume observado e o calculado durante os processos de calibração e validação foram respectivamente -12,65% e 18,87%. Os resultados das vazões simuladas com o modelo AÇUMOD, comparadas com as observadas mostraram que o modelo representa satisfatoriamente o comportamento hídrico da bacia e, dessa forma, pode-se considerá-lo como uma ferramenta promissora nas simulações chuva-vazão, na estimativa de curvas de permanência e na regionalização ou previsão de vazões para a bacia do rio Pirapama, bem como outras do litoral do nordeste do Brasil.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; AÇUMOD; SIG; gestão; Pernambuco.

Application of the hydrologic model AÇUMOD based on GIS for water resources management of Pirapama River, Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

This study presents the application of the distributed hydrological model based on GIS – AÇUMOD to estimate the water discharges and potentialities of Pirapama river sub-basins, to be used by the Pirapama River Basin Committee (COBH-Pirapama). The model application included several steps, such as: precipitation data selection, basin discretization into cells, and model parameter calibration using try-and-error technique. The model was calibrated and validated with monthly precipitation data for the period 1987–2001. It was noted that the following parameters were the most important ones during the calibration process: infiltration function, soil minimum water capacity to generate runoff, and soil mean water storage capacity, which directly affect the computed runoff volume. The difference between observed and computed runoff during the calibration and validation processes were respectively -12.65% and 18.87%. The results of the simulated discharges by AÇUMOD,

compared to observed ones, showed that the model satisfactorily represents the water basin behavior and, therefore, it can be considered a promising tool for rain-runoff simulation, permanence curve estimation, and discharge regionalization or prediction for Pirapama river basin as well as to other basins in the costal area of northeastern Brazil.

Keywords: hydrologic modeling; AÇUMOD model; GIS; management; Pernambuco.

1. INTRODUÇÃO

A relação da água com o planeta Terra é complexa e está diretamente associada ao crescimento da população humana, ao processo de urbanização dos grandes centros urbanos ao longo dos séculos e aos usos múltiplos da água, que afetam tanto a quantidade como a qualidade da água existente (Tundisi, 2003).

Atualmente, uma das maiores preocupações dos órgãos e comitês de bacias responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos é com os grandes períodos de escassez de água e, conseqüentemente, com a quantidade de água armazenada nos reservatórios para o abastecimento urbano em geral.

Nesse sentido, a gestão dos recursos hídricos vem se tornando uma área cada vez mais relevante no contexto dos recursos hídricos, em especial no Nordeste, principalmente, naquelas regiões mais densamente povoadas, onde o problema da falta de água é ainda mais preocupante, como é o caso da Região Metropolitana do Recife – RMR, um dos maiores aglomerados urbanos do Brasil com mais de três milhões de habitantes.

Mais recentemente, em meados da década de 1990, a RMR sofreu com dois períodos de forte estiagem em 1993–94 e 1998–99. Entre 1998–1999, o racionamento d’água foi ampliado e atingiu o seu nível de alerta mais crítico, levando quase todos os bairros da RMR a conviver com um regime severo de racionamento de água, chegando alguns locais da RMR a passarem vinte e quatro horas com água e quarenta e oito horas sem água. Ao final de 1999, um regime ainda mais severo foi implantado em alguns bairros da RMR, que chegaram a ter um dia com água e nove dias sem água, devido ao baixo volume de água armazenada nas barragens da região nesse período (Nascimento, 2003).

Uma das medidas encontradas para amenizar a escassez de água na RMR foi a construção do reservatório Pirapama, localizado na bacia do mesmo nome, para atenuar a crise no setor de abastecimento de água na RMR. Devido à importância do conhecimento da regularização das vazões dos cursos d’água nos exutórios das sub-bacias que alimentam os reservatórios responsáveis pelo abastecimento da RMR, no presente estudo optou-se por utilizar a curva de permanência como principal indicativo do comportamento hidrológico das potencialidades hídricas das sub-bacias da bacia do rio Pirapama. A curva de permanência ou de regularização relaciona a vazão ou o nível do rio e sua permanência no tempo em que a vazão é maior ou igual ao valor especificado (Tomasella, 2005).

Nos últimos anos, o Sistema de Informações Geográficas – SIG vem sendo utilizado para diversos fins em modelagem hidrológica, seja na representação do modelo de elevação do terreno, na caracterização do uso e ocupação do solo da bacia, ou na aplicação direta do acoplamento entre modelos hidrológicos num SIG. Nesse sentido, o uso do SIG permite agregar, em um único pacote, a capacidade de mapear características e de associá-las a banco de dados, o que permite análises espaciais em um curto espaço de tempo (Silva; Pruski, 2005).

Assim, o acoplamento entre modelos hidrológicos e o SIG se constitui em uma ferramenta que permite a integração entre componentes espaciais, sociais, bióticos e físicos, permitindo simulações do comportamento hidrológico, a partir da manipulação das

características físicas da bacia, para se avaliar as possíveis alterações do uso do solo de bacias hidrográficas. Como exemplo de estudos que utilizaram a integração do SIG com modelagem hidrológica, podem-se citar os estudos de Maidment (1993), King et al. (1996), Mendes (1996), Saghafian et al. (2000), Pullar e Springer (2000), Semmens et al. (2001), e Galvêncio e Sousa (2004).

Nesse contexto, este estudo busca investigar as potencialidades hídricas da bacia do rio Pirapama, pela aplicação do modelo hidrológico distribuído e baseado em Sistema de Informações Geográficas chamado AÇUMOD, para representar o comportamento da distribuição espacial e temporal das vazões e ajudar na quantificação e análise das potencialidades da bacia do rio Pirapama. A utilização desse modelo, na modelagem das vazões das sub-bacias do rio Pirapama, busca oferecer ao comitê de bacia COBH-Pirapama uma importante ferramenta para ajudá-lo no processo de tomada de decisões.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. A Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Pirapama está localizada no Estado de Pernambuco, mais precisamente na parte sul-oriental a aproximadamente 8° 22' de Latitude Sul e 35° 00' de Longitude Oeste. A bacia do rio Pirapama é composta por doze sub-bacias: Riacho Arandu, Arroio Sicupema, Rio Gurjaú, Riacho Macacos, Riacho Cajabuçu, Manoel Gonçalves, Rio Pirapama (montante), Rio Gurjaú (jusante), Gurjaú-São Braz, Rio Pirapama (jusante), Riacho Utinga de Cima, e Santa Emília (Figura 1).

O rio Pirapama nasce no município de Pombos (Mesorregião do Agreste Pernambucano), a 450 metros de altitude e percorre aproximadamente 80km até seu exutório. A Bacia Pirapama é formada por vários afluentes, onde se destacam, por suas dimensões, o rio Gurjaú e os riachos dos Macacos, Cajabuçu e Arandu, ambos na margem esquerda; e os riachos Santa Amélia, Utinga de Cima e Camaçari, na margem direita. Essa rede hidrográfica limita-se ao norte com as bacias dos rios Jaboatão e Tapacurá, a oeste com a bacia do rio Ipojuca, ao sul com as bacias dos rios Massangana e Ipojuca e a leste com a bacia do rio Jaboatão (Pernambuco, 2000). A bacia ocupa parte dos municípios de Jaboatão dos Guararapes, Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Moreno, Escada, Vitória de Santo Antão e Pombos, sendo, os quatros primeiros inseridos na Região Metropolitana do Recife.

2.2. Descrição do Modelo AÇUMOD

O modelo AÇUMOD foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal da Paraíba, com o objetivo de ajudar no planejamento e no gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas da região nordeste do Brasil. Uma descrição mais detalhada das funções desse modelo pode ser encontrada em Silans et al. (2000), que implementaram o modelo para a bacia do rio Piancó e que discutiram as bases relativas a sua implementação.

O AÇUMOD é um modelo hidrológico distribuído contínuo que efetua o balanço hídrico na rede de drenagem da bacia hidrográfica. O modelo é do tipo determinístico distribuído linear e é uma adaptação do modelo de Simulação a Malhas Quadradas Embutidas – SIMMQE, e foi utilizado pela primeira vez pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, para a modelagem hidrológica da bacia do Rio Parnaíba, localizada no Estado de São Paulo, no qual obteve resultados satisfatórios na modelagem chuva-vazão (BRASIL, 1983).

Algumas modificações foram introduzidas em seus algoritmos no modelo AÇUMOD para adaptá-lo à modelagem de chuva-vazão em regiões do Nordeste do Brasil como testado

nos estudos de Silans et al. (2000), Paiva (2000), Silva Júnior et al. (2000), Silva et al. (2004) e Silva (2005).

A utilização desse modelo foi baseada no fato de ele considerar a distribuição espacial e temporal da chuva e de informações hidroclimatológicas, tal como a evapotranspiração, além

Figura 1. Localização da bacia Pirapama, sua hidrografia, sub-bacias e postos pluviométricos e fluviométricos.

de permitir as simulações das vazões em qualquer ponto previamente definido dentro da bacia. No modelo AÇUMOD, o espaço geográfico da bacia é dividido em uma malha retangular formada por células (ou quadrículas). Em cada quadrícula, o ciclo hidrológico é representado e simulado por um modelo hidrológico conceitual, por meio de um conjunto de quatro reservatórios que serão descritos na modelagem do ciclo hidrológico, os quais possuem parâmetros descritivos do ciclo para cada quadrícula (Figura 2 e Tabela 1).

2.3. Dados utilizados

Os dados de precipitação foram obtidos dos postos pluviométricos Pombos, Engenho Cachoeirinha e Pirapama junto à Agência Nacional de Águas e ao Laboratório de Meteorologia do Estado de Pernambuco. A localização geográfica dos postos utilizados encontra-se na Figura 1. Esse período foi escolhido por possuir a maior série de dados

observados de precipitação para a maior quantidade de postos disponíveis na bacia e nas suas proximidades. Os dados de fluviometria foram obtidos do posto Pirapama (Figura 1), também junto à ANA para o período de 1987 a 2001, período que coincide com a chuva observada.

Figura 2. Conjunto dos reservatórios que simulam o ciclo hidrológico no AÇUMOD.

Tabela 1. Descrição dos parâmetros do modelo AÇUMOD.

Parâmetros	Descrição
AGUA	quantidade de água disponível para gerar os escoamentos, em mm
CRT	capacidade média de armazenamento de água no solo, em mm
DCRT	capacidade mínima de água no solo para gerar escoamento, em mm
DR	variação da quantidade de água no solo, em mm
ETR	evapotranspiração real, em mm
FN	função de infiltração, em mm
PM	precipitação total, em mm
Q	lâmina escoada para uma determinada zona hidrológica homogênea
QI	escoamento infiltrado, antes do retardamento no reservatório subterrâneo
QI _{max}	nível de transbordamento do reservatório de alimentação do lençol freático
QR	escoamento superficial, antes do retardamento no reservatório superficial
QR _{max}	nível de transbordamento do reservatório de escoamento superficial
QRR	parcela do escoamento superficial após passar pelo reservatório solo
Q _{sur}	escoamento superficial direto
RBA	quantidade útil de água no solo, antes da precipitação, em mm
R _{freat}	nível de água no reservatório subterrâneo no tempo inicial, em mm
RHA	reserva útil de água no solo posterior à precipitação, em mm
R _{max}	reserva máxima de água no solo, acima do qual nenhuma água é retida
RR	nível inicial de água no reservatório de escoamento superficial, em mm

Os dados observados de chuva e vazão, utilizados para a calibração e a validação do modelo, foram divididos em duas séries. A primeira de janeiro de 1987 a dezembro de 1994, período de oito anos, voltada para a calibração do modelo, e a segunda série de janeiro de

1995 a dezembro de 2001, compreendendo um período de sete anos, a qual foi usada para a validação do modelo.

Os dados evaporimétricos utilizados no modelo foram medidos em tanque Classe A, e obtidos junto ao LAMEPE. Outra informação de entrada para o modelo AÇUMOD é o tempo de concentração da água na bacia. Existem muitas fórmulas para se determinar o tempo de concentração numa bacia (T_c). No presente estudo, o T_c foi calculado pela equação do *California Highways and Public Works*:

$$T_c = \left(\frac{0,87L^3}{H} \right)^{0,385} \quad [1]$$

em que T_c é o tempo de concentração em horas, L é o comprimento do talvegue em quilômetros, sendo H a diferença de cotas entre o ponto mais afastado da bacia e o ponto considerado em m, dada pela seguinte relação: $H = LI$, em que I é a declividade equivalente constante em m/m. Para a bacia do rio Pirapama com $L = 80,6\text{km}$ e $H = 0,403\text{km}$, o tempo de concentração foi calculado como sendo igual a 8,91 dias.

Tabela 2. Descrição dos postos pluviométricos utilizados pelo modelo AÇUMOD.

Código	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Nome do Posto
0835137	290	8° 09' 00" S	35° 22' 48" W	Pombos
0835068	360	8° 13' 30" S	35° 16' 37" W	Engenho Cachoeirinha
0835138	30	8° 16' 43" S	35° 03' 50" W	Pirapama

2.4. Zonas Hidrologicamente Homogêneas

As zonas hidrológicas homogêneas são definidas como regiões com a mesma produção de água para uma mesma precipitação e umidade inicial do solo. Para a discretização das zonas homogêneas, foram utilizadas técnicas de cartografia digital, como a superposição de mapas digitais da bacia de tipos de solo, de vegetação, de geologia, e de topografia. Essas zonas são utilizadas pelo AÇUMOD para a espacialização dos parâmetros em cada umas das zonas homogêneas.

As zonas hidrologicamente homogêneas para a bacia do rio Pirapama (Figura 3) foram definidas em cinco zonas homogêneas (Silva, 2005):

- Argilosa: esta área identificada na bacia é constituída por solos que apresentam baixas taxas de infiltração e são encontrados na parte alta da bacia.
- Saturada: esta zona hidrológica apresenta solos denominados de indiscriminados, constituídos principalmente por areia quartzosa, freqüentemente encontrada em praias e mangues.
- Latossolo: esta zona é constituída essencialmente por solos não-hidromórficos, com horizonte A moderado e horizonte B latossólico, de textura argilosa ou média, rico em sesquióxidos, muito porosos, além de bastante permeáveis e de acentuada a fortemente drenados, esta zona é caracterizada por solos espessos, com fraca distinção entre os horizontes, pouco fértil e com evolução antiga.
- Aluvial: o solo desenvolvido sobre sedimentos aluviais associados às planícies das principais drenagens da região, apresenta granulometria arenosa e horizonte A bem desenvolvido. Essa zona está localizada após o reservatório Pirapama.
- Arenosa: esta zona ocorre na maior parte da bacia, principalmente, na sub-bacia do posto pluviométrico Pirapama e é caracterizada por uma alta taxa de infiltração.

2.5. Zonas pluviométricas e evaporimétricas

As zonas pluviométricas e evaporimétricas foram calculadas para cada quadrícula discretizada da bacia, pelo método de Thiessen, que associa para cada quadrícula o posto pluviométrico mais próximo (Figura 4).

Figura 3. Mapa das zonas hidrologicamente homogêneas da bacia do rio Pirapama no modelo AÇUMOD (Silva, 2005).

A evaporação na bacia é calculada a partir das médias mensais observadas pela seleção de uma das três opções disponíveis no modelo: (a) Tanque Classe A; (b) Fórmula de *Penman*; e pelo (c) Método de *Hargreaves*. Neste trabalho foi escolhida a opção Tanque Classe A, devido à existência de uma longa série de dados observados na bacia.

Foram utilizados dados diários de precipitação observados de janeiro de 1987 a dezembro de 1994 de três postos pluviométricos (Tabela 2), e as médias mensais de evapotranspiração.

2.6. Construção das curvas de permanência

A curva de permanência indica a porcentagem do tempo em que qualquer descarga foi igualada ou excedida. Para a construção das curvas de permanência no presente estudo, procurou-se estabelecer intervalos de classe de vazões de acordo com a magnitude desses eventos e, no caso presente, usou-se uma metodologia proposta por Tucci (2001) para estabelecer os intervalos de classe de vazão e as respectivas frequências acumuladas.

Após o cálculo das vazões diárias, partiu-se para a modelagem das potencialidades de cada sub-bacia pelo uso de um módulo do modelo AÇUMOD, denominado “**Gerar Potencialidades das Sub-Bacias**”. Esse módulo calcula algumas métricas descritivas que permitem a avaliação do modelo no período compreendido da modelagem, como: (a) desvio padrão; (b) coeficiente de assimetria; (c) coeficiente de variação; e (d) curva de permanência das vazões. No presente trabalho, são apresentadas as curvas de permanência das vazões de cada sub-bacia estudada.

Para a construção das curvas de permanência foram utilizados dados diários da média da precipitação calculada pelo método de Thiessen dos três postos pluviométricos na bacia Pirapama. Dessa série, foram geradas vazões diárias para cada uma das doze sub-bacias.

Figura 4. Representação das áreas de influência de cada posto pluviométrico da bacia do rio Pirapama no modelo AÇUMOD, calculada pelo método de Thiessen (Silva, 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração do modelo

Para a calibração do modelo, foram definidos *a priori* os valores dos parâmetros do modelo a partir da extrapolação dos valores calibrados e validados, obtidos pelos estudos de Paiva (2000) e Silva Júnior et al. (2000) para a bacia do rio Gramame, localizada próxima à bacia Pirapama e também inserida na costa oriental do Nordeste do Brasil. A calibração dos parâmetros para a bacia do rio Pirapama foi realizada empiricamente, baseando-se em diversos trabalhos e comparando-se a média mensal da vazão calculada com a média mensal da vazão observada no posto fluviométrico Pirapama.

Os valores dos parâmetros calibrados para as cinco zonas hidrológicas homogêneas (Tabela 3) mais sensíveis durante a parametrização do modelo são aqueles que definem a quantidade do escoamento: (a) *CRT*, que corresponde à capacidade média de armazenamento de água no solo, em milímetros; (b) *DCRT*, que representa a capacidade de armazenamento de água no solo, abaixo da qual não há escoamento, também medido em milímetros; (c) *CQI*, coeficiente que simula a descarga dos reservatórios intermediários, muito sensível nas zonas onde o escoamento de base é elevado; e (d) *FN*, parâmetro da função de infiltração, quando positivo, permite apenas que a água infiltre e, quando negativo, torna possível a infiltração e o escoamento da água; isto é, para solos profundos, esse parâmetro deve receber valores inferiores a zero, assim, quanto mais espesso for o solo, menor deverá ser o valor atribuído à zona correspondente. O parâmetro *FN* foi ajustado com esses valores, pois a bacia do rio Pirapama está localizada sobre uma formação geológica do tipo sedimentar, a qual se caracteriza por possuir solos argilosos e profundos.

A capacidade média de armazenamento de água no solo e a infiltração tiveram uma grande influência no total do volume calculado, principalmente nas zonas argilosa, aluvial e arenosa. Essa variabilidade deve-se ao fato de que há uma enorme heterogeneidade dos solos

na bacia, sobretudo com diferentes características de taxas de infiltração e de armazenamento d'água.

Tabela 3. Parâmetros calibrados do modelo AÇUMOD.

Parâmetros	CRT	DCRT	CMR	FN	QRmax	CQR	QImax	CQI
Argiloso	51	28	4,5	-450	700	0,004	800	300
Latossolo	155	25	4,5	-90	600	0,010	50	20
Saturado	90	30	4,5	-60	650	0,008	400	70
Aluvial	62	30	4,5	-85	850	0,007	250	30
Arenoso	130	70	4,5	-70	450	0,030	80	10

O hidrograma obtido durante o processo de calibração mostra que os resultados da aplicação podem ser considerados satisfatórios (Figura 5), uma vez que, foi obtido um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,83, e uma diferença entre o volume total escoado observado no período e o calculado igual a -16,50%, no período, como apresentado na Tabela 4. Com o objetivo de comparar a confiabilidade da calibração dos parâmetros do modelo, calculou-se o desvio quadrático médio (RMSE) pela equação (2), e o erro médio quadrático (MSE) pela equação (3), das vazões mensais observadas e calculadas. Os valores obtidos do RMSE e do MSE estão dispostos na Tabela 4.

$$RMSE = \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{calc})^2}}{Qm_{obs}} \right] \times 100 \quad [2]$$

em que N é o número de dados utilizados no processo de validação, i refere-se a cada par de valores medidos e calculados, Q_{obs} é a vazão mensal observada, Q_{calc} é a vazão mensal calculada, e Qm_{obs} é a média da vazão observada.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{calc}})^2}{\sum Q_{obs}} \quad [3]$$

sendo Q_{obs} e Q_{calc} respectivamente as vazões observadas e calculadas.

Figura 5. Hietograma médio observado e hidrogramas observados e calculados para o posto Pirapama durante a calibração do modelo.

3.2. Validação do modelo

A validação de um modelo hidrológico é realizada com objetivo de verificar se os parâmetros encontrados na calibração do modelo representam satisfatoriamente as características da bacia. Dessa forma, tem-se um grau de confiabilidade para geração de vazão pelo modelo para outros períodos, principalmente no que se refere à sua utilização em estudos de monitoramento de níveis de reservatórios, seja para o controle de enchentes ou para o abastecimento d'água.

Tabela 4. Indicadores da qualidade da calibração do modelo.

Indicadores	Calculado	Observado
Volume (m ³)	9.849.254.400	11.796.019.200
Média (m ³ /s)	3.115	3.730
Correlação (R^2)		0,83
RMSE		6,90 %
MSE		0,087

Para a validação do modelo, foram utilizados dados diários de precipitação observados de janeiro de 1995 a dezembro de 2002 dos mesmos postos pluviométricos. Os resultados da comparação entre as vazões calculadas e as observadas mostraram um excelente coeficiente de correlação (R^2), e valores considerados satisfatórios para o RMSE e o MSE (Tabela 5).

Os dados de vazão referentes ao ano de 2002 para o posto Pirapama não foram utilizados na validação do modelo devido a pouca confiabilidade dos valores observados, pois com a construção da Barragem Pirapama, localizada a montante do posto Pirapama, a série de vazão para esse posto não representaria mais a vazão natural do rio.

A Figura 6 apresenta a precipitação média da bacia calculada pelo método de Thiessen e são expostas as vazões calculadas pelo modelo, na fase de validação, e as vazões observadas no período de 1995 a 2001.

Tabela 5. Indicadores da qualidade da validação do modelo.

	Calculado	Observado
Volume (m ³)	10.235.116.800	8.610.624.000
Média (m ³ /s)	3.237	2.723
Correlação (R^2)		0,89
RMSE		28,16 %
MSE		0,083

Figura 6. Hietograma médio observado e hidrogramas observados e calculados para o posto Pirapama durante a validação do modelo.

3.3. Potencialidades das Sub-Bacias do Rio Pirapama

As vazões máximas calculadas para as sub-bacias do rio Pirapama foram obtidas pela equação [4]. Para o cálculo das potencialidades das sub-bacias foram escolhidas duas porcentagens que poderiam ser outorgadas (20 e 30%), uma vez que não existe um valor definido para o Estado de Pernambuco. Os resultados das vazões máximas calculadas são apresentados na Tabela 6.

$$Q_{max} = XQ_{n\%}(t) \quad [4]$$

em que Q_{max} é o volume máximo a ser outorgado pelo requisitante, X é o percentual permitido pela legislação, e $Q_{n\%}(t)$ é a vazão que é superada em $n\%$ no tempo; e.g., Q_{50} é a vazão que é superada em 50% do tempo, conhecida também como mediana das vazões, e Q_{90} é aquela em que a vazão é superada em 90% do tempo.

A Figura 7 apresenta as curvas de permanência simuladas para cada sub-bacia da bacia Pirapama. Os resultados obtidos mostraram que as sub-bacias com maior potencialidade hídrica são Rio Pirapama, com vazões Q_{50} igual a 17,8m³/s e Q_{90} igual a 10,0m³/s (Figura 7j), e Gurjaú-São Braz, com vazões Q_{50} igual a 15,6m³/s e Q_{90} igual a 8,1m³/s (Figura 7i).

Com relação às menores potencialidades hídricas, as sub-bacias de Manoel Gonçalves (Figura 7f), Cajabuçu (Figura 7e), Utinga de Cima (Figura 7l) e Arandu (Figura 7a) foram as que apresentaram as menores vazões nos seus exutórios, todas com Q_{50} abaixo de 1,0m³/s e Q_{90} inferior a 0,5m³/s.

Tabela 6. Vazões calculadas para as sub-bacias do rio Pirapama.

SUB-BACIA	Q_{50} (m ³ /s)	Q_{90} (m ³ /s)	Q_{max} (m ³ /s)			
			20% Q_{50}	30% Q_{50}	20% Q_{90}	30% Q_{90}
Arandu	1,0	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1
Barragem Gurjaú	3,1	1,6	0,6	0,9	0,3	0,5
Barragem Pirapama	10,5	4,0	2,1	3,2	0,8	1,2
Cajabuçu	0,9	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1
Gurjaú-São Braz	15,6	8,1	3,1	4,7	1,6	2,4
Macacos	8,4	4,5	1,7	2,5	0,9	1,4
Manoel Gonçalves	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1
Rio Gurjaú	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Rio Pirapama	17,8	10,0	3,6	5,3	2,0	3,0
Santa Emília	1,2	0,3	0,2	0,4	0,1	0,1
Sicupema	3,1	1,7	0,6	0,9	0,3	0,5
Utinga de Cima	1,0	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1

4. CONCLUSÕES

O modelo hidrológico estudado se caracteriza pela capacidade de tratar grandes sistemas de recursos hídricos de forma a representar de forma eficiente as vazões observadas e calculadas, possuindo capacidade de adaptação a uma grande variedade de problemas de análises de sistemas de aproveitamentos hídricos, além de proporcionar uma fácil representação dos resultados pelas interfaces amigáveis. Esse tipo de modelo permite quando necessário alterar a estrutura e as regras operacionais dos sistemas, além de tolerar a alteração no formato dos dados de entrada, possibilitando a análise de vários cenários indispensáveis para o planejamento e manejo de recursos hídricos.

As zonas homogêneas, zonas argilosa, aluvial e arenosa apresentaram os maiores volumes escoados. Essa variabilidade deve-se ao fato de que há uma enorme heterogeneidade dos solos na bacia, sobretudo com diferentes características de taxas de infiltração e de

armazenamento d'água. O modelo apresenta em seu algoritmo uma característica que permite caracterizar a distribuição espacial dos postos fluviométricos, além de determinar as potencialidades de cada sub-bacia.

Conclui-se do que foi exposto que dentre todas as sub-bacias constituintes da bacia hidrográfica do rio Pirapama, aquela com menor potencialidade hídrica foi a sub-bacia do Rio Gurjaú (jusante) com vazões médias em torno de 0,2 m³/s. Já a sub-bacia com maior potencial

Figura 7. Curva de permanência de vazão das sub-bacias do Rio Pirapama, entre 1987 e 2001.

hídrico foi a sub-bacia do Rio Pirapama (jusante) com vazões médias variando de 40 a 20 m³/s com uma curva de permanência de 60% no período avaliado.

Os resultados obtidos são promissores, podendo o modelo ser considerado como uma ferramenta promissora na simulação de vazões em qualquer ponto da bacia, o que atende aos propósitos do comitê da bacia.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Alain Marie Passerat de Silans, do Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental da UFPB, por fornecer o programa fonte utilizado no estudo, e à ANA (Agência Nacional de Águas) pela disponibilização dos dados utilizados. Os autores também foram apoiados com recursos e bolsas do CNPq e do MCT/CT-Hidro.

6. REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Modelo SIMMQE**: conceituação. Brasília, 1983. 50 p.
- GALVÍNCIO, J. D.; SOUSA F. A. S. Uso do modelo TOPAZ para a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 120-139, 2004.
- KING, K. W.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; SRINIVASAN, R. **Soil and water assessment tool**: SWAT. Temple: USDA, 1996. 450 p.
- MAIDMENT, D. R. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. In: DOVAR, K.; NATCHNEBEL, H. P. Application of geographic information systems in hydrology and water resources. In: VIENNA CONFERENCE, 1993, Viena. **Proceedings...** Viena: Int. Assoc. of Hydrological Sci., 1993. p. 181-192.
- MENDES, C. A. B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 47-66, 1996.
- NASCIMENTO, B. B. **Vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água potável da Região Metropolitana do Recife**: intermitência e poluição. 2003. 250f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2003.
- PAIVA, A. E. D. B. **Simulações hidrológicas na bacia do rio Gramame como subsídio ao processo de outorga**. 2000. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000.
- PERNAMBUCO. Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. **Agenda 21**: Bacia do Pirapama: zoneamento ecológico-econômico. Recife: CPRH/DFID, 2000. 250 p.
- PULLAR, D.; SPRINGER, D. Towards integrating GIS and catchment models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 15, n. 5, p. 451-459, 2000.

- SAGHAFIAN, B.; VAN LIESHOUT A. M.; RAJAEIL, H. M. Distributed catchment simulation using a raster GIS. **Environmental Modeling and Software**, Canberra, v. 2, n. 3/4, p. 199-203, 2000.
- SEMMENS, D. J.; MILLER, S. N.; HERNANDEZ, M.; BURNS, I. S.; MILLER, W. P.; GOODRICH, D. C. **Automated geospatial watershed assessment (AGWA) – a GIS-based hydrologic modeling tool**: documentation and user manual. Tucson: USDA-ARS, 2001.
- SILANS, A. M. B. P.; PAIVA, A. E. D. B.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do Peixe – Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 26-39, 2000.
- SILVA JÚNIOR, A. N.; SILANS, A. M. B. P.; PAIVA, A. E. D. B.; ALMEIDA, C. N. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio Gramame – Estado da Paraíba. In: SILVA, T. C.; GADELHA, C. L. M.; SILANS, A. M. B. P. (org.). **Bacia do rio Gramame**: hidrologia e aspectos ambientais para gestão dos seus recursos hídricos. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2000. p. 48-56.
- SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Gestão de recursos hídricos**: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- SILVA, R. M. **Previsão hidrossedimentológica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos de previsão climática e hidrológica**. 2005. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MARINHO, L. S.; NITÃO, I. A. Application of a distributed hydrologic and geographically referenced model to Pirapama river basin. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS, 25., 2004, Recife. **Proceedings...** Recife: CILAMCE, 2004. 1 CD-ROM.
- TOMASELLA, J. Permanência de cotas/vazões entre 1986 e 1996 em algumas bacias brasileiras. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 20, n. 7, p. 15-29, 2005.
- TUCCI, C. E. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 943p.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI**: enfrentando a escassez. São Carlos: Rima, 2003. 156 p.

Comunidade de palmeiras no entorno de escorregamentos no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Santa Virgínia, SP (doi:10.4136/ambi-agua.24)

Adriano Teixeira Bastos Neto¹; Simey Thury Vieira Fisch²

¹Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais - PPG-CA - Universidade de Taubaté
E-mail: adriaquim@ig.com.br

²UNITAU - Universidade de Taubaté, Departamento de Biologia
E-mail: simey@unitau.br

RESUMO

O trabalho foi realizado no Núcleo Santa Virgínia (Parque Estadual de Serra do Mar), São Paulo, Brasil (45° 30' W e 23° 17' S), com o objetivo de avaliar as diferentes respostas da comunidade de palmeiras em dois escorregamentos ocorridos no verão de 1996 devido a um evento atmosférico (Zona de Convergência de Sul Atlântico). Um dos escorregamentos fica situado em área de floresta preservada e o outro em uma área de vegetação secundária. Para avaliar a distribuição de comunidade de palmeiras, foram alocadas parcelas circulares de 100m² nas bordas das cicatrizes dos deslizamentos e no interior da vegetação adjacente em três altitudes (baixo, meio e topo). As palmeiras classificadas em três estádios ontogênicos (plântulas, jovens e adultos) estavam representadas por cinco espécies na área preservada (espécies de dossel superior: *Attalea dubia* e *Euterpe edulis* e espécies de sub-bosque: *Geonoma gamiova*, *G. pohliana* e *G. schottiana*) e quatro espécies na área de floresta secundária (as mesmas espécies, exceto *G. pohliana*). A perturbação causada pelos escorregamentos na comunidade de palmeiras se deu de forma que as espécies como *E. edulis* e *G. schottiana* na fase jovem foram estimuladas pelo aumento de luminosidade provocado pelos deslizamentos, enquanto que a espécie *G. gamiova* diminuiu drasticamente nestas condições em todas as fases de desenvolvimento. O padrão de regeneração observado indica que espécies de palmeiras dos diferentes estratos da floresta respondem de maneira diferente a este tipo de perturbação ambiental.

Palavras-chave: *Arecaceae*; ZCAS; Deslizamentos; Floresta tropical montana.

Palm community around landslide scars in State Park of Serra do Mar – Núcleo Santa Virginia, SP

ABSTRACT

This work was carried out at the Núcleo Santa Virginia (State Park of Serra do Mar), São Paulo, Brazil (45° 30' W and 23° 17' S) and has the goals of evaluating the response of the palm community in two landslide areas that occurred in the summer of 1996 due to an atmospheric event (Convergence Zone of South Atlantic). One of them is located in preserved forest area and the other in a secondary vegetation area nearby. In order to evaluate the palm community distribution, 100m² circular plots were allocated in the edges of the scars of the landslides and in the interior of the adjacent vegetation for three altitudes (bottom, middle and top). The palms were classified in three ontogenetic stages (seedlings, juveniles and adults) which represent five species in preserved area (canopy species: *Attalea dubia* and *Euterpe edulis*, understory species: *Geonoma gamiova*, *G. pohliana* and *G. schottiana*) and four species in secondary area (the same species, except *G. pohliana*). The disturbance caused

perturbation in the palm community. The juveniles of species *E. edulis* and *G. schottiana* were stimulated by the increase in luminosity provoked by landslides while *G. gamiova* decreased drastically in these conditions for all developmental stages. The regeneration pattern observed indicates that species from different forest strata can respond in different ways to this type of environmental disturbance.

Keywords: *Arecaceae*; SACZ; Landslides; Tropical montane rain Forest.

1. INTRODUÇÃO

O relevo da Serra do Mar, em São Paulo, impõe-se como unidade orográfica de borda escarpada de planalto, freqüentemente nivelada pelo topo em altitudes de 800 a 1.200 m (IPT, 1981; Almeida; Carneiro, 1998). Ocupadas por floresta ombrófila densa, essas escarpas da Serra do Mar, apresentam temperaturas médias anuais elevadas e grande pluviosidade, o que as sujeita a um processo de alteração intenso (IPT, 2003). Tais alterações se dão por meio de movimentos de massa, como: rastejos, escorregamentos translacionais e quedas de blocos. Os escorregamentos pertencem ao tipo mais atuante na dinâmica superficial das encostas montanhosas do sudeste brasileiro (Sestini, 1999; Domingues, 2001; Marcelino, 2003; Colângelo, 2005).

A zona costeira do Estado de São Paulo, no setor compreendido como Litoral Norte, está associada à direção predominante dos sistemas atmosféricos produtores de chuvas (São Paulo, 2006). Para Escobar & Costa (2001), esses sistemas ocorrem devido à Zona de Convergência do Atlântico Sul-ZCAS, um dos mais importantes fenômenos na escala intra-sazonal, que ocorre durante o verão na América do Sul e ocasiona altos índices pluviométricos. Definida convencionalmente como uma faixa persistente de nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste, a ZCAS se estende do sul da Amazônia ao Atlântico Sul-Central por alguns milhares de km, de exclusiva ocorrência nos meses de verão, segundo Teixeira e Satyamurty (2006) mostram o importante papel dessas bandas de nebulosidade na transferência de calor, momento e umidade dos trópicos para as latitudes mais altas.

Myster e Sarmiento (1998) afirmam que deslizamentos de terra são componentes característicos únicos na dinâmica das paisagens de encostas. Eles removem biomassa, terra e material orgânico. Enquanto expõem a rocha matriz, produzem gradientes nos espaços ambiental e biótico extremamente complexos, constituem-se em locais propícios à regeneração de espécies raras e caracterizam-se em perturbações sazonais localizadas. Não raro ocorrerem quedas de árvores das bordas para dentro da área exposta, fato que concorre para a redução da velocidade do processo de recuperação.

Rossi e Pfeifer (1999) afirmam que a alta precipitação, típica na Serra do Mar, associada à alta umidade relativa do ar, ao relevo acidentado com altos declives acentua a suscetibilidade desses solos ao escorregamento. Domingues (2001) afirma que a porção Leste do território paulista, compreendido pela Serra do Mar, é uma região extremamente frágil devido à acelerada dinâmica natural de suas vertentes associadas a fatores hidrobiofísicos típicos e complexos. A autora afirma ainda que mesmo o equilíbrio precário dessas escarpas não impede sua ocupação por florestas valiosas de recursos naturais. Ocupam a área da floresta tropical úmida, caracterizada por elevadas temperaturas e por chuvas torrenciais, causando um processo de alteração intenso. Essas características (condicionantes ou variáveis dos movimentos de massa), associadas ao relevo e aos tipos de rochas, podem desencadear escorregamentos (IPT, 1981).

Tanto a pedologia quanto a geologia, segundo Ivanauskas (1997), são fatores atuantes na seletividade de espécies vegetais por estarem diretamente relacionadas ao teor de água, à

disponibilidade de nutrientes e ao espaço físico para o desenvolvimento de seu sistema radicular.

A importância de maiores ou menores eventos causadores de perturbações na dinâmica das florestas tropicais ainda não é bem compreendida. Observações de Tabarelli e Mantovani (1999) indicam ser a composição da floresta Atlântica Montana do sudeste brasileiro formada por setores de florestas em diferentes estágios sucessionais. Essa composição heterogênea das florestas tropicais pode indicar a regularidade com que ocorrem algumas perturbações. Para esses autores, a descrição de florestas de diferentes idades constituiu base para análise das alterações nas características da floresta durante o processo de regeneração e do seu poder de resiliência.

Segundo Beard (1944), as palmeiras mereceram lugar de destaque na dinâmica de regeneração de florestas tropicais. Áreas ocupadas por floresta tropical montana, propensas a perturbações, e que apresentem espécies de palmeiras endêmicas, estão sujeitas ao “palm brake”(formação de palmeiral). Nesse tipo de vegetação, em Porto Rico, o autor destacou a espécie *Euterpe globosa* entre 650 e 750 m de altitude; *Areca regia*, aos 1000 m em Guadalupe e, na Venezuela, a ocorrência de *Ceroxylon klopstockia* a 2000 m. Lugo e Scatena (1996) consideraram que o “palm brake” pode ser uma resposta da biota a perturbações naturais como escorregamentos. Svenning (1999), ao contestar a hipótese de Kahn e Granville (1992) de que palmeiras arborescentes dependam de clareiras grandes para se estabelecerem nas florestas tropicais, afirma que a grande densidade de espécies de palmeiras arborescentes em florestas perturbadas (clareiras) se deve ao fato de espécies pertencentes aos extratos mais baixos da floresta evitarem locais de regeneração.

O objetivo do presente estudo foi caracterizar a comunidade de palmeiras no entorno de áreas de escorregamentos ocorridos há 10 anos na Serra do Mar (Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Santa Virgínia), procurando determinar a influência do tipo de vegetação e da cota altitudinal desses escorregamentos sobre essa comunidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em duas áreas de escorregamentos ocorridos no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Santa Virgínia – (PESM-NSV), localizadas nas coordenadas geográficas 23°20'18 e 45°09'04 e 23°20'12S e 45°08'59W, região de escarpas e reversos da Serra do Mar, no Planalto de Paraitinga-Paraibuna, entre altitudes que variam de 870 m a 1.100 m. Sua área apresenta 57,80% de florestas ombrófilas densas, 29,70% de vegetação secundária e 10,80% de áreas antropizadas e reflorestamento de eucalipto (Tabarelli; Mantovani, 1999).

A cobertura vegetal nas áreas de estudo conjuga as vegetações arbustivas ou campestres, que se desenvolve nos topos de morros (Campo Montano) com a Floresta Ombrófila Densa, compondo, assim, a chamada Mata Nebular, que ocorre de 800 a mais de 1000 m de altitude, plenamente adaptada às condições de solo raso, com maior variação diária da temperatura e umidade. Assim, a vegetação é constituída por árvores e arvoretas com dossel de até 8 m de altura. Apresenta populações densas de bromélias e orquídeas terrícolas, pteridófitas, líquens e musgos e espécies de *Chusquea* (taquaras), que dão a essa formação uma fisionomia característica.

As cicatrizes dos escorregamentos E1 e E2, em seus interiores e cada qual com seu respectivo entorno, apresentam coberturas vegetais bastante distintas entre si. O E1, situado à margem esquerda do Rio Paraibuna, apresenta seu entorno ocupado por vegetação secundária e em seu interior são encontradas espécies exóticas como *Pinus*, e nativas não regionais como bracinga (*Mimosa scabrella*), ladeadas por vegetação em regeneração

natural de espécies de início de sucessão; como *Tibouchina mutabilis*, espécies de *Miconia*, *Leandra*, *Rapanea*, *Cecropia* e bambus; ocupando fendas e fissuras no solo íngreme e ressecado.

Figura 1. Cicatriz do escorregamento 1 (E1), ocorrido em vegetação secundária tardia.

O E2, situado à margem direita do Rio Paraibuna, em seu entorno exibe uma cobertura vegetal composta por floresta madura, com dossel de aproximadamente 20 m de altura. O interior da cicatriz, na cota base (880 m) apresenta alta densidade de bambus, seu terço médio (930 m) apresenta-se hegemonicamente povoado por *Tibouchina mutabilis* e, em seu terço superior (970 m), íngreme e acidentado, melastomatáceas arbustivas e gramíneas ocupam as reentrâncias do solo.

Figura 2. Cicatriz do escorregamento 2 (E2), ocorrido em floresta preservada.

Para caracterizar o fenômeno meteorológico ocorrido na época dos escorregamentos (1996), foram utilizadas imagens do satélite GOES no canal infra-vermelho, obtidas do Centro de Previsão de Tempo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPETEC/INPE.

A comunidade de palmeiras foi amostrada no limite imediato das cicatrizes dos escorregamentos e no interior da vegetação de entorno. Os dados foram obtidos a partir de parcelas circulares de 100 m² (5,64 m de raio) alocadas em três cotas altitudinais, aqui denominadas “base”, “meio” e “alto”, num total de 10 parcelas por escorregamento com 2000m² de área amostrada. Essas unidades amostrais foram dispostas em 4 parcelas na altura da base dos escorregamentos, 2 na borda das cicatrizes e 2 no interior (mínimo de 50 m da borda) da vegetação de entorno. O mesmo procedimento foi adotado na cota meio (Figura 3).

Figura 3. Esquema da disposição das parcelas nas cicatrizes do escorregamento E1 e escorregamento E2.

Na parte alta das cicatrizes, as faces das vertentes se estreitam, impossibilitando a alocação de parcelas de interior, contando-se com apenas as unidades amostrais de borda.

Em cada parcela circular foram contadas e classificadas, por espécie, todas as palmeiras encontradas. As espécies foram divididas em três estádios de desenvolvimento e os indivíduos foram registrados independentemente de sua idade cronológica em: Plântulas-indivíduos com até duas folhas com segmentação incompleta ou aderidos à semente; Jovens-indivíduos com ou sem estipe e isentos de estruturas reprodutivas; e Adultos-indivíduos com presença de estruturas reprodutivas ou cicatrizes dessas.

As espécies foram identificadas no campo, e foi coletado material testemunho (exsicatas) para comparação com duplicatas do material testemunho que se encontra depositado no Herbário do Museu de Biologia “Prof Mello Leitão”, em Santa Teresa-ES.

Os números resultantes da contagem de indivíduos por espécie possibilitaram a determinação de sua densidade e da frequência, a partir dos cálculos representados a seguir.

$$\text{Sendo: } \text{Densidade} = \frac{n^{\circ}}{A} \times ha$$

n° - número de indivíduos registrados;

A - área total das parcelas por altitude e situação (borda ou interior do remanescente florestal) em m²;

ha – 10000 m²

O cálculo da frequência foi realizado por escorregamento. O total de indivíduos de palmeiras registrado em cada escorregamento fundamentou a aplicação da proporcionalidade por espécie e estágio ontogenético. A seguir, a representação dos cálculos aplicados.

$$\text{Sendo: } \text{Frequência} = \frac{n^{\circ}}{T} \times 100$$

n° - número de indivíduos de determinada espécie e estágio ontogenético;

T - total de indivíduos de palmeiras registrados na escorregamento

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As áreas de estudo apresentam uma conjugação de fatores que as qualificam como altamente suscetíveis aos escorregamentos. De acordo com indicações da literatura (Sestini, 1999; Domingues, 2001; Marcelino, 2003; Colângelo, 2005), destacam-se entre esses fatores a geomorfologia e solos, a proximidade do Rio Paraibuna, histórico de uso do solo com práticas intensas de supressão à vegetação (E1), declividade acima de 22° e conformação orográfica do relevo. Quando somados esses fatores às intensas chuvas do verão de 1996, o quadro propício às movimentações de massa se concretizou.

De acordo com os registros da administração do PESM-NSV, em fevereiro de 1996 foi constatada a ocorrência de vários escorregamentos, dentro e fora dos limites do PESM – NSV. Nos 29 dias de fevereiro, daquele ano bissexto, houve registro de chuvas em 25 deles, e em 5 desses dias choveu mais de 50 mm. Esses foram: dia 11(81,4 mm), 13(176,4 mm), 14(108,6) e 15(84,4 mm). Os escorregamentos E1 e E2 ocorreram no dia 17 de fevereiro de 1996, e de acordo com os dados pluviométricos, não houve registro de chuva nesse dia (Fig 4).

Figura 4. Precipitação diária (mm/dia) para o mês de fevereiro de 1996.

Por meio de informações baseadas no histórico meteorológico do verão de 1995/96, é possível observar a formação de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a região sudeste nos dias que precederam os escorregamentos, indicando ser esse o evento meteorológico que os desencadeou. Teixeira e Satyamurty (2006) classificam os eventos que proporcionaram chuva maior ou igual a 50 mm dia⁻¹ como extremos e que são de ocorrência frequente na região da Serra do Mar.

Nas áreas amostrais foram registrados 1874 indivíduos (E1:706 e E2:1168), entre plântulas, jovens e adultos, de 5 espécies de palmeiras, sendo *Attalea dubia* e *Euterpe edulis* de dossel e *Geonoma gamiova*, *G. pohliana* e *G. schottiana* de sub-bosque. Apresentando 4 indivíduos registrados no E1, sendo 3 jovens e 1 plântula, *Attalea dubia* foi a espécie de

palmeira arbórea com menor ocorrência tanto no E1 quanto no E2. No E2, houve apenas o registro de um indivíduo jovem. Seu contra-ponto foi outra arbórea, *Euterpe edulis*, com a maior ocorrência registrada dentre as palmeiras (Tabelas 1 e 2).

As espécies típicas de sub-bosque apresentaram distribuição semelhante. Tanto *Geonoma gamiova* quanto *G. pohliana* e *G. schottiana* registraram densidade mais elevada em E2 que em E1. Embora os indivíduos jovens sejam maioria da população de *G. Gamiova*, tanto no E1 quanto no E2, a frequência de plântulas foi maior no interior do E1, (Tabela 3). A espécie *G. pohliana*, de ocorrência restrita ao E2, cujos 10 indivíduos registrados (Tabela 1), uma plântula e 9 jovens, ocorreram junto à margem direita do Rio Paraibuna, em áreas de maior umidade e de dossel acima de 10 m de altura. O que evidencia sua predileção por áreas de condições edáficas características da floresta ombrófila densa.

A distribuição em estádios ontogenéticos de *G. schottiana* apresentou um aumento na frequência de jovens no E2 à medida que se elevou a altitude. Um comportamento diferenciado das demais espécies, destacando-se, da mesma forma, sua ocorrência marcante nas parcelas de borda (Tabela 3).

No E1, apresentaram-se apenas 4 registros de plântulas, 22 jovens e 5 adultos e no E2, foram registradas 50 plântulas, 66 jovens e 25 indivíduos adultos (Tabela 1).

A comunidade de palmeiras nas áreas E1 e E2 apresentou padrão estrutural em que a frequência de indivíduos jovens foi predominante maior para a maioria das espécies (Tabela 3). Para Santos (1991), a estrutura populacional e a distribuição espacial das espécies estão associadas, além das relações reprodutivas naturais, às alterações ocorridas ao longo do tempo.

Os reais indicadores da influência dos escorregamentos na comunidade de palmeiras em floresta preservada seriam os indivíduos jovens das espécies que, embora apresentando menor abundância na borda que no interior, apresentam uma maior frequência nesses locais. Dessa forma, em dez anos, o aumento da frequência de jovens indica a resiliência da floresta preservada do E2, a qual não se repete no E1.

Tabela 1. Número de indivíduos de palmeiras registrados nas parcelas de borda (Bor) e interior (Int); nas cotas altitudinais base, meio e alto dos escorregamentos E1 e E2.

Espécies	E1						E2					
	Base		Meio		Alto		Base		Meio		Alto	
	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*
<i>A. dubia</i>												
Plântula	0	0	0	1	0	-	0	0	0	0	0	-
Jovem	0	0	0	3	0	-	0	0	0	1	0	-
Adulto	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
<i>E. edulis</i>												
Plântula	25	433	77	61	0	-	149	335	126	199	21	-
Jovem	15	15	11	16	0	-	25	26	12	14	1	-
Adulto	2	4	0	2	0	-	10	1	0	5	0	-
<i>G. gamiova</i>												
Plântula	0	3	0	0	0	-	2	2	0	1	0	-
Jovem	0	6	0	0	0	-	35	10	1	15	0	-
Adulto	0	1	0	0	0	-	11	0	0	15	0	-
<i>G. pohliana</i>												
Plântula	0	0	0	0	0	-	0	1	0	0	0	-
Jovem	0	0	0	0	0	-	4	5	0	0	0	-
Adulto	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
<i>G. schottiana</i>												
Plântula	0	2	0	2	0	-	8	0	6	1	35	-
Jovem	3	15	2	2	0	-	1	20	23	0	22	-
Adulto	0	5	0	0	0	-	0	0	7	0	18	-

Tabela 2. Densidade (número de indivíduos por hectare) de cada espécie de palmeira, nos escorregamentos E1 e E2, em três estágios de desenvolvimento: plântulas, jovens e adultos.

Espécies	E1						E2					
	Base		Meio		Alto		Base		Meio		Alto	
	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*
<i>A. dubia</i>												
Plântula	0	0	0	50	0	-	0	0	0	0	0	-
Jovem	0	0	0	150	0	-	0	0	0	50	0	-
Adulto	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
<i>E. edulis</i>												
Plântula	1250	21650	3850	3050	0	-	7450	16750	6300	9950	2100	-
Jovem	750	750	550	800	0	-	1250	26	600	700	100	-
Adulto	100	200	0	100	0	-	500	50	0	250	0	-
<i>G. gamiova</i>												
Plântula	0	150	0	0	0	-	100	100	0	50	0	-
Jovem	0	300	0	0	0	-	1750	500	50	750	0	-
Adulto	0	50	0	0	0	-	550	0	0	750	0	-
<i>G. pohliana</i>												
Plântula	0	0	0	0	0	-	0	50	0	0	0	-
Jovem	0	0	0	0	0	-	200	250	0	0	0	-
Adulto	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
<i>G. schottiana</i>												
Plântula	0	100	0	100	0	-	400	0	300	50	3500	-
Jovem	150	750	100	100	0	-	50	1000	1150	0	2200	-
Adulto	0	250	0	0	0	-	0	0	350	0	1800	-

(*) Bor: Borda, referente às parcelas de borda e Int: Interior, referente às parcelas de interior.

Tabela 3. Frequência (%) dos indivíduos de cada espécie de palmeira (em seus diferentes estádios ontogenéticos) em cada escorregamento.

Espécies	E1						E2					
	Base		Meio		Alto		Base		Meio		Alto	
	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*	Bor*	Int*
<i>A. dubia</i>												
Plântula	0	0	0	0,14	0	-	0	0	0	0	0	-
Jovem	0	0	0	0,42	0	-	0	0	0	0,05	0	-
Adulto	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
<i>E. edulis</i>												
Plântula	3,54	61,33	10,90	8,64	0	-	7,56	17,00	6,40	10,10	2,13	-
Jovem	2,12	2,12	1,56	2,26	0	-	1,26	1,32	0,6	0,71	0,10	-
Adulto	0,28	0,56	0	0,28	0	-	0,50	0,05	0	0,25	0	-
<i>G. gamiova</i>												
Plântula	0	0,42	0	0	0	-	0,10	0,10	0	0,05	0	-
Jovem	0	0,85	0	0	0	-	1,77	0,50	0,05	0,76	0	-
Adulto	0	0,14	0	0	0	-	0,56	0	0	0,76	0	-
<i>G. pohliana</i>												
Plântula	0	0	0	0	0	-	0	0,05	0	0	0	-
Jovem	0	0	0	0	0	-	0,20	0,25	0	0	0	-
Adulto	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
<i>G. schottiana</i>												
Plântula	0	0,28	0	0,28	0	-	0,40	0	0,30	0,05	3,55	-
Jovem	0,42	2,12	0,28	0,28	0	-	0,05	1,01	1,16	0	2,23	-
Adulto	0	0,70	0	0	0	-	0	0	0,35	0	1,82	-

As cotas base dos escorregamentos E1 e E2, $\pm$ 875 m apresentaram maior ocorrência de indivíduos das espécies *E. edulis*, *G. gamiova* e *G. schottiana*. A palmeira *G. pohliana* teve registros apenas na base do E2. Excetuando-se apenas *A. dubia*, que não ocorreu nessa altitude, o E2 apresentou maior densidade que o E1 para essas espécies. Os maiores valores de frequência e densidade se deram com *E. edulis* na cota base do entorno dos dois escorregamentos (Tabela 3). O E1, que ocorreu em área com cobertura vegetal em estágio secundário de regeneração, apresenta, no entorno de cota base, uma comunidade em adiantado estágio de regeneração. Seu dossel alcança entre 15 e 20m de altura, apresenta serapilheira com espessura de até 30 cm e ambiente mais úmido. A comunidade de palmeiras esteve representada por *E. edulis*, *G. gamiova* e *G. schottiana*. No E2 apresenta grande

densidade de bambus em sua porção mais próxima do Rio Paraibuna. No entorno do E2, nessa cota altitudinal, houve a maior ocorrência de *G. gamiova* e de *G. pohliana*, que não foi registrada no E1 (Tabela 3). As espécies típicas de sub-bosque ocorreram ao longo da margem do rio, guardando uma distância média aproximada de 30m na direção da base da vertente.

À medida que a altitude aumentou, para ± 920 m, o dossel teve sua altura reduzida para aproximadamente 12 m no E1. Houve, também, uma redução no número de espécies, de quatro para três: *A. dubia*, *E. edulis* e *G. schottiana*, sendo apenas *G. schottiana* de sub-bosque, enquanto que as outras duas espécies são típicas de dossel. A espécie *A. dubia* teve maior densidade registrada no E1, onde não houve ocorrência de *G. pohliana* nem de *G. gamiova* nessa altitude (Tabelas 1 e 2). No E2 houve registro de 92 indivíduos de *G. gamiova*, contra apenas 10 no E1, e para o *E. edulis* a densidade foi 40% maior que no E1 (Tabela 2). A espécie *G. schottiana* apresentou valores de densidade no E2 quatro vezes e meio maiores que os registrados no E1 (Tabela 2).

O fato de a vegetação de entorno, no alto das cicatrizes, apresentar altura média de 3,0m e característica arbustiva, há passagem da luz e plena exposição ao vento e, em função da acentuada declividade, o solo é seco.

Não houve registros de palmeiras nessa altitude no entorno de E1. No E2 houve registro de apenas duas espécies: *E. edulis* e *G. schottiana*. Essa última apesar de considerada, típica de sub-bosque, apresentou densidade superior à primeira.

Palmeiras, em florestas tropicais, podem responder positivamente a eventos perturbadores e estressantes, formando verdadeiros palmeirais (Lugo; Scatena, 1996) ou ‘palm brake’, segundo Beard (1944). Pelo fato dos estipes serem compostos por tecidos primários, sem presença de tecidos vasculares secundários (Tomlinson, 1990), as palmeiras, especialmente espécies arbóreas, têm por estratégia de colonização o acúmulo de reservas na base de seus estipes e mantém uma alta produção de massa foliar, aguardando a oportunidade de aumento da oferta de luz causada por uma perturbação qualquer que interfira no dossel (Salm, 2005). É o que sugere a elevada taxa de frequência de indivíduos jovens de *E. edulis* no E1 e E2, *G. gamiova* e *G. schottiana* no E2. Embora as espécies *G. gamiova* e *G. schottiana* sejam típicas de sub-bosque, apresentaram reação positiva ao aumento de luminosidade das bordas. Porém, o mesmo não se deu em todas as cotas altitudinais. Para *E. edulis*, a maior frequência de jovens registrada nas parcelas de borda, deu-se nas cotas base e meio duas áreas; para *G. gamiova*, apenas na cota base do E2 e para *G. schottiana*, sua maior frequência de jovens se deu nas cotas meio e alto do E2.

Os escorregamentos representam no ecossistema florestal um elemento no conjunto de perturbações que desencadeiam toda a dinâmica florestal. O processo sucessional em florestas tropicais úmidas depende fundamentalmente da ocorrência de perturbações e formação de clareiras (Brokaw, 1985; Martins; Rodrigues, 1999; Martini, 2002; Salm, 2005), que possibilita uma maior oferta de luz até os estratos mais baixos e ao solo. Como no caso das cicatrizes dos escorregamentos E1 e E2, o solo perdido torna esse processo muito mais lento. A luz que chega no interior de uma cicatriz recente, independentemente de sua forma, tamanho e localização, incidirá sobre o substrato nu.

Se a grande diversidade da floresta tropical é consequência da adaptação das espécies a um gradiente de luminosidade criado por perturbações (Maciel et al., 2002), as bordas das cicatrizes dos escorregamentos, diferentemente de seus interiores, constituem sítios propícios ao aparecimento de novas espécies e estímulo a espécies já ali situadas. Nesse último caso, a diversidade pré-existente no entorno das cicatrizes manifestar-se-á com o aumento da luminosidade, seja estimulando o crescimento e a mudança de estádios ontogenéticos, seja quebrando a latência do banco de sementes presente na serapilheira. De qualquer forma, essa

área também reproduz sua diversidade latente, bastante comprometida por ações supressoras intensas e que só foram interrompidas com a criação do PESM.

4. CONCLUSÃO

Os escorregamentos, constituídos como objetos do presente estudo, deram-se em decorrência de uma anomalia em que sistemas frontais deslocaram-se até a região nordeste do estado de São Paulo, em fevereiro de 1996, configurando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Após 10 anos da ocorrência do evento, eles encontram com suas cicatrizes ainda em fase inicial de regeneração.

A perturbação provocou alteração na comunidade de palmeiras da borda das cicatrizes em relação à floresta adjacente. Para espécies como *Euterpe edulis* e *Geonoma schottiana*, o aporte de luminosidade provocado pelo deslizamento parece ter estimulado o crescimento das plantas da borda aumentando a frequência de jovens e adultos em relação à floresta, enquanto *Geonoma gamiova* diminuiu drasticamente nessas condições em todos estádios de desenvolvimento.

A floresta do entorno também influenciou na composição e abundância de palmeiras das áreas estudadas, indicando que na condição de floresta secundária (E1) o processo de regeneração se dê de forma ainda mais lenta que em floresta preservada (E2).

As observações do presente estudo poderão contribuir para estudos sobre áreas de riscos em regiões de encostas, bem como subsidiar futuros modelos de previsão de recuperação de áreas já alteradas por escorregamentos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Florestal, na pessoa do Diretor do Núcleo Santa Virgínia do Parque Estadual da Serra do Mar, João Paulo Villani e seus funcionários, que tornaram viável a realização desta pesquisa; ao apoio nos trabalhos de campo da equipe do Grupo Ecossistemas Terrestres do Vale do Paraíba e Litoral Norte Paulista, Fernando Cembranelli, Larissa Rocha Santos, Matheus Fischer Danelli, Fabiana Brum e Pedro Luis de Carvalho; e às sugestões de Eduardo P.C. Gomes e Serafim Daniel Ballesterro.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
- BEARD, J. S. Climax vegetation in tropical América: colonial Forest Service, Trinidad & Tobago. **Ecology**, Washington, v. 25, n. 4, p. 127-158, 1944.
- BROKAW, N. V. L. Gap-Phase Regeneration in a Tropical Forest. **Ecology**, Washington, v. 66, n. 3, p. 682-687, 1985.
- COLANGELO, A. C. Sobre os modelos de magnitude-frequência e de estabilidade de vertentes. **Revista do Departamento de Geografia**, Universidade de São Paulo. São Paulo n.16, p. 11-23, 2005.

- DOMINGUES, E. N. Caracterização das feições erosivas e relações com o meio hidrobiológico em áreas impactadas na Serra do Mar, na região de Cubatão (SP). **Revista Geociências**, Rio Claro, v. 20, n. 1, p. 61-71, 2001.
- ESCOBAR, G. C. J.; COSTA, I. C. **Situações meteorológicas associadas à ocorrência de eventos zcas**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/eta/gcje/Congresso.doc>. 2001>. Acesso em: 13 de out. de 2006.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Roteiro de cadastros de risco de áreas com escorregamentos**. São Paulo. Publicação 2827. 2003.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. vol. 1.
- IVANAUSKAS, N. M. **Caracterização florística e fisionômica da Floresta Atlântica sobre a formação Pariquera-Açu, na Zona da Morraria Costeira do Estado de São Paulo**. 1997. 216f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- KAHN, F.; DE GRANVILLE, J. J. **Palms in forest ecosystems of Amazonia**. Berlim: Springer, 1992. 226p.
- LUGO, A. E.; SCATENA, F. N. Background and catastrophic tree mortality in tropical moist, wet, and rain forests. **Biotropica**, St. Louis, v. 28, n. 4, p. 585-599, 1996.
- MACEDO, E. S. Roteiro de cadastro de risco de áreas com escorregamentos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 10., 2002, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto : ABGEA, 2002.
- MACIEL, M. N. M.; WATZLAWICK, L. F.; SCHOENINGER, E. R.; YAMAJ, F. M. Efeito da radiação solar na dinâmica de uma floresta. Curitiba. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 101-114, 2002.
- MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP), usando técnicas de sensoriamento remoto**. 2003. 230f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- MARTINS, S. V.; RODRIGUES, R. R. Produção de serapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 405-412, 1999.
- MYSTER, R W; SARMIENTO, F.O. Seed inputs to Microsite Patch Recovery on two tropandean landslides in Ecuador. **Restoration Ecology**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 35-43, 1998.
- ROSSI, M.; PFEIFER, R. M. Remoção de material erodido dos solos de pequenas bacias hidrográficas no Parque Estadual da Serra do Mar em Cubatão – SP. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 141-156, 1999.

- SALM, R. The importance of forest disturbance for the recruitment of the large arborescent palm *Attalea maripa* in a seasonally-dry Amazonian forest. **Biota Neotropica**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 35-41, 2005.
- SANTOS, F. A. M. **Padrão espacial de jovens em relação a adultos de espécies arbóreas de cerrado que ocorrem no estado de São Paulo**. 1991. 209f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade Estadual de Campinas, 1991.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria do meio ambiente. Instituto Florestal. Parque Estadual da Serra do Mar. **Plano de manejo**. São Paulo: SMA, fev. 2006.
- SESTINI, M. F. **Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM-LANDSAT e SIG**. 1999. 140f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- SVENNING, J. C. Recruitment of tall arborescent palms in the Yasuní National Park, Amazonian Ecuador: are the tree fall important? **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 15, p. 355-366, 1999.
- TABARELLI, M.; MANTOVANI, W. A regeneração de uma floresta tropical montana após corte e queima (São Paulo-Brazil). **Revista Brasileira de Biologia**, São Carlos, v. 59, n. 2, p. 239-250, 1999.
- TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Eventos extremos de precipitação na região da Serra do Mar PARTE II: condições meteorológicas de grande escala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2006.
- TOMLINSON, P. B. **The structural biology of palms**. Oxford: Clarendon Press, 1990.

Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil (doi:10.4136/ambi-agua.25)

Andréa Sanae Horikoshi; Gilberto Fisch

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Taubaté
Departamento de Ciências Agrárias
E-mail: andreasanae@hotmail.com; gfisch@uol.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi elaborar o balanço hídrico atual para o município de Taubaté e analisar a questão da disponibilidade hídrica futura. Utilizou-se o método de Thornthwaite-Mather (1955) no cálculo do balanço hídrico climatológico, dados observacionais de precipitação e temperatura do ar (séries de 1965-2005 e 1992-2005) e dados simulados de temperatura e precipitação gerados pelo modelo HadCM3 (2010 a 2099). De uma forma geral, os cenários climáticos futuros apontam um aumento na temperatura do ar entre + 0,5°C a + 2,7°C, associado a um aumento da precipitação entre 80 e 150mm. Esses resultados provocarão um aumento do déficit de água (ao redor de 50 a 80 mm) e uma diminuição do excedente hídrico (próximo a 200mm). Esse aumento de precipitação não será suficiente para manter os níveis de evapotranspiração, pois este será muito maior, em função do aumento da temperatura do ar.

Palavras-chave: precipitação; evapotranspiração; modelo climático.

Actual and future climatological budget for Taubaté, SP, Brazil

ABSTRACT

The goal of this study was to determine the actual water budget for Taubaté, SP and investigate the future water availability. The Thornthwaite-Mather (1955) method was used for the climatological water budget combined with observed and simulated data of air temperature and precipitation. The future scenarios indicate an increase of temperature (ranging from + 0.5°C to + 2.7°C) and precipitation (ranging from 80 to 150 mm). These results will provoke an increase of the water deficit (ranging from 50 to 80 mm) and a decrease of the surplus of water (around 200 mm). The increase of the precipitation will not be sufficient to compensate for the increase of the water demands from evapotranspiration.

Keywords: rainfall; evapotranspiration; climatic simulation.

1. INTRODUÇÃO

A água é um elemento vital para a vida dos seres humanos e a sua disponibilidade possibilita o desenvolvimento tecnológico e social dos países. De toda água do planeta Terra, aproximadamente 97,3% é água salgada e apenas 2,7% é de água doce. Da água doce disponível, 77,2% se encontram em forma de gelo nas calotas polares, 22,4% se trata de água subterrânea, 0,35% se encontra nos lagos e pântanos, 0,04% se encontra na atmosfera e apenas 0,01% está nos rios (Romera e Silva, 2003).

A disponibilidade da água depende tanto das condições físicas da superfície da terra, quanto também das condições e variabilidade do clima, e afeta diretamente a vida animal e vegetal, e um dos seus mais conhecidos efeitos é a escassez de água. Segundo a FAO (2005), um em cada cinco países em desenvolvimento estará sofrendo de escassez de água até o ano de 2030, comprometendo a produção mundial de alimentos. Como consequência, poderá haver conflitos sociais.

Devido à grande demanda atual por recursos hídricos, faz-se necessário o conhecimento do ciclo da água dentro de uma bacia hidrográfica, principalmente das variáveis de precipitação e evapotranspiração. De acordo com Camargo (1971), para saber se uma região apresenta deficiência ou excesso de água durante o ano, é indispensável comparar dois elementos opostos do balanço hídrico: a precipitação que fornece a umidade para o solo e a evapotranspiração que consome a umidade do solo. Segundo Pereira et al. (2002), a disponibilidade hídrica pode ser quantificada pelo balanço hídrico climatológico, no qual fica evidenciada a flutuação temporal de períodos com excedente e com deficiência, permitindo, dessa forma, o planejamento das atividades agrícolas e a quantificação de irrigação.

O balanço hídrico é um método contábil de estimativa da disponibilidade de água no solo e baseia-se na aplicação do Princípio de Conservação de Massa (Pereira et al., 2002) em uma área de solo vegetado, contabilizando as entradas e saídas de água do solo. O balanço hídrico de uma região tende a se manter sem grandes alterações naturais, mas com o aumento populacional e o uso indiscriminado da água, as ações antrópicas podem acabar interferindo no ciclo hidrológico, por meio das taxas de precipitação, de infiltração no solo, da evapotranspiração e do escoamento superficial e profundo.

Segundo Nobre e Assad (2005), a temperatura média global do planeta à superfície vem aumentando nos últimos 120 anos, já tendo atingido + 0,6 a 0,7 °C. A maior parte desse aquecimento ocorreu nos últimos 50 anos, e a última década apresentou os três anos mais quentes dos últimos 1000 anos da história recente da Terra. Recentemente, o relatório do IPCC (2007) reforçou esses fatos, associando como sendo muito provável que esse aumento de temperatura do ar seja consequência de ações antrópicas. Ainda segundo Nobre e Assad (2005), o aumento de temperatura induz a uma maior evapotranspiração, reduzindo a quantidade de água no solo, mesmo que as chuvas não diminuam significativamente. Esse fato pode causar a substituição dos biomas existentes hoje, por outros mais adaptados a climas com menor disponibilidade hídrica para as plantas, tais como savanas substituindo florestas, caatinga substituindo savanas, semi-deserto substituindo caatinga. Sendo assim, são importantes estimativas futuras do ciclo hidrológico.

Collischonn (2001) afirma que os modelos de circulação geral representam o comportamento tridimensional da atmosfera em todo o globo e podem ser utilizados para analisar as mudanças climáticas causadas pelas interferências antrópicas, tais como o desmatamento e/ou o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Neste último caso, o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera provoca uma mudança do balanço de energia calculado pelo modelo, com o consequente impacto nos elementos climáticos, tais como temperatura do ar e precipitação.

Leite (2004) em seu trabalho sobre a disponibilidade hídrica das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Una, município de Taubaté, SP, obteve três cenários de disponibilidade versus demanda, que permitiu avaliar o grau de comprometimento da bacia e, constatou que, apesar da bacia não apresentar problema na sua disponibilidade hídrica no atual momento, em um futuro não muito distante, poderá se tornar uma bacia crítica passível de gerenciamento especial.

De acordo com Marengo e Alves (2005), a influência humana na forma de gerenciamento dos recursos hídricos, geração de energia, lançamento de esgotos nos rios,

irrigação e crescimento populacional, pode estar impactando de forma negativa as vazões do Rio Paraíba do Sul, pois as variações de chuvas não parecem estar associadas à tendência negativa das vazões durante as observações dos postos fluviométricos dos últimos 50 anos.

O objetivo deste trabalho é avaliar a disponibilidade de água atual para o município de Taubaté, baseado no balanço hídrico climatológico e realizar estimativas para cenários climáticos futuros (até o ano de 2099) baseado em dados de temperatura e precipitação gerados por uma simulação climática.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Conforme os resultados das análises de Fisch (1995), as principais características climáticas de Taubaté, SP são: um verão extremamente chuvoso (chove quase que diariamente no verão), e um inverno seco. O ano hidrológico inicia-se em agosto e termina em julho do ano seguinte, com 1.335 mm de total anual de precipitação com 42% da precipitação ocorrendo nos meses de dezembro a fevereiro.

Os dados meteorológicos necessários para a realização do Balanço Hídrico são temperatura do ar (para estimativas de evapotranspiração) e precipitação. Os dados de precipitação no período de 1983 a 2005 e os dados de temperatura no período de 1992 a 2005 foram coletados no posto meteorológico da Universidade de Taubaté (UNITAU). Além disso, utilizou-se também a série histórica do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), posto prefixo E2-022, com um período de dados mais longo (1964-2005).

Para os cenários futuros foram utilizados dados mensais de precipitação e temperatura do ar entre os anos de 1950 e 2099, calculados pelo modelo HadCM3. Este algoritmo foi desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Britânico (United Kingdom Meteorological Office) e é um modelo acoplado oceano-atmosfera, possuindo as seguintes características: a componente atmosférica tem 19 níveis com uma resolução espacial de 2,5 x 3,75 graus de latitude/longitude, produzindo uma grade global de 96 x 73 células, que equivalem a uma resolução de 417 km x 278 km na linha do Equador, passando para 295 km x 278 km a 45° de latitude. Por outro lado, a componente oceânica possui 20 níveis de profundidade e uma resolução horizontal de 1,25 km x 1,25 km (Johns et al., 1997). Os principais processos de transferência de energia (radiação, convecção, transporte por nuvens, turbulência, etc.) são incorporados neste modelo. O intervalo de tempo é de 30 minutos para a componente atmosférica e de 1 hora para a parte oceânica.

Segundo Marengo (2006), os cenários de emissão representam uma visão possível do desenvolvimento futuro de emissões de gases de efeito estufa e aerossóis, que têm efeito radiativo potencial. Esses cenários são baseados numa combinação coerente e consistente de elevações, tais como, demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudança na tecnologia. Assim como suas interações; enquanto o aumento dos gases de efeito estufa tende a aquecer o planeta, os aerossóis têm efeito de esfriamento.

Os dados dos cenários futuros foram obtidos a partir de simulações do modelo HadCM3, para o ponto de grade mais próximo da cidade de Taubaté. Essas simulações foram realizadas para dois cenários, a saber: Cenário A2 – cenário que descreve um mundo futuro muito heterogêneo no qual a regionalização é dominante, com alto índice de crescimento populacional, e menos preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido, nesse mundo existirá um fortalecimento de identidades culturais regionais, com ênfase em valores da família e tradições locais; Cenário B2 – cenário que descreve um mundo futuro no qual a mudança tecnológica é mais diversa. A ênfase está em soluções locais, sustentabilidade econômica, social e ambiental, e nas iniciativas comunitárias e inovação social em lugar de soluções globais. Esses cenários são os utilizados pelos relatórios de Impacto Climático do

Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC).

Ainda de acordo com Marengo (2006), existem fontes de incertezas na modelagem de clima para se fazer projeções de clima futuro em nível global ou regional na atual geração de modelos usados pelo IPCC, que devem ser considerados, a saber:

- Incerteza nas emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis e das atividades vulcânicas e solares que afetam o forçamento radiativo do sistema climático;
- Incerteza na inclusão de efeitos diretos do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas plantas e do efeito do comportamento das plantas no clima futuro;
- Incertezas na sensibilidade do clima global e nos padrões regionais das projeções do clima futuro simulado pelos modelos, devido às diferentes formas em que cada modelo de circulação geral da atmosfera representa os processos físicos e os mecanismos do sistema climático.

Rossato et al. (2004) transformaram os resultados de armazenamento médio mensal de água no solo, obtidos durante o período de 1971-1990, em percentual de água no solo, pela função da capacidade de água disponível (CAD). Ainda segundo Rossato et al. (2004), o Vale do Paraíba apresenta percentual do armazenamento de água no solo de 90-100% de janeiro a abril (período chuvoso) e de 70-90% para os meses de estiagem. De acordo com Pereira et al. (2002), pode-se adotar CAD entre 75 e 100 mm para culturas anuais e entre 100 a 125 mm para culturas perenes. O valor de CAD igual a 100 mm praticamente satisfaz a todos esses resultados e foi assumido na elaboração do BH.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A precipitação é uma variável que apresenta uma grande variabilidade temporal, principalmente na escala de tempo interanual. Embora a série temporal de dados do posto E2-022 do DAEE seja longa (de 1964 a 2005), essa série possuía vários meses sem registro, provavelmente devido à pane no equipamento ou férias do observador meteorológico. Para completar essa série, utilizou-se o método da ponderação regional (Tucci et al., 2000), usando os dados disponíveis de três postos das redondezas. Esses postos vizinhos devem estar na mesma região climatológica e após o preenchimento da série de dados, é importante analisar a consistência dos dados. Um método muito utilizado para essa consistência é o método de Dupla Massa (Tucci et al., 2000).

A série de dados do posto E2-022 (representando Taubaté) foi preenchida com dados dos postos vizinhos E2-023 (Bacia do Rio Piracanguá, em Taubaté), E2-048 (Bacia de Caçapava Velha, em Caçapava) e E2-095 (Bacia do Rio Una, em Taubaté). Todos esses postos estão em uma distância inferior a 30 km de distância. A quantidade de dados mensais preenchidos no posto de E2-022 foi inferior a 6%. Os dados preenchidos e consistidos foram comparados com os dados do posto meteorológico da UNITAU, que é uma série de dados mais curta, porém sem falhas. A Figura 1 mostra a consistência dos dados.

Com a série histórica de precipitação do posto E2-022 para o município de Taubaté, para o período de 1964 a 2005 completa e consistida, foi realizada uma análise sobre a variabilidade interanual da chuva e que está apresentada na Figura 2. A inserção de uma linha de tendência para os dados de totais anuais de chuva não mostra uma dependência temporal, apresentando uma precipitação total anual média de 1345,6 mm. Folhes e Fisch (2006) realizaram uma análise estatística detalhada da série de precipitação de Taubaté e comprovaram que não existe tendência anual da chuva na região.

Figura 1. Relação entre os dados de precipitação acumulada do posto da UNITAU e o posto E2-22 do DAEE evidenciando a consistência espacial.

Figura 2. Precipitação total anual (mm) para o município de Taubaté, período 1964-2005.

Figura 3. Série temporal (1992 a 2005) da Deficiência (A) e Excesso (B) de água para o Balanço Hídrico – I (Atual), em mm.

Na Figura 3, percebe-se uma tendência de aumento na quantidade de água no solo durante o período de estiagem, enquanto a linha de tendência do excedente hídrico parece estar estável. Entretanto, ressalta-se a alta variabilidade temporal, inerente dos dados de precipitação.

Segundo a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), a evapotranspiração é calculada em função da temperatura do ar. Como as previsões do modelo HadCM3 são em

um ponto de grade que representa uma área grande (250 X 250 km² aproximadamente) e a região de Taubaté possui um desnível topográfico acentuado (Serras do Mar e da Mantiqueira), optou-se por comparar e corrigir os dados de temperatura e precipitação do modelo HadCM3 em função dos dados observacionais do posto meteorológico da UNITAU, no período de 1992 a 2005. A comparação foi feita para o período de 1982-2005 para a precipitação e de 1992-2005 para a temperatura do ar. Os resultados da comparação do cenário B2 estão apresentados na Figura 4, sendo que os resultados para o cenário A2 são muito similares.

Figura 4. Relação entre os dados observacionais do posto da UNITAU e as simulações do HadCM3 para o elemento climático precipitação (A) e temperatura do ar (B).

Após essa análise observacional dos dados de precipitação e temperatura, realizou-se o Balanço Hídrico, para o período de 1992-2005 (considerado como sendo o atual regime

hidrológico) e outros três períodos futuros: 2010-2029, 2040-2069 e 2070-2099. Todos esses três novos períodos tiveram uma média climatológica de trinta anos de dados, para observar as recomendações da Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Esses cálculos estão apresentados nas Tabelas 1 (cenário atual), Tabelas 2, 4 e 6 para o cenário A2 e Tabelas 3, 5 e 7 para o cenário B2. Os valores de ETP calculados no BH-I (cenário atual) foram comparados com estimativas de evapotranspiração usando informações oriundas de tanque classe A (assumindo um coeficiente de tanque de 0,77), com um ótimo ajuste (coeficiente de correlação de 0,87). Isso garante a confiabilidade das estimativas.

Tabela 1. Balanço Hídrico – I: município de Taubaté (1992-2005).

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO - MUNICÍPIO DE TAUBATÉ (1992-2005)											
MÊS	T	ETp mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
JAN	25,0	116,75	1,15	134	236	102	100	0	134	0	102
FEV	25,1	117,92	1,00	118	187	69	100	0	118	0	69
MAR	24,2	107,67	1,05	113	172	59	100	0	113	0	59
ABR	22,5	89,80	0,97	87	59	-28	76	-24	83	4	0
MAI	19,4	62,08	0,95	59	60	1	77	1	59	0	0
JUN	18,0	51,52	0,89	46	24	-22	61	-15	39	7	0
JUL	17,8	50,10	0,94	47	31	-16	52	-9	40	7	0
AGO	18,9	58,17	0,98	57	27	-30	39	-14	41	16	0
SET	20,6	72,09	1,00	72	83	11	50	11	72	0	0
OUT	22,7	91,81	1,09	100	125	25	75	25	100	0	0
NOV	23,5	100,08	1,10	110	164	54	100	25	110	0	29
DEZ	24,5	111,02	1,17	130	168	38	100	0	130	0	38
ANO	21,9	–	–	1073	1336	263	–	0	1039	34	297

Tabela 2. Balanço Hídrico – II: Município de Taubaté (2010-2039) para o cenário A2.

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO - MUNICÍPIO DE TAUBATÉ (2010-2039)											
MÊS	T (°C)	ETp mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
JAN	25,1	117,36	1,15	135	178	43	100	0	135	0	43
FEV	24,9	114,95	1,00	115	138	23	100	0	115	0	23
MAR	24,1	105,60	1,05	111	111	0	100	0	111	0	0
ABR	22,4	87,33	0,97	85	70	-15	86	-14	84	1	0
MAI	19,5	60,91	0,95	58	49	-9	79	-7	56	2	0
JUN	17,6	46,67	0,89	42	46	4	83	4	42	0	0
JUL	18,2	50,92	0,94	48	46	-2	81	-2	48	0	0
AGO	20,6	70,25	0,98	69	62	-7	76	-5	67	2	0
SET	23,0	93,53	1,00	94	129	35	100	24	94	0	11
OUT	24,1	105,60	1,09	115	192	77	100	0	115	0	77
NOV	24,3	107,89	1,10	119	206	87	100	0	119	0	87
DEZ	24,6	111,39	1,17	130	194	64	100	0	130	0	64
ANO	22,4	–	–	1121	1421	300	–	0	1116	5	305

Tabela 3. Balanço Hídrico – III: Município de Taubaté (2010-2039) para o cenário B2.

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO - MUNICÍPIO DE TAUBATÉ (2010-2039)											
MÊS	T (°C)	ETp mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
JAN	24,8	113,32	1,15	130	178	48	100	0	130	0	48
FEV	24,8	113,32	1,00	113	148	35	100	0	113	0	35
MAR	24,2	106,16	1,05	112	93	-19	83	-17	110	2	0
ABR	22,5	87,44	0,97	85	59	-26	64	-19	78	7	0
MAI	20,4	67,35	0,95	64	46	-18	53	-11	57	7	0
JUN	18,8	54,18	0,89	48	38	-10	48	-5	43	5	0
JUL	18,9	54,95	0,94	52	40	-12	43	-5	45	7	0
AGO	21,5	77,47	0,98	76	48	-28	32	-10	58	18	0
SET	23,3	95,97	1,00	96	106	10	42	10	96	0	0
OUT	24,0	103,84	1,09	113	171	58	100	58	113	0	0
NOV	24,3	107,33	1,10	118	180	62	100	0	118	0	62
DEZ	24,8	113,32	1,17	133	198	65	100	0	133	0	65
ANO	22,7	-	-	1140	1305	165	-	0	1095	45	210

Tabela 4. Balanço Hídrico – IV: Município de Taubaté (2040-2069) para o cenário A2.

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO - MUNICÍPIO DE TAUBATÉ (2040-2069)											
MÊS	T (°C)	ETp mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
JAN	26,1	129,33	1,15	149	180	31	100	0	149	0	31
FEV	26,1	129,33	1,00	129	146	17	100	0	129	0	17
MAR	25,3	117,98	1,05	124	111	-13	88	-12	123	1	0
ABR	23,8	98,50	0,97	96	67	-29	66	-22	89	7	0
MAI	21,4	71,97	0,95	68	49	-19	54	-11	60	8	0
JUN	19,7	56,37	0,89	50	47	-3	53	-2	49	1	0
JUL	19,9	58,08	0,94	55	46	-9	48	-5	51	4	0
AGO	22,6	84,55	0,98	83	62	-21	39	-9	71	12	0
SET	25,0	113,89	1,00	114	102	-12	35	-4	106	8	0
OUT	25,6	122,15	1,09	133	191	58	93	58	133	0	0
NOV	25,5	120,75	1,10	133	210	77	100	7	133	0	70
DEZ	25,7	123,57	1,17	145	201	56	100	0	145	0	56
ANO	23,9	-	-	1279	1412	133	-	0	1238	41	174

Tabela 5. Balanço Hídrico – V: Município de Taubaté (2040-2069) para o cenário B2.

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO - MUNICÍPIO DE TAUBATÉ (2040-2069)											
MÊS	T (°C)	ETp mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
JAN	25,5	121,19	1,15	139	146	7	100	0	139	0	7
FEV	25,5	121,19	1,00	121	133	12	100	0	121	0	12
MAR	24,8	111,91	1,05	118	118	0	100	0	118	0	0
ABR	23,4	94,76	0,97	92	58	-34	71	-29	87	5	0
MAI	21,1	70,47	0,95	67	46	-21	58	-13	59	8	0
JUN	19,5	56,23	0,89	50	37	-13	51	-7	44	6	0
JUL	19,8	58,74	0,94	55	38	-17	43	-8	46	9	0
AGO	22,5	84,70	0,98	83	49	-34	30	-12	61	22	0
SET	25,1	115,83	1,00	116	93	-23	24	-6	99	17	0
OUT	25,2	117,16	1,09	128	173	45	69	45	128	0	0
NOV	24,8	111,91	1,10	123	228	105	100	31	123	0	74
DEZ	25,3	118,49	1,17	139	195	56	100	0	139	0	56
ANO	23,5	-	-	1231	1314	83	-	0	1165	66	149

Tabela 6. Balanço Hídrico – VI: Município de Taubaté (2070-2099) para o cenário A2.

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO - MUNICÍPIO DE TAUBATÉ (2070-2099)											
MÊS	T (°C)	ETp mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
JAN	27,4	144,70	1,15	166	191	25	100	0	166	0	25
FEV	27,4	144,70	1,00	145	168	23	100	0	145	0	23
MAR	26,6	137,48	1,05	144	120	-24	79	-21	141	3	0
ABR	25,1	111,38	0,97	108	79	-29	59	-20	99	9	0
MAI	23,1	83,74	0,95	80	53	-27	45	-14	67	13	0
JUN	21,9	69,72	0,89	62	44	-18	38	-7	51	11	0
JUL	22,2	73,06	0,94	69	51	-18	31	-6	57	12	0
AGO	24,9	108,36	0,98	106	56	-50	19	-12	68	38	0
SET	26,9	140,25	1,00	140	109	-31	14	-5	114	26	0
OUT	27,3	143,83	1,09	157	180	23	37	23	157	0	0
NOV	27,3	143,83	1,10	158	208	50	87	50	158	0	0
DEZ	27,2	142,95	1,17	167	227	60	100	13	167	0	47
ANO	25,6	-	-	1502	1486	-16	-	0	1391	111	95

Analisando-se o Balanço Hídrico atual (1992-2005), observa-se que há um total anual de precipitação de 1336 mm, associado a uma evapotranspiração anual de 1073 mm, com um superávit de água de 263 mm. Esse Balanço Hídrico apresenta quatro meses de deficiência de água (total anual de 34 mm) e cinco meses de excedente de água (totalizando 297 mm). O

armazenamento mínimo de água no solo foi de 39 mm. Resumindo, não ocorre falta de água, o aporte de água é superior a demanda evapotranspirativa.

A Tabela 8 apresenta um resumo das variações dos componentes do BH para os diferentes cenários, em relação aos elementos climáticos do Balanço Hídrico I, que representa as condições atuais.

Tabela 7. Balanço Hídrico – VII: Município de Taubaté (2070-2099) para o cenário B2.

BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO - MUNICÍPIO DE TAUBATÉ (2070-2099)											
MÊS	T (°C)	ETp mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
JAN	26,0	127,50	1,15	147	191	44	100	0	147	0	44
FEV	26,1	129,00	1,00	129	162	33	100	0	129	0	33
MAR	25,5	120,13	1,05	126	100	-26	77	-23	123	3	0
ABR	24,2	102,32	0,97	99	64	-35	54	-23	87	12	0
MAI	22,1	77,47	0,95	74	48	-26	42	-12	60	14	0
JUN	20,9	65,28	0,89	58	42	-16	36	-6	48	10	0
JUL	21,1	67,22	0,94	63	40	-23	28	-7	47	16	0
AGO	23,3	91,10	0,98	89	51	-38	19	-9	60	29	0
SET	25,1	114,44	1,00	114	108	-6	18	-1	109	5	0
OUT	25,8	124,51	1,09	136	184	48	66	48	136	0	0
NOV	26,1	129,00	1,10	142	226	84	100	34	142	0	50
DEZ	25,9	126,00	1,17	147	208	61	100	0	147	0	61
ANO	24,3	-	-	1324	1424	100	-	0	1236	88	188

Considerando-se o cenário A2 e os Balanços Hídricos para os períodos de 2010-2039 (BH-II), 2040-2069 (BH-IV) e 2070-2099 (BH-VI), observa-se que a precipitação aumenta durante esse período, bem como a evapotranspiração, uma vez que este último é função da temperatura do ar (que aumenta também), conforme é mostrado na Tabela 8. A diferença de água (precipitação – evapotranspiração) diminui abruptamente, principalmente para os últimos trinta anos, quando a evapotranspiração será superior a precipitação em 16 mm. A deficiência de água chega a ser de até sete meses (para os casos de 2040-2069 e 2070-2099), com déficit integrados de 41 mm e 111 mm, respectivamente. Associado a esse comportamento, o excedente diminui continuamente até atingir o valor de 95 mm no período de 2069-2070. Esse fato representa que a deficiência de água chega a atingir um valor de 77 mm a mais do que seu valor no BH-I (atual), associado a uma redução do excedente de 202 mm (Tabela 8).

Os números para o caso B2 também são similares, porém um pouco inferiores ao caso A2. Para o último período (2070-2099), a precipitação ainda é superior (100 mm) a evapotranspiração, o que provoca déficits de água menores e excedentes de água levemente superiores ao do cenário A2. Mas o comportamento geral é o mesmo.

Tabela 8. Resumo das variações temporais dos componentes do Balanço Hídrico para os diferentes cenários A2 e B2, relativos ao Balanço Hídrico – I.

Componentes do Balanço Hídrico	A2			B2		
	BH-II	BH-IV	BH-VI	BH-III	BH-V	BH-VII
Temperatura (°C)	+ 0,5	+2,0	+3,7	+0,8	+1,6	+2,4
Precipitação (mm)	+85	+76	+150	-31	-22	+88
Precipitação - Evapotranspiração (mm)	+300	+133	-16	+165	+83	+100
Deficiência (mm)	-29	+7	+77	+11	+32	+54
Excedente (mm)	+8	-123	-202	-87	-148	-209

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De uma forma geral, os cenários climáticos futuros apontam um aumento na temperatura do ar, variando entre + 0,5°C a + 2,7°C para o cenário A2 e entre + 0,8°C e + 2,4°C para o cenário B2, aumento na precipitação (entre 85 e 150 mm para o cenário A2 e entre -31 e 88 mm para o cenário B2). Esses resultados provocarão um aumento do déficit de água (de até 77 mm para o período de 2070-2099 no cenário A2 e um pouco menor (54 mm) para o cenário B2), associado a uma diminuição do excedente hídrico (ao redor de 200 mm para ambos cenários). Em resumo, o clima estará mais quente, sendo que a estiagem será mais longa (de um a dois meses mais). O total anual da precipitação será um pouco mais elevado, com uma diminuição durante o verão e um leve aumento na época do inverno. Esse aumento de precipitação não será suficiente para manter os níveis de evapotranspiração, que será muito maior, em função do aumento da temperatura do ar. Esses resultados estão coerentes com as estimativas globais realizadas pelo Relatório Stern (Stern, 2006) e pelo IPCC (2007).

Recentemente, o CEIVAP (2006) publicou um relatório sobre o Plano de Recursos Hídricos na região do Rio Paraíba do Sul e apontou que, considerando o ano de 2005, não existe falta de água na Bacia para as atividades atuais. Esse fato também foi obtido pela análise do Balanço Hídrico – I e por Fisch (1995). Um ponto a ser considerado é que os estudos do CEIVAP (2006) somente levaram em conta as características hidroclimatológicas atuais (série temporal das vazões e precipitações), associadas a um crescimento urbano e demanda de água nas mesmas proporções. O ponto falho é não considerar os cenários climáticos futuros (como, por exemplo, nestas simulações do Hadley Center/CPTEC-INPE), pois a atmosfera tem um papel fundamental no ciclo hidrológico, por meio da ação do homem na liberação de gases do efeito estufa, balanço de radiação da atmosfera e também na formação de nuvens e chuvas correspondentes.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Dr. José Antonio Marengo Orsini (CPTEC/INPE) pela cessão dos dados de simulação climática gerados pelo modelo HadCM3 e ao Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, na pessoa da Engenheira Marli Aparecida Maciel Leite.

6. REFERÊNCIAS

- CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1971. (Boletim Técnico, 116)
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COMITÊ DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **Plano de recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul**: resumo: diagnóstico dos recursos hídricos: relatório final. Resende: AGEVAP, 2006. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br>>. Acesso em: 21 fev. 2007.
- FISCH, G. Caracterização climática e balanço hídrico de Taubaté (SP). **Revista Biociências**, Taubaté, v. 1, n. 1, p. 81-90, 1995.
- FOLHES, M. T.; FISCH, G. Caracterização climática e estudo das tendências nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). **Ambiente e Água**, Taubaté, v. 1, n. 1, p. 61-71, 2006.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Crops and Drops**. Roma: FAO, 2002. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep>>. Acesso em: 23 nov. 2005.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: the physical science basis**. Summary for policymakers. IPCC: Genebra, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 02 fev. 2007.
- JOHNS, T. C. et al. The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 16, p. 103-134, 1997.
- LEITE, M. A. R. M. **Disponibilidade hídrica das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Una**. 2004. 65f. Monografia (Especialização em Gestão de Recursos Hídricos e Manejo de Bacias Hidrográficas) - Departamento de Ciências Agrárias, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2004.
- MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA: 2006.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.
- NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D. O aquecimento global e o impacto na Amazônia e na agricultura brasileira. **INPE ePrint**, São José dos Campos, v. 1, 2005. Disponível em: <<http://eprint.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/ePrint@80/2005/09.12.12.51/doc/v1.pdf>>. Acesso em: 23 março 2007.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- ROMERA E SILVA, P. A. (org). **Água**: quem vive sem? 2. ed. São Paulo: FCTH / CT-Hidro, 2003.

ROSSATO, L.; ALVALÁ R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.19, n. 2, p. 113-122, 2004.

STERN, N. **Stern review on the economics of climate change**. 2006. Disponível em: <<http://www.hm-treasury.gov.uk>>. Acesso em: 8 dez. 2006.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, R. J. **The water balance**. New Jersey: Laboratory of climatology, 1955. 104 p. (Publication in Climatology, 8).

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS, 2000. 943p.

Metodologia para elaboração de mapas hidrogeológicos: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio da Palma, DF, Brasil (doi:10.4136/ambi-agua.26)

Tatiana Diniz Gonçalves¹ ; José Eloi Guimarães Campos¹ ; Getulio Teixeira Batista² ; Hélio Nóbile Diniz² ; Marcelo dos Santos Targa²

¹Universidade de Brasília. Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte
E-mail: tatidg@terra.com.br; eloi@unb.br

²Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Taubaté
E-mail: {getulio;mtarga}@agro.unitau.br; heliodiniz1@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo apresentar uma metodologia para subsidiar a gestão de recursos hídricos por meio da cartografia hidrogeológica, testada para a situação hidrogeológica da bacia do rio da Palma, localizada na região Central do Brasil. Como resultado, obtiveram-se dois produtos: o mapa hidrogeológico e o mapa de potencial de infiltração e recarga do alto curso da bacia do rio da Palma. Este trabalho está dividido em seis partes. A primeira corresponde à discussão sobre os elementos do mapa, os mapas temáticos essenciais e as escalas apropriadas. Na segunda, é apresentada uma proposta de critérios gráficos para representação integrada dos principais parâmetros de aquíferos sobrepostos. Na terceira parte, é mostrada a importância da base de dados para a cartografia hidrogeológica, isto é, a contribuição de cada tema, com destaque para solo, geologia, declividade, clima e uso e cobertura vegetal, quando adequadamente integrados. A quarta parte aborda a escolha e a integração dos principais planos de informação da bacia do rio da Palma em um SIG (Sistema de Informação Geográfica). Na quinta parte, é mostrado o resultado da integração dos sistemas aquíferos do domínio poroso com os do domínio fraturado e, finalmente, é apresentado o mapa de potencial de infiltração e recarga da área estudada, elaborado a partir da integração dos planos de informação da base de dados. De forma geral, na área estudada, predominaram as regiões com potencial de infiltração alto e moderado, em que a interferência humana ainda é incipiente. Grande parte das regiões de potencial baixo está relacionada às altas declividades, onde prevalecem os cambissolos ou à presença de edificações urbanas.

Palavras-chave: Hidrogeologia; SIG; recarga de aquíferos.

Methodology for generation of hydrogeologic maps: rio da Palma watershed case study, DF, Brazil

ABSTRACT

This paper had the objective of developing a methodology to support the management of water resources based on hydro geological cartography, validated for the hydro geologic conditions of a watershed located at Central Brazil. Results show two major products: a hydro geologic, and a potential infiltration and recharge maps of the high course of the Rio da Palma watershed. This paper is presented in six parts. The first one discusses the map's elements, essential thematic maps and appropriate scales. The second part proposes the graphic criteria

for the integrated representation of the major parameters of overlaying aquifers. The third part demonstrates the importance of the data basis for the hydro geologic cartography, i.e., the contribution of each theme such as soil, geology, slope, climate and land use, when appropriately integrated. The fourth part discusses the selection and the integration of the main information layers for the Rio da Palma watershed using a Geographic Information System (GIS). On the fifth part, the result of the integration of the porous domain with the fractured domain aquifer information layers is shown and, finally, the potential infiltration and recharge map of the studied area, elaborated from the integration of overlapping of the data basis information layers is presented and discussed. In general, in the studied area, regions with high infiltration potential prevail where human interference is still moderate. Large portions of low infiltration potential are either associated with high slopes, with shallow soils (Cambissolos) or else with urban constructions.

Keywords: Hydrogeology; GIS; aquifer recharge.

1. INTRODUÇÃO

A água subterrânea é uma importante alternativa de abastecimento. A implementação de Planos Estaduais de Recursos Hídricos impulsionou novos progressos na área da hidrogeologia, tanto em termos de métodos exploratórios como de gerenciamento das águas subterrâneas.

A representação gráfica da informação hidrogeológica vem sendo utilizada, cada vez mais freqüentemente, como ferramenta indispensável para o planejamento do uso das águas subterrâneas. Essa representação deve refletir a situação atual do conhecimento hidrogeológico e atender às necessidades específicas dos gestores desses recursos. Estudos hidrogeológicos básicos e observações em campo, principalmente quando da perfuração de poços tubulares profundos nos diversos ambientes discriminados na região, fornecem informações sobre os tipos pedológicos, geologia, níveis freáticos, direções de fluxo, comportamento de zonas saturadas e não saturadas, vocação hidrogeológica das rochas, os quais, reunidos, subsidiaram a elaboração dos modelos (Lousada; Campos, 2005) e mapas.

Os mapas hidrogeológicos são considerados, segundo Mente (2000), produtos gráficos resultantes do conhecimento no domínio das ciências da água, e, são elaborados, principalmente, para sintetizar as informações disponíveis sobre as condições hidrogeológicas e as águas subterrâneas, com a finalidade de fornecer uma visão do arcabouço hidrogeológico regional de determinada região. Apesar do amplo conhecimento local, a confecção do mapa hidrogeológico da porção distrital do rio da Palma, em escala detalhada, ainda não havia sido realizada. Desse modo, neste trabalho, a metodologia cartográfica é empregada numa área específica no Distrito Federal, o alto curso da bacia do rio da Palma, de forma a subsidiar o conhecimento das condições de infiltração e recarga dos aquíferos da região.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolver este trabalho foram aplicados, basicamente, dois métodos:

O primeiro diz respeito à proposição de uma metodologia para a cartografia hidrogeológica, principalmente para casos em que ocorram aquíferos superpostos. Esse procedimento deve ser baseado em mapas e elementos cartográficos existentes, além da geração de novas informações;

O segundo foi a aplicação desta proposta em uma bacia específica situada no Distrito Federal, de forma a se determinar a efetividade do procedimento proposto.

A integração da base de dados utilizada para a geração do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e desenvolvimento do trabalho foi realizada com auxílio do aplicativo ArcView, e a análise e classificação das imagens foi realizada por meio do aplicativo Envi.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Mapas Temáticos

Na cartografia temática não se podem expressar todos os fenômenos em um mesmo mapa e a solução é, portanto, diversificá-los. Assim, os mapas temáticos devem fornecer com o auxílio de símbolos qualitativos e/ou quantitativos dispostos sobre uma base de dados, geralmente extraída dos mapas e cartas topográficas, informações referentes a determinado tema ou fenômeno presente no território mapeado (IBGE, 2005).

Sob a visão conceitual do cartógrafo Barbosa (1977), os mapas temáticos são classificados em três tipos: mapas de notação, estatísticos ou de síntese. Os mapas de notação registram os fenômenos na sua distribuição espacial, sob a forma de cores ou de tonalidades muito variadas, complementadas muitas vezes por sinais gráficos característicos. A ênfase da variação aparece no destaque das diferenças qualitativas do fenômeno ocorrido na área para o fenômeno variante que se observa em outra área, e assim por diante. Como exemplo, pode-se citar: o mapa geológico, o pedológico, o de uso da terra, etc.

Os mapas estatísticos são os que contêm os elementos primários do tema, elaborados cartograficamente, e são originários de técnicas estatísticas, tanto no que se refere aos elementos físicos, quanto aos elementos humanos. Assim, caracterizam-se os mapas de densidade, os de distribuição de pontos, os de fluxo, os pluviométricos e os mapas de isolinhas.

Os mapas de síntese têm finalidade explicativa, em que a representação de um fenômeno, em conjunto, é realizada mediante as suas relações externas. Os mapas de síntese expressam o conjunto dos elementos de diferentes fatos ou fenômenos, formam uma abstração intelectual, apresentando-se de forma global. Podem ser considerados de síntese os mapas hidrogeológicos, os morfoestruturais, os geomorfológicos, os históricos, etc.

3.2. Cartografia Hidrogeológica

O mapa hidrogeológico busca representar a potencialidade ou produtividade dos aquíferos, a importância hidrogeológica relativa local e as características gerais dos sistemas aquíferos. Fornece, também, a partir de uma base geológica simplificada, as características litológicas gerais de cada unidade, o que, em linhas gerais, acaba por determinar a vocação hidrogeológica dos aquíferos delimitados (Mente, 2000).

Os critérios utilizados para classificar diversos gêneros de mapas hidrogeológicos variam de acordo com o tema, conteúdo, apresentação, escala, método de produção, etc. Desses critérios, aqueles tomados como os mais decisivos são: o propósito do mapa, seu possível uso, o estado dos dados disponíveis ou o nível de informação.

Basicamente, distinguem-se dois tipos de mapas hidrogeológicos: os sistemáticos / generalizados, que são representações gráficas de um inventário sistemático e centralizado de dados geológicos e hidrogeológicos e, os mapas derivados, que se destinam a servir a projetos específicos e a demandas especiais.

A visão sistemática e homogênea das condições hidrogeológicas assume grande valor à medida que permite identificar estruturas hidrogeológicas coerentes com os sistemas de

fluxos subterrâneos, propicia o conhecimento das relações hidrogeológicas com suas áreas limites, revela lacunas nas informações hidrogeológicas, amplia o escopo e estabelece a base de futuras informações sistemáticas para complementar inventários. Já os mapas hidrogeológicos derivados são orientados, normalmente, para solucionar problemas e servir a usuários bem específicos, o que os difere daqueles por sua contribuição substancial não só ao entendimento do mapa em si, mas também, ao conhecimento específico para o planejamento, o desenvolvimento e a proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

3.3. Escala

A escala representa a razão entre o comprimento em mapa e o verdadeiro comprimento existente na superfície da terra. A escala pode variar em função dos parâmetros a serem analisados e do nível de detalhamento que se pretende dos mapas hidrogeológicos e, é função direta das informações disponíveis da área de pesquisa e dos conhecimentos regionais sobre a geologia, os solos, a topografia e sobre as águas subterrâneas. Para exemplificar, a Tabela 1 apresenta as características dos mapas de solos.

Tabela 1. Características dos mapas de solos em função da finalidade dos levantamentos.

Tipo de Levantamento	Escala de Publicação	Área mínima mapeável	Finalidade
Ultradetalhado	> 1: 10.000	< 0,4 ha	Planejamento e exploração de áreas muito pequenas
Detalhado	1:10.000 a 1:25.000	0,4 a 2,5 ha	Projetos conservacionistas
Semidetalhado	1:25.000 a 1:100.000	2,5 a 40 ha	Planejamentos de uso e conservação dos solos
Reconhecimento	1:100.000 a 1:750.000	0,4 a 22,5 km ²	Mapa básico – visa ao planejamento de novas áreas
Exploratório	1:750.000 a 1:2.500.000	22,5 a 250 km ²	Conhecimento de grandes áreas não desbravadas

A escala dos mapas geológicos segue, basicamente, os mesmos critérios dos mapas de solo, entretanto, deve-se atentar ao fato de que, em escalas maiores, os mapas geológicos, em muitas situações, não permitirão discriminar mais que uma ou duas unidades. Por outro lado, parâmetros como, densidade de fraturas, que são ignorados em escalas menores, devem ser levados em consideração em escalas maiores, superiores a 1:25.000, por exemplo.

De acordo com o IBGE (2005), para que se tenha boa representação em mapas, a extensão dos acidentes topográficos da região em estudo deve ser considerada. Assim, a menor escala para mapear certa região da superfície terrestre que tenha acidentes em torno de 10 m de extensão será: $M = 10 \text{ m} / 0,0002 \text{ m} = 100.000 / 2 = 50.000$. Nesse caso, a escala adotada deverá ser igual ou maior que 1:50.000. Nessa escala, o erro prático (0,2 mm) corresponde a 10m no terreno.

Contudo, não é comum trabalhos com mapas hidrogeológicos em escalas maiores que 1:50.000. Nessa escala, os mapeamentos são considerados semidetalhados e a intensidade de observações poderá variar segundo o método utilizado.

De acordo com Vink (apud Vieira, 1988), a fotointerpretação é um método que utiliza prévia interpretação de imagens de satélite e/ou fotografias aéreas para identificar e discriminar feições de interesse para posterior verificação no campo. A experiência tem demonstrado que os mapas resultantes são bastante precisos e revelam claramente a relação geográfica entre as feições e as condições que eles apresentam.

3.4. Cartografia de Aquíferos Superpostos

No Brasil, vários estudos de cunho hidrogeológico foram desenvolvidos visando melhorar a representação das informações hidrogeológicas em mapas e segundo Campos (2004) as principais informações sobre a hidrogeologia do Distrito Federal estão disponíveis nos trabalhos de Romano e Rosas (1970), Barros (1987, 1994), Amore (1994), Mendonça (1993), Campos e Silva (1998), Zoby (1999), Souza (2001), Joko (2002), Cadamuro (2002). Entretanto, apenas Campos e Silva (1998) propõem, para o Distrito Federal, a cartografia para aquíferos superpostos. Esta cartografia visa representar os principais parâmetros tanto dos aquíferos fraturados quanto dos aquíferos do domínio poroso que os recobrem.

Os parâmetros essenciais e suas representações gráficas para a cartografia de aquíferos sobrepostos podem ser abordados da seguinte maneira:

- Base Hidrográfica: - curso d'água perene (linha azul contínua), curso d'água intermitente (linha azul tracejada), lagoa permanente (contorno cheio azul liso), lagoa intermitente (contorno cheio azul tracejado), barragens (contorno cortado cheio azul liso), áreas sujeitas à inundação (tracejado grosso azul sem contorno), fontes (ponto azul), reservatórios (ponto preto).
- Geologia: - Unidades Geológicas – letras e números, exemplos: **PPC** – Unidade Psamo Pelito Carbonatada, **R₄** – Unidade Metarritmito Argiloso.
- Estrutural – simbologia de linhas e setas variadas conforme Figura 1.

Figura 1. Simbologia para definir estruturas geológicas.

- Área de exposição dos aquíferos: Intergranulares – hachuras, Fraturados – cores; principais áreas de recarga – pontilhado grosso;
- Uso da água – letra maiúscula como segue: Consumo humano – **H**, Consumo animal – **G**, Irrigação – **I**, Abastecimento industrial – **F**.

Os parâmetros acessórios podem ser abordados da seguinte maneira:

- Condições das áreas de exposição dos aquíferos diferenciadas por cores, exemplos: - Área de recarga com alta condutividade hidráulica, Área de descarga do aquífero livre, Área sobreplotada, Área de descarga de aquíferos cársticos, etc.
- Produtividades dos aquíferos: - devem ser indicadas por valores médios da capacidade específica para cada unidade hidroestratigráfica, por exemplo: - Muito alta (maior que 1,11 l/s/m), Alta (entre 0,44 - 1,11 l/s/m), Média (entre 0,11 - 0,44 l/s/m), Baixa (entre 0,033 - 0,11 l/s/m), Muito baixa (menor que 0,033 l/s/m).

Outros mapas que devem ser considerados são: Mapa das Unidades Geomorfológicas, Mapa de Declividade, Mapa de Densidade de Drenagem, Seção Geológica Esquemática e Diagrama de Pluviometria.

3.5. Os Tipos de Mapas

Os mapas topográficos são considerados básicos, tendo em vista que vários outros mapas são derivados deles. Um dos seus subprodutos muito utilizado nos estudos hidrogeológicos é o mapa de declividade.

Atualmente, a utilização de *softwares* como o *ArcView*, *SPRING*, *IDRISI* e outros, tem proporcionado a confecção de mapas de declividade muito sofisticados. Em um ambiente computacional, as curvas de nível, os pontos cotados e a hidrografia constituem planos de informação que, integrados num dos *softwares* mencionados, são processados, resultando num Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x,y), em um referencial qualquer, com atributos denotados de z, que descrevem a variação contínua da superfície (Burrough, 1986). O MDE é comumente utilizado para denotar a representação quantitativa de determinada grandeza que varia continuamente no espaço.

O mapa de declividade derivado do MDE é indispensável para estudos hidrogeológicos, uma vez que a inclinação do terreno é determinante da sua taxa de infiltração. Quanto maior a declividade, menor a infiltração de água e vice-versa.

Outro subproduto do mapa topográfico é a hidrografia, que pode ser representada de acordo com o tipo de drenagem. Normalmente na cor azul, as linhas de drenagem descrevem os cursos d'água intermitentes (tracejado) e perenes (liso).

O conhecimento da geologia de uma região é o ponto de partida para a compreensão da distribuição espacial dos aquíferos, entendidos aqui como formações geológicas capazes de armazenar e transmitir água. Os mapas geológicos, além de identificarem a litoestratigrafia e estruturas geológicas de determinada área, fornecem informações sobre as características dos aquíferos, sua distribuição, extensão lateral, áreas de recarga e exutório, camadas confinantes e bases impermeáveis.

As unidades geológicas são, geralmente, discriminadas nos mapas por cores, de acordo com a litologia e/ou por letras abreviadas maiúsculas e minúsculas.

Em estudos hidrogeológicos comumente se classificam as unidades geológicas de acordo com a importância das rochas para os aquíferos, em função das suas propriedades intrínsecas (porosidade e permeabilidade), condições de ocorrência (extensão, espessura e estrutura) e explorabilidade (fácil, regular ou difícil).

Os mapas de lineamentos são utilizados para constatação do padrão e da densidade de fraturamentos e falhamentos de determinada região. A contribuição deste estudo é significativa para a hidrogeologia na medida em que a densidade dessas estruturas evidencia as direções preferenciais de fluxo da água subterrânea em aquíferos fraturados.

Esses mapas podem ser confeccionados a partir de fotografias aéreas e/ou imagens de satélite de alta resolução e, ainda, por meio de medidas realizadas em campo com bússola.

A representação em mapas desses elementos estruturais é, geralmente, por meio de traços e setas, diagramas de fraturas e, ainda, de pequenos mapas de densidade de fraturas.

Os mapas hidroquímicos têm por finalidade, em estudos hidrogeológicos, identificar e quantificar as principais propriedades e os constituintes químicos das águas subterrâneas, procurando estabelecer uma relação com o meio físico.

Podem ser representados por mapas de isotores (isolinhas que correspondem a linhas de mesmo teor de determinada substância), por gráficos, símbolos ou figuras que representem a composição química das águas e, ainda, por diagramas, sendo os mais utilizados os de Piper (Bovolato, 2006), Collins Stiff e os circulares (Melo Júnior et al., 2003).

Os mapas de solos disponibilizam a localização das classes de solo em função da escala de mapeamento. Esta informação é relevante nos estudos hidrogeológicos porque, ocasionalmente, os limites entre manchas de solos coincidem com contatos geológicos e cada classe de solo tem uma organização nas direções lateral e vertical, fundamentais à caracterização de aquíferos porosos.

A caracterização de aquíferos do sistema poroso é normalmente determinada de acordo com os valores de condutividade hidráulica e transmissividade. A variação dos valores de condutividade hidráulica e transmissividade é função do tipo de solo e, principalmente, do teor de argila desses solos. Quanto mais argilosos, menores serão os valores esperados. As feições texturais dos solos também apresentam importância específica, visto que solos argilosos ou muito argilosos podem apresentar valores de condutividade hidráulica significativamente maiores no caso de apresentar forte estrutura granular. As classes de solos em mapa são representadas por cores.

Os mapas geomorfológicos representam o padrão de relevo que predomina em cada compartimento morfológico. O conhecimento das formas de relevo é de suma importância para a definição dos tipos de fluxo hidrogeológico das diversas bacias hidrográficas, bem como na definição das principais áreas de recarga. A compartimentação geomorfológica de determinada região é comumente representada em mapas por hachuras de diferentes inclinações.

Os mapas de uso e cobertura vegetal são necessários aos estudos hidrogeológicos para avaliação regional das áreas potenciais de maior ou menor recarga. Dependendo do tipo de uso ou de cobertura da terra, haverá variação na resposta à infiltração de água.

Os mapas de uso e cobertura vegetal podem ser construídos a partir da interpretação de imagens de satélite ou fotografias aéreas. Com o auxílio de *softwares* especializados como o ENVI ou o SPRING, por exemplo, tem-se a opção de classificar o tipo de uso e cobertura nas imagens. Os resultados desses métodos são comprovadamente satisfatórios e o produto final é um mapa digital temático cujas classes representativas de cada feição são discriminadas por cores. Existem estudos que buscam padronizar as cores de cada classe para trabalhos científicos.

Os mapas de isoietas são representados por isolinhas que correspondem a um mesmo valor de altura pluviométrica. Esses mapas são fontes de informações das tendências pluviométricas de determinada região. Esses mapas são utilizados para estimativa da distribuição espacial da altura pluviométrica, visando ao cálculo do balanço hídrico. A representação nos mapas é feita por faixas de cores ou por variações tonais (Carvalho; Assad, 2002).

3.6. Aplicação – Estudo de Caso

3.6.1. A bacia do rio da Palma

O alto curso da bacia do rio da Palma, área escolhida para aplicação e teste da metodologia proposta, pertence à bacia do rio Maranhão, na região noroeste do Distrito Federal (Figura 2) sendo limitada pelas coordenadas UTM 8.282.800 N, 8.272.300 S, 821.000 L e 810.750 W, abrangendo, aproximadamente, uma área de 69,2Km². Os principais

afluentes do rio da Palma são os córregos Roncador e Poço Azul à leste da área e os córregos Monjolinho e Taquari à oeste.

O rio da Palma está localizado a cerca de 80km de Brasília no seu ponto mais distante e a cerca de 50km nos pontos mais próximos da cidade. A principal via de acesso ao local é a rodovia BR 070, em direção a Brazilândia, rumo ao município de Águas Lindas.

Figura 2. Localização da área de estudo (a) no contexto do Distrito Federal; (b) Bacia do Rio da Palma.

3.6.2. Integração

Todos os dados espaciais representados em mapas temáticos gerados ou modificados neste trabalho foram referenciados no sistema de coordenadas UTM e no Datum Planimétrico SAD-69, utilizando o *software* ArcView 9.0. A base de dados utilizada, em formato digital, foi integrada em um SIG para atender às propostas deste trabalho. Inicialmente, para espacializar a ocorrência dos aquíferos da região, os sistemas fraturados e porosos foram sobrepostos de maneira a estabelecer as áreas de cada domínio. Integraram-se a este mapa base, os mapas de declividade e de uso e cobertura vegetal, com o objetivo de estabelecer as condições de infiltração e recarga na bacia estudada.

3.7. Geologia e Solos

O mapa geológico do Distrito Federal, confeccionado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em 1988 e modificado por Campos e Silva (1998), na escala de 1:100.000, foi usado para delimitar os aquíferos do domínio fraturado em função do comportamento hidrodinâmico das unidades geológicas (Figura 3).

Os estudos realizados por Campos e Silva (1998) integraram dados preexistentes e redefiniram os principais domínios aquíferos fraturados do Distrito Federal de acordo com os novos dados geológicos. Fatores como a alta ruptibilidade das rochas, a abertura das fissuras e a interconectividade foram levados em consideração para classificar os aquíferos fraturados com boa potencialidade hídrica, ao passo que, condições de silicificação dos espaços planares e a plasticidade das rochas, com diminuição dos espaços vazios, foram adotadas como critérios de classificação para os aquíferos menos produtivos.

Campos e Silva (1998) classificaram o domínio fraturado nos seguintes sistemas: Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. Na área em estudo, observa-se apenas a ocorrência do

Sistema Aquífero Paranoá, que é subdividido em cinco subsistemas (**S/A**, **A**, **R₃/Q₃**, **R₄** e **PPC**), dos quais três encontram-se na bacia estudada: os subsistemas **R₃/Q₃** (que incluem as unidade **R₃**- Metarritmito Arenoso e **Q₃** Quartzito Médio), **R₄** (Unidade Metarritmito Argiloso) e **PPC** (Unidade Psamo-Pelito-Carbonatada).

O Subsistema **R₃/Q₃** caracteriza-se por aquíferos descontínuos, livres ou confinados, com extensão lateral variável, condutividade hidráulica média de $1,6 \times 10^{-6}$ m/s, e vazões médias de 12.000L/h. Tais aquíferos também são importantes por possuírem água de boa qualidade e por terem capacidade de armazenamento e vazão específica altas.

O Subsistema **R₄** apresenta várias características desfavoráveis sob o ponto de vista hidrogeológico. A média de vazão é moderada, em torno de 6.000L/h. São aquíferos restritos lateralmente, livres, descontínuos, com baixa condutividade hidráulica e com alta incidência de poços secos ou de baixa produtividade.

O Subsistema **PPC**, com vazão média em torno de 9.000L/h, é aquífero do tipo cárstico, descontínuo, anisotrópico e limitado por lentes carbonáticas. Esse sistema produz águas bicarbonatadas de cálcio e magnésio.

Com base nos parâmetros hidrogeológicos dos subsistemas anteriormente descritos, foram definidos os aquíferos fraturados da bacia em estudo. A representação gráfica no mapa hidrogeológico da região do rio da Palma seguiu a proposta previamente descrita, diferenciando os respectivos sistemas por cores (Figura 4).

O mapa de solos utilizado para classificar os aquíferos do domínio poroso da região foi modificado a partir do Mapa de Reconhecimento de Solos de EMBRAPA (1978), em escala 1:100.000 (Figura 5), para o Distrito Federal e a denominação dos tipos de solo foi adequada às especificações recomendadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SBCS da EMBRAPA (1999).

Os aquíferos do domínio poroso estão associados ao manto de intemperismo, no qual a água está armazenada nos espaços intergranulares dos materiais constituintes (solo e saprolito).

Esses sistemas funcionam como armazenadores de água, regulando as vazões dos canais superficiais durante o período de estiagem e desempenhando importante papel nos processos de recarga. Com base na espessura e condutividade hidráulica dos solos, Campos e Silva (1998) propõem quatro sistemas em ordem decrescente de importância hidrogeológica, a saber: sistemas: **P₁**, **P₂**, **P₃** e **P₄**.

Os sistemas **P₁**, **P₂** e **P₃** são compostos por solos profundos, variando de 10 a 15 metros, e condutividades hidráulicas distintas, alta (de $1,2 \times 10^{-4}$ a $9,9 \times 10^{-5}$ m/s), média (de $6,0 \times 10^{-5}$ a $4,0 \times 10^{-5}$ m/s) e baixa (de $3,1 \times 10^{-5}$ a $6,5 \times 10^{-6}$ m/s). O sistema **P₄** é constituído por solos com pequenas espessuras, variando entre 2,5m e 1,0m, e baixa condutividade hidráulica, em torno de $1,2$ a $6,1 \times 10^{-7}$ m/s.

Figura 3. Mapa das Unidades Geológicas da Bacia do Rio da Palma (modificado de Campos; Silva, 1998).

Os solos da região do rio da Palma que apresentaram características similares em termos de meio físico foram agrupados de forma a compor áreas homogêneas sob o ponto de vista do comportamento hídrico. Para agrupar as classes de solo, foram considerados os parâmetros hidrodinâmicos conforme descritos por Campos e Silva (1998), o que resultou nos seguintes domínios porosos: P_1 , P_2 e P_4 (Tabela 2).

A representação desses sistemas no mapa hidrogeológico da região em estudo se dá por hachuras em diferentes direções conforme mostrado na Figura 6.

Tabela 2. Caracterização simplificada dos sistemas porosos da área em estudo.

Sistema	Agrupamento / Solos Predominantes
P_1	Latossolo Vermelho–Amarelo (LVA) de textura arenosa. Neossolos flúvicos.
P_2	Latossolo Vermelho (LV) arenoso a argiloso. Nitossolo
P_4	Cambissolo e Plintossolo Pétrico.

3.8. Declividade e Cobertura Vegetal

Com o objetivo de se determinar as condições de infiltração e recarga da região em estudo, fez-se necessário integrar aos sistemas aquíferos, os mapas de declividade e de uso e cobertura vegetal.

Para a criação do mapa de declividade foram executados, no programa *ArcView*, usando a extensão *3D Analyst*. A partir de mapas vetoriais plani-altimétricos da Companhia de Desenvolvimento do Planalto – CODEPLAN (1992) foram editados 570 pontos cotados e curvas de nível com equidistância de 5m. A edição dos dados foi necessária para correção de erros, tais como: curvas de nível - eliminação de isolinhas sobrepostas e junção de isolinhas descontínuas - e pontos cotados - edição dos pontos e alimentação da tabela com o atributo “cota”.

Com os pontos cotados, as curvas de nível, a drenagem e o limite da área, procedeu-se a criação do TIN (*Triangular Regular Network*) – tipo de MDE que representa a superfície por meio de um conjunto de faces triangulares interligadas – possibilitando a representação mais fiel das variações de altura do terreno. Gerou-se, então, o mapa de declividade a partir do TIN com 5 classes.

Para a confecção do mapa de uso e cobertura vegetal da bacia do rio da Palma, foi utilizada uma imagem do sensor de alta resolução HRV (*High Resolution Visible*), a bordo do satélite SPOT (*Système Probatoire d’Odbservation de la Terre*), datada de 29/04/2003, bandas XS1, XS2 e XS3.

Utilizou-se composição colorida RGB-321 e procedeu-se, então, a aplicação de realce por ampliação linear de contraste em cada banda da imagem, visando à melhoria das características visuais. Em seguida, procedeu-se a correção geométrica por georreferenciamento, segundo a técnica de transformação geométrica polinomial, baseada em pontos de controle (GCP – *ground control points*). Essa técnica consiste em estabelecer relações matemáticas entre as posições dos pixels na imagem e suas coordenadas no terreno com o objetivo de reorganizar os pixels das imagens, de forma a permitir o registro (sobreposição) dos diversos mapas utilizados.

Utilizando-se o *software* ENVI, foi realizado o registro da imagem SPOT, tendo como base a carta plano-altimétrica do Rio da Palma (MI-2214-2-NE) do IBGE.

Figura 4. Sistemas Aquíferos do Domínio Fraturado da Bacia do Rio da Palma. **R₃**- Metarritmito Arenoso; **Q₃**- Quartzito Médio); **R₄**- Unidade Metarritmito Argiloso; e **PPC** - Unidade Psamo-Pelito-Carbonatada).

Figura 5. Mapa de Solos da Bacia do Rio da Palma (modificado de EMBRAPA, 1978).

Figura 6. Sistemas Aquíferos do Domínio Poroso da Bacia do Rio da Palma.

Foram utilizados cinquenta (50) pontos de controle para a realização desse registro. Utilizou-se um polinômio de grau 1 para relacionar as linhas e colunas da imagem com as coordenadas do mapa, e para a definição dos novos valores de brilho da imagem, a técnica do “vizinho mais próximo”, resultando em uma boa qualidade do registro, ou seja em um RMS de 0,37 pixels, ou seja, um erro de 7,4m, menor que a resolução espacial da imagem (20m). Coordenadas retransformadas dentro da mencionada margem de erro são consideradas corretas, segundo Meneses e Madeira (2001).

A interpretação da imagem SPOT consistiu em extrair informações de alvos da superfície da área de interesse com base em suas respostas espectrais. A classificação de imagens multiespectrais é o processo de associação dos *pixels* de um conjunto de bandas de uma imagem a um número limitado de classes individuais que representem os objetos do mundo real, com base nos seus valores digitais. A imagem classificada é, assim, uma forma de mapa temático digital.

O fator que pode determinar a utilização de uma classificação supervisionada ou não supervisionada é o conhecimento do analista sobre a região. Para a classificação supervisionada, os dados de treinamento são utilizados para “treinar” os algoritmos de classificação para que esse possa classificar o restante da imagem, com base no cálculo da probabilidade de cada classe no espaço de amostras. Uma vez definidas as probabilidades das classes e, conseqüentemente, suas assinaturas espectrais, os algoritmos de classificação devem ser capazes de gerar relatórios tabulares e mapas temáticos representando o resultado da classificação. Assim, o mapa de uso e cobertura vegetal da bacia do rio da Palma foi produzido a partir da classificação e vetorização da imagem SPOT no *software* ENVI. Uma vez analisados os resultados da classificação, ela foi refinada usando um algoritmo de pós-classificação (*classification to vector*), para a edição do mapa temático utilizando o *software* ArcView GIS. As classes foram, assim, reclassificadas, em parte, “manualmente”, a critério do analista, tendo resultado no Mapa de Uso e Cobertura Vegetal da Bacia do Rio da Palma (Figura 7).

Este mapa teve suas classes ponderadas de acordo com o potencial de infiltração em função do uso da terra e da cobertura vegetal.

3.9. Mapa Hidrogeológico

Os planos de informação utilizados para a confecção do mapa hidrogeológico foram sobrepostos de maneira a integrar os sistemas aquíferos do domínio poroso com os do domínio fraturado. Os dois principais parâmetros integrados para determinar espacialmente ambos os domínios foram as médias de vazões de cada sistema/subsistema aquífero fraturado e o tipo de sistema poroso que os recobrem. Esses parâmetros foram compilados da proposta de Campos e Silva (1998) para aquíferos do Distrito Federal.

A representação gráfica dos respectivos domínios seguiu a proposta já apresentada para aquíferos sobrepostos. O domínio fraturado foi representado por cores e o domínio poroso por hachuras em diferentes padrões. Na Figura 8, é apresentado o Mapa Hidrogeológico do Alto Curso da Bacia do Rio da Palma na escala 1:50.000.

3.10. Condições de Infiltração e Recarga

A capacidade de infiltração e armazenamento de água dos sistemas aquíferos de uma bacia está relacionada, basicamente, aos fatores: geologia, solos, declividade e uso e cobertura vegetal. Assim, para que as condições de infiltração e recarga da área em estudo pudessem ser estabelecidas, fez-se necessária a integração dos seguintes planos de informação: sistemas aquíferos poroso e fraturado; declividade e uso e ocupação vegetal.

Figura 7. Mapa de Uso e Cobertura Vegetal da Bacia do Rio da Palma.

Figura 8. Mapa Hidrogeológico do Alto Curso da Bacia do Rio da Palma.

A integração dos dados se deu por meio de um SIG, em que cada plano de informação, ponderado de acordo com a capacidade de infiltração dos seus respectivos parâmetros, foi sobreposto de forma que as intersecções resultantes pudessem ser representativas das diferentes condições de infiltração e recarga da bacia em estudo.

O método escolhido para interpretação dos resultados foi a análise combinatória da soma dos pesos das classes, diferenciadas por fatores numéricos decimais. Cada parâmetro foi analisado e interpretado de acordo com as condições de infiltração e recarga representadas por suas faixas de pesos, conforme mostram as Tabelas 3, 4 e 5.

O mapa resultante da sobreposição e integração das bases de dados foi interpretado e reagrupado, gerando um mapa final com cinco classes que designam de forma qualitativa o potencial de infiltração e recarga da região estudada (Figura 9), a saber: Potencial Muito Alto, Potencial Alto, Potencial Moderado, Potencial Baixo e Potencial Muito Baixo.

Tabela 3. Ponderação das classes dos sistemas poroso e fraturado do alto curso do rio da Palma.

Plano de Informação	Classe	Peso	Justificativa
Sistema Poroso	P_2	5000	Condição ótima. Muito espesso e elevada condutividade hidráulica.
	P_1	4000	Condição boa. Condutividade hidráulica e espessura média.
	P_4	2000	Condição ruim. Espessura e condutividade hidráulica baixa.
Sistema Fraturado	R_3/Q_3	500	Condição ótima. Vazões médias a elevadas.
	PPC	300	Condição média. Vazões e interconectividade de fraturas medianas.
	R_4	200	Condição ruim. Litologias desfavoráveis.

Tabela 4. Ponderação das classes de declividade do alto curso do rio da Palma.

Plano de Informação	Classe	Peso	Justificativa
Declividade	0% – 8%	50	Até 8% escoamento superficial é mínimo. Ótimo para infiltração e recarga, tendência de desenvolvimento de fluxo difuso.
	8% - 25%	40	De 8 a 15% o escoamento é brando com até 20% de infiltração (com relação à precipitação total). Bom pra infiltração e recarga.
	25% - 50%	30	Infiltração reduzida. Regular para infiltração e recarga.
	50% - 75%	20	Infiltração muito restrita. Ruim para infiltração e recarga
	>75%	10	Péssimo para infiltração e recarga. Ampla tendência de desenvolvimento de fluxo linear concentrado.

Tabela 5. Ponderação das classes do uso e cobertura vegetal do alto curso do rio da Palma.

Plano de Informação	Classe	Peso	Justificativa
Uso da terra e cobertura vegetal	Mata	5	Grande densidade arbórea. Ótimo para infiltração e recarga.
	Cerrado	4	Boa densidade arbórea e Boa para infiltração e recarga.
	Campo e Pastagem	3	Média densidade arbórea e Regular para infiltração e recarga
	Agricultura e Solo exposto	2	Baixa densidade arbórea e ruim para infiltração e recarga
	Áreas Urbanas	1	Elevada impermeabilização. Péssimo para infiltração e recarga.

Figura 9. Mapa de Potencial de Recarga da bacia do Rio da Palma, DF.

As áreas com potencial muito alto correspondem aos sistemas aquíferos porosos P_2 e fraturado R_3/Q_3 , com ocorrência em declividades menores que 8% e vegetação preservada de mata ou cerrado. De forma geral, na área estudada, predominaram as regiões com potencial de infiltração alto e moderado, em que a interferência humana ainda é incipiente embora prevaleçam cambissolos em áreas com declividades altas. Grande parte das regiões de potencial baixo está relacionada às altas declividades ou a presença de edificações urbanas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O SIG torna possível a automatização da produção de documentos cartográficos, na medida em que todas as informações disponíveis estão inter-relacionadas com base na sua localização geográfica. Os “mapas base” representam fontes de informações que passam por diferentes operações de análise espacial, lógicas e algébricas para produção de novas informações, por meio de diferentes possibilidades de integração de dados.

Os planos de informação integrados no SIG permitiram realizar as análises almejadas e estabelecer a ligação da base de dados espacial e alfanumérica. Com a integração foi possível destacar a distribuição espacial das unidades hidrogeológicas e estabelecer as condições de infiltração e recarga da porção distrital da bacia do rio da Palma.

O uso de diferentes formas de representação cartográfica permite que sejam lançadas em um único mapa, informações de naturezas diferentes como é o caso dos domínios aquíferos rasos (intergranulares) e profundos (fraturados) da bacia do rio da Palma. O uso de hachuras e cores permitiu o mapeamento e a sobreposição de grande número de informações sobre a água subterrânea da referida bacia.

A sobreposição de diferentes planos de informação é efetiva para a construção de mapas de potencial de recarga de aquíferos e como esse produto cartográfico é dependente das intervenções humanas na bacia, sua atualização pode ser facilitada com a produção de novos mapas de uso e cobertura vegetal.

A qualidade do mapa hidrogeológico é diretamente vinculada à qualidade das bases cartográficas utilizadas para sua confecção, principalmente, dos mapas de geologia e de solos.

A proposta para mapeamento de aquíferos sobrepostos, utilizada no presente trabalho, considera a existência de informações essenciais e acessórias. Dentro do conjunto de informações essenciais, destacam-se: geologia, solos, cadastro de pontos d'água, geomorfologia, dados hidrodinâmicos e lineamentos. Dentre as informações acessórias, clima, relevo, dados de hidroquímica e risco de contaminação merecem destaque.

No que diz respeito à gestão dos recursos hídricos, o conhecimento da disponibilidade dos sistemas aquíferos e da qualidade de suas águas é primordial para estabelecer políticas integradas de gerenciamento das águas. Iniciativas que visem fornecer documentação técnica como o Mapa Hidrogeológico e de Potencial de Infiltração e Recarga do Alto Curso da Bacia do Rio da Palma constituem importantes fontes de informações para o planejamento e execução de políticas públicas. Entretanto, a despeito do crescimento populacional e da crescente exploração de água subterrânea, uma adequada gestão das águas requer investimentos na área técnica capazes de garantir a constante atualização da base de dados, a fim de que seja assegurada a utilização sustentável dos recursos hídricos.

5. REFERÊNCIAS

- AMORE, L. **Fundamentos para uso e proteção das águas subterrâneas do Distrito Federal**. 1994. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- BARBOSA, R. P. O sistema de atlas complexo de planejamento do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 39, n. 3, p. 144-150, 1977.
- BARROS, J. C. B. Geologia e hidrogeologia do Distrito Federal. In: GDF/CAESB. **Inventário hidrogeológico do Distrito Federal**. Brasília: SEMATEC/IEMA, 1987. p. 79-330.
- BARROS, J. G. C. Características geológicas e hidrogeológicas do Distrito Federal. In: UnB/SEMATEC. **Cerrado, caracterização, ocupação e perspectivas: o caso do Distrito Federal**. Brasília: SEMATEC/IEMA, 1994. 657p.
- BOVOLATO, L. E. Caracterização Geoquímica das Águas Subterrâneas de Araguaína/TO. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 2, n. 17, p. 8-19, 2006. Disponível em: <http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>. Acesso em julho de 2007.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographic information systems for land resources assessment: monographs on soil and resources survey**. Oxford: Clarendon Press, 1986. 194 p.
- CADAMURO, A. L. M. **Proposta, avaliação e aplicabilidade de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados para condomínios residenciais do Distrito Federal**. 126f. 2002. Dissertação (Mestrado em Processamento de Dados em Geologia e Análise Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 41-48, 2004.
- CAMPOS, J. E. G.; SILVA, F. H. S. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, 1998. p. 01-85. vol. 4.
- CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. **Comparação de interpoladores espaciais univariados para precipitação pluvial anual no Estado de São Paulo**. Campinas: Embrapa/CNPq, 2002. 6p. Comunicado técnico 33.
- COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Mapas topográficos plani-altimétricos digitais do Distrito Federal**. Brasília: CODEPLAN, 1992. Escala 1:10.000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Rio de Janeiro: SNLCS/EMBRAPA, 1978. 455 p. Boletim Técnico 53.
- _____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: SPI, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Noções Básicas de Cartografia**. Rio de Janeiro: IBGE/Departamento de Cartografia, 2005.

JOKO, C. T. **Hidrogeologia da região de São Sebastião – DF**: implicações para a gestão do sistema de abastecimento de água. 158f. 2002. Dissertação (Mestrado em Processamento de Dados em Geologia e Análise Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 407-414, 2005.

MELO JÚNIOR, G.; COSTA, C. E. F. S.; CABRAL NETO, I. Avaliação hidroquímica e da qualidade das águas de um trecho do Rio Açu, Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 16, n. 2, p. 27-36, 2003. Disponível em: <http://www.revistadegeologia.ufc.br/14_2003.pdf>. Acesso em julho 2007.

MENDONÇA, A. F. **Caracterização da erosão subterrânea nos aquíferos porosos do Distrito Federal**. Anexo 3a: Reservas de água de superfície do Parque Nacional de Brasília. 154f. 1993. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Prospecção) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1993.

MENESES, P. R.; MADEIRA, J. S. N. **Sensoriamento remoto**: reflectância dos alvos naturais. Brasília: UnB/EMBRAPA, 2001. 262p.

MENTE, A. Classificação e utilização de mapas hidrogeológicos. In: FEITOSA, E. C. (Org.) **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID – UFPE, 2000. p.175-182.

ROMANO, O.; ROSAS, J. G. C. Água subterrânea para fins de abastecimento de água e irrigação no Distrito Federal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24., 1970, Brasília. **Anais...** Brasília: SBG, 1970. p. 313-333.

SOUZA, M. T. **Fundamentos para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal**. 124f. 2001. Dissertação (Mestrado em Processamento de Dados em Geologia e Análise Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

VIEIRA, L. S. **Manual de ciência do solo**: com ênfase aos solos tropicais. 2. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1988. 464p.

ZOBY, J. L. G. **Hidrogeologia de Brasília**: bacia do Ribeirão Sobradinho. 178f. 1999. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Alto Rio Jamanxim, Pará, Brasil (doi:10.4136/ambi-agua.27)

Ana Katiuscia Pastana de Souza¹; Getulio Teixeira Batista²

¹Geóloga, M.Sc. em Hidrogeologia e Esp. em Gestão de Recursos Hídricos Aplicada a Bacias Hidrográficas – Conj. Maguari Al. 02, n° 08 - CEP: 66823061 – Belém, PA
Email: anakatiuscia@gmail.com

²Professor do Departamento de Ciências Agrárias e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Taubaté
Email: getulio@agro.unitau.br.

RESUMO

O presente trabalho objetivou delimitar, codificar e caracterizar as sub-bacias formadoras da bacia hidrográfica do Alto Rio Jamanxim, assim como, quantificar as áreas desflorestadas e a extensão da malha viária em sua área de drenagem, para os anos de 1999 e 2005. Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados dados referentes às “ottobacias”, hidrografia, rodovias, modelo digital de elevação (MDE) e quatro imagens do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat-5 (TM/Landsat-5) dos anos de 1999 e 2005. Com base em um modelo hidrológico gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia, na escala de 1:250.000, foi delimitada sua área de drenagem, bem como calculados seus parâmetros hidrológicos. Como resultado foram delimitadas e caracterizadas nove ottobacias na área de estudo, codificadas até o nível 5 (44291 a 44299). Em relação às atividades antrópicas na área da bacia foram identificadas as áreas desflorestadas até os anos de 1999 (635 km², correspondentes a 11% da área da bacia) e de 2005 (1.257 km² representando cerca de 21% da área total da bacia). Houve um incremento de desflorestamentos, entre as duas datas investigadas, de 622 km², ou seja, 98 % de aumento. Quanto à malha viária, foi mapeada uma extensão total de 1.685 km até 1999 e de 3.638 km até julho de 2005, o que representou um incremento de 116% na extensão das estradas abertas no período de 6 anos.

Palavras-chave: Desflorestamento; Geoprocessamento; Degradação; BR-163; Bacia hidrográfica; Modelo Digital de Elevação.

Physiographic characterization of the Alto Rio Jamanxim Hydrographic Basin, Pará, Brazil

ABSTRACT

The objective of this work was to outline and to characterize the sub-basins of the Alto Rio Jamanxim hydrographic basin and to code them using the concept of “otto-basins”, as well as to quantify the deforestation area and the increase in roads extension in its drainage area from 1999 to 2005. The work was based on data of river's and road's network, digital elevation model (DEM), and four TM/Landsat-5 images from 1999 and 2005. The outline of the boundaries and the hydrologic parameters of the Basin were based on a 1:250,000 DEM. Results have shown that nine sub-basins have been outlined in the study area, coded up to level 5 (otto-basin code system) and identifiers varied from 44291 to 44299. Deforestation by human activities totaled 635 km² (11% of the Basin) up to 1999 and to 1,257 km² up to 2005, therefore, an increase of 622 km² or 98% between these two dates. Regarding the road network, a total extension of 1,685 km was mapped up to 1999 and 3,638 km up to July 2005

what corresponds to an increase of 116% in road construction inside the basin boundaries in six years.

Keywords: Deforestation; Geoprocessing; Degradation; BR-163 road; Watershed; Digital Elevation Model.

1. INTRODUÇÃO

Para o gerenciamento de bacias hidrográficas é condição básica conhecer suas características físicas, como área de drenagem, forma da bacia, sistema de drenagem e características do relevo. O conhecimento desses elementos é de grande utilidade prática, pois, segundo Villela e Matos (1975), eles permitem conhecer a variação no espaço dos elementos do regime hidrológico.

Outra informação importante e que poderia ser extraída utilizando técnicas de geoprocessamento, seria a subdivisão de uma bacia, facilitando o referenciamento de bases de dados para a sistematização e compartilhamento de informações (Verdin e Verdin, 1999; Verdin, 1997; Tavares et al., 2003).

Considerando a bacia hidrográfica como uma unidade básica de gerenciamento de recursos hídricos, o CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) por meio da Resolução nº30 (11/12/1983) estabeleceu que o método desenvolvido por Pfafstetter (1989) seria adotado em âmbito nacional, como uma metodologia de codificação de bacias hidrográficas em "ottobacias", e procedimentos de subdivisões em agrupamentos de bacias hidrográficas (Brasil, 2002). Esse método de subdivisão e de codificação de bacias hidrográficas, desenvolvido no Brasil utiliza os dez algarismos do sistema decimal. O processo de hierarquização está relacionado com a área da bacia hidrográfica dos cursos d'água. Trata-se de um método natural, baseado na topografia da área drenada e na topologia (conectividade e direção) da rede de drenagem. Suas características principais são: economia de dígitos, informação topológica e aplicabilidade global. Nessa codificação, cada bacia tem uma numeração que permite informar quais as bacias hidrográficas que se localizam a montante e a jusante daquela em estudo, permite ainda a identificação do seu rio principal e seu relacionamento com as demais bacias da mesma região hidrográfica (até o nível continental).

A utilidade do método foi reconhecida pelo USGS (United States Geological Survey), que está realizando uma codificação de bacias hidrográficas de todo o planeta, com apoio das Nações Unidas, via UNEP (United Nations Environment Program). Essa iniciativa conta com a participação da SRH/MMA que priorizou o trabalho para o Brasil e introduziu outros elementos para otimizar tecnicamente os resultados. (Silva, 1999).

Esse método consiste, basicamente, no processo de hierarquização relacionado com a área de drenagem dos cursos d'água e permite o hidrorreferenciamento incluindo tratamento topológico da rede hidrográfica. Na delimitação das "ottobacias", as áreas de contribuição de cada trecho da bacia entre uma confluência e sua nascente são identificadas e a distância média entre os trechos dos cursos d'água da rede hidrográfica calculada. Com a disponibilidade atual dos MDE, essa delimitação fica bem mais precisa pelo uso dos dados altimétricos (Barbosa et al., 2007). Silva (1999) apresenta uma descrição detalhada do método Pfafstetter de codificação de bacias, tanto por meio manual quanto digital com base em MDE.

Um importante vetor do desflorestamento presente na bacia do Rio Tapajós é a rodovia federal BR-163 (Cuiabá-Santarém), que figura como um eixo de integração fundamental para a ligação entre o Centro Oeste do País à cidade de Santarém, localizada no Baixo Rio Amazonas, região Norte. Até os dias de hoje essa integração não se desenvolveu por falta de pavimentação em grande parte da rodovia e das péssimas condições de tráfego nos trechos pavimentados, limitando o setor do agronegócio e o deslocamento da população local.

Entretanto, está previsto o asfaltamento da rodovia na porção paraense, o que deverá acelerar o desenvolvimento e a ocupação em larga escala dessa região (Alencar et al., 2005).

Uma realidade generalizada na Amazônia é que 80% do desflorestamento estão concentrados nos primeiros 50 km de distância das margens das principais rodovias (Alves, 2002b; Câmara et al., 2005). Partindo-se dessa premissa, os municípios da porção paraense presentes na área de influência da BR-163 (50 km das margens) são: Novo Progresso, Altamira, Trairão, Itaituba, Rurópolis, Placas, Aveiro, Santarém, Belterra, Curuá, Monte Alegre, Alenquer e Óbidos.

Vale salientar que dentre os municípios paraenses pertencentes à área de influência da BR-163, Novo Progresso apresenta uma elevada taxa de crescimento, e com a pavimentação da rodovia essa taxa aumentará ainda mais, pois o referido município encontra-se localizado à margem da rodovia e limítrofe com o Estado do Mato Grosso que é um dos pólos agrícolas mais produtivos do país (Fearnside, 2004).

Dentro desse cenário e visando à conservação dos recursos naturais, faz-se necessária a realização de estudos de caracterização ou de diagnóstico da área a ser diretamente impactada, para permitir um planejamento de gestão e se programar uma política de uso dos recursos naturais que possibilite o desenvolvimento socioeconômico sustentável (Kohlhepp, 2002).

Sabe-se que o impacto derivado do uso do solo, repercute em todos os componentes do ciclo hidrológico, como no escoamento superficial, na recarga dos aquíferos, na qualidade da água e no transporte de sedimentos (Mendes e Cirilo, 2001; Chaves e Alipaz, 2006; Rao et al., 2003).

Inserida nesse contexto, a bacia hidrográfica Alto Rio Jamanxim, por ser uma das áreas de cabeceiras do Rio Jamanxim, tributário do rio Tapajós, além de fazer parte dos recursos hídricos do município de Novo Progresso e, ainda, apresentar 90% de sua área de drenagem inserida na área de influência da BR-163, merece estudo destacado (Fearnside, 2004).

Dessa forma, este artigo teve por objetivos a caracterização fisiográfica da bacia Alto Rio Jamanxim, com ênfase na estimativa do desflorestamento e abertura de estradas no período de 1999 e 2005. Especificamente, o trabalho visou: delimitar e codificar a bacia em “ottobacias” pertencentes ao Alto Rio Jamanxim; caracterizar a fisiografia da bacia e gerar mapas na escala 1:250.000 que contêm a compartimentação geológica, geomorfológica, pedológica e a cobertura vegetal, a partir do Banco de Dados Cartográficos e Temáticos do SIPAM/IBGE (1998). Foi avaliada a área desflorestada na bacia até o ano de 1999 e incremento do desflorestamento até o ano de 2005. Assim como, foi mapeada e quantificada a malha viária, com base em interpretação visual das imagens Landsat TM, para os anos de 1999 e 2005.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

Para a realização deste estudo foi selecionada a bacia hidrográfica Alto Rio Jamanxim, afluente do Rio Jamanxim, contribuinte do Rio Tapajós e, este por sua vez, afluente do Rio Amazonas. Essa área é compreendida pelos paralelos 7°21'00" e 8°48'36" de latitude sul e os meridianos de 55°52'48" e 54°57'36" de longitude oeste. Cerca de 99% da bacia estudada estão inseridos no espaço territorial do município de Novo Progresso e 1% no município de Altamira, no sudoeste do Estado do Pará. A rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém), principal via de acesso na região atravessa sua área de drenagem (Figura 1).

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica Alto Rio Jamanxim, objeto deste estudo, do município de Novo Progresso (amarelo claro) e da área de influência da BR-163, compreendida por uma “faixa” de 50 km das margens da rodovia (polígono marrom define o entorno da BR-163).

2.2. Caracterização da Bacia Alto Rio Jamanxim

O rio principal, denominado Rio Jamanxim, é formado na Serra do Cachimbo, região centro-leste do município de Novo Progresso, e deságua no rio Tapajós, apresentando sua confluência no limite entre os municípios de Itaituba e Trairão. Os principais afluentes do Rio Jamanxim, de montante para jusante, são os rios Tocantins e Novo, localizados na margem esquerda, e rio Arari, na margem direita. Já os cursos d’água principais da bacia de estudo estão localizados na margem direita do Rio Jamanxim e são intitulados, de montante para jusante, de: Córrego Bronca, Córrego Grota Rica, Córrego Louro, Córrego Franco Freire, Córrego Luciano e Córrego Silvinho.

O clima da bacia hidrográfica do Alto Rio Jamanxim é do tipo AW, segundo a classificação de Thornwaite (Martorano e Pereira, 1993), que corresponde a um clima tropical úmido, com inverno seco e com precipitação média do mês mais seco inferior a 60mm. A temperatura média anual na bacia é de 25°C, e a temperatura média mensal máxima de 32°C e a mínima é de 20°C. A umidade relativa do ar média anual varia entre 80 e 85%. Além de apresentar uma insolação anual de 1.800 a 2.000 horas (Brasil, 1984).

A vegetação é caracterizada pelas seguintes fitofisionomias: Floresta Estacional Decidual Submontana Dossel Emergente; Floresta Estacional Semidecidual Submontana Dossel Emergente; Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Cipós; Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Palmeiras; Floresta Ombrófila Densa Aluvial Dossel Uniforme; Floresta Ombrófila Densa Submontana Dossel Emergente; Refúgio Vegetacional Montano Herbácea; e Savana Florestada.

A região da bacia, objeto deste estudo, apresenta 11 unidades geológicas: Aluviões Holocênicos, Coluviões Holocênicos, Cobertura Detrito Laterítica, Suíte Intrusiva Cururu, Grupo Beneficiente, Suíte Intrusiva Creporizão, Suíte Intrusiva Parauari, Suíte Intrusiva Maloquinha, Grupo Iriri, Formação Salustiano e Formação Aruri.

As unidades geomorfológicas presentes na área são compostas por: Chapadas do Cachimbo, Planícies Amazônicas, Depressão do Rio Jamanxim-Xingu e Planaltos Residuais do Sul do Pará.

As unidades pedológicas presentes na área da bacia Alto Rio Jamanxim são compostas por: Neossolos, Cambissolos, Gleissolos, Latossolos, Argissolos e Nitossolos.

2.3. Material utilizado

O material utilizado constou de um conjunto de dados temáticos e cartográficos obtidos a partir do banco de dados do SIPAM/IBGE, com os seguintes planos de informação (*layers*): cobertura vegetal, pedologia, geologia, geomorfologia, Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), hidrografia, estradas, “ottobacias” (nível hierárquico = 4, 1:1.000.000) e localidades, além das imagens TM/Landsat-5, órbita-ponto 227/065 e 227/066, para os anos de 1999 e 2005 e do mosaico de imagens *GeoCover* ortorretificado da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), usado para o georreferenciamento na escala 1:250.000.

Para a caracterização socioeconômica do município Novo Progresso, foram utilizados dados do censo do IBGE (2006). As informações sobre as estações fluviométricas e pluviométricas presentes dentro e fora da bacia do Rio Jamanxim também foram adquiridas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2005).

Foi utilizado como interface de pré-processamento e processamento, incluindo a classificação das imagens, o aplicativo *ERDAS Imagine*. Para os processos de interpretação visual e geração dos mapas temáticos foi utilizado o aplicativo *Arcview*. Para os processos de delimitação e cálculo dos parâmetros hidrológicos foram utilizados a extensão *Es_Watershed Mapping* (Mapeamento de bacias hidrográficas da Vigilância Ambiental) desenvolvida para o *Arcview*, assim como, o aplicativo denominado WMS (*Watershed Modelling System*).

As principais etapas de desenvolvimento do trabalho foram executadas nos laboratórios da Divisão de Análise Ambiental do Centro Técnico e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CTO-BE / SIPAM), em Belém.

2.4. Metodologia utilizada

A metodologia de trabalho incluiu como componente central a caracterização fisiográfica para o diagnóstico da bacia objeto deste estudo. O fluxograma mostrado na Figura 2 caracteriza de modo sintético e hierárquico as etapas descritas na metodologia.

Figura 2. Fluxograma resumido da metodologia.

Para nortear os trabalhos foram utilizados técnicas e procedimentos metodológicos que foram desenvolvidos em várias fases, descritas a seguir.

2.5. Delimitação da Bacia Hidrográfica

O pré-processamento e o processamento dos dados de entrada e de saída do modelo foram implementados por meio de customização do ArcView denominada *Es_Watershed Mapping*, a reprojeção, mosaico e recorte dos MDE's que recobrem a região de estudo, foram realizadas no *ERDAS Imagine*, e a geração dos limites e parâmetros das sub-bacias foi executada no ambiente do *WMS*. Para ilustrar a metodologia adotada foi elaborado um fluxograma geral que representa a sequência adotada para a geração do mapa de bacias hidrográficas (Figura 3).

Figura 3. Fluxograma geral para a geração do mapa de bacias hidrográficas.

No ambiente do ArcView, a delimitação da bacia envolveu, inicialmente, a sobreposição dos *layers* de hidrografia (linha e polígono) e “ottobacias” nível 2, 3 e 4 (escala 1:1.000.000), correspondentes à área de estudo, objetivando a visualização espacial e a localização de pontos exutórios (*outlets*) da bacia, além dos pontos de confluência dos principais tributários. A partir disso, foi desenhado um polígono retangular e anotadas suas respectivas coordenadas do canto superior esquerdo e inferior direito, visando à identificação dos insumos necessários para a geração dos dados de entrada no *software WMS*.

Com as sub-bacias e os prováveis pontos de saída identificados, partiu-se para o pré-processamento desses dados, para a geração dos *grids* de elevação, acumulação e direção de fluxo.

No ambiente da customização *Es_Watershed Mapping* do ArcView, utilizou-se uma interface gráfica que permitiu o controle da sequência de operações: (i) recuperação de dados de hidrografia; (ii) geração da grade de rio, com a determinação das células com água e sem água; (iii) importação da imagem MDE; (iv) conversão da imagem do MDE para polígonos; (v) geração da grade de elevação; (vi) geração da grade de direção de fluxo; (vii) geração da grade de acumulação de fluxo; (viii) exportação dessas três últimas grades em formato ArcInfo Grid. O MDE utilizado estava na projeção *Albers Conical Equal Área/New International 1967* e foi importado como imagem no ambiente do *software ERDAS Imagine*.

O WMS é um aplicativo para o desenvolvimento de simulações de bacias hidrográficas, modelagem de bacias e delimitação de bacias e sub-bacias. A delimitação automática é a

identificação do sistema de drenagem a jusante da localização dos pontos resultantes da intersecção entre a rede de drenagem e as sub-bacias (Verdin, 1997).

Com base nesse software, foram realizadas as seguintes atividades: (i) importação do *grid* de elevação; (ii) importação do *grid* de direção de fluxo; (iii) importação do *grid* de acumulação de fluxo; (iv) definição do ponto *outlet* da bacia principal; (v) conversão do MDE para arcos; (vi) delimitação automática da bacia; (vii) cálculo dos parâmetros hidrológicos; (viii) exportação de arquivos de bacias, *outlets* e rios (polígono, linha, ponto) (Figura 4).

Figura 4. Ilustração dos resultados das diversas etapas na geração dos parâmetros hidrológicos com o *software* WMS.

2.6. Estudos das Atividades Antrópicas com base em Sensoriamento Remoto

Como base de referência foi utilizado o mosaico ortorretificado GeoCover da NASA, adquirido no formato compactado MrSid (.sid). Os pontos de controle foram coletados uniformemente ao longo das imagens. O Erro Médio Quadrático (RMS) e a quantidade de pontos utilizados em cada imagem são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Pontos de controle obtidos nas imagens, juntamente com o RMS (m).

Imagem	Órbita-ponto	Data de Imageamento	Total de pontos de controle	RMS
TM/Landsat-5	227/065	10/08/1999	34	20
	227/065	17/07/2005	29	18
	227/066	10/08/1999	30	21
	227/066	02/08/2005	25	18

A etapa de processamento envolveu a classificação das áreas desflorestadas e a edição matricial do resultado da classificação. O método supervisionado (Maxver) foi utilizado na classificação, uma vez que havia conhecimento prévio dos padrões espectrais/espaciais das classes na imagem e no terreno, o que permitiu a seleção de amostras de treinamento representativas, seguindo metodologia descrita por Venturieri e Santos (1998). Foram classificadas as duas cenas TM/Landsat-5 referentes ao ano de 1999 (Tabela 1). Foram coletadas amostras representativas das classes de floresta, não-floresta (afloramento de rocha) e desflorestamento identificadas nas imagens de satélite. Os corpos d'água foram previamente

removidos das imagens a serem classificadas para diminuir o nível de confusão com áreas desflorestadas queimadas recentemente.

Após a realização da classificação, foram verificados erros de inclusão e de omissão que foram eliminados por edição manual da imagem classificada. Após a edição das imagens de 1999 classificadas, deu-se início ao processo de vetorização e conversão das informações para o formato vetorial, a fim de permitir a integração (cruzamento) entre dados no aplicativo *Arcview*.

Na fase de interpretação visual, foram utilizados os arquivos vetoriais gerados a partir da vetorização dos dados *raster* provenientes da classificação supervisionada sobre as cenas TM/Landsat-5 do ano de 1999 que foram sobrepostos à imagem de 2005 para permitir a delimitação dos incrementos de áreas desflorestadas entre os anos de 1999 e 2005. Dessa forma, os incrementos identificados nas imagens do ano de 2005 foram delimitados a partir de 1999, com a digitalização na tela do computador utilizando o aplicativo *Arcview*.

A informação referente à malha viária para os anos de 1999 e 2005 foi extraída diretamente das imagens TM/Landsat-5, por meio da interpretação visual e da digitalização diretamente no monitor. Foi gerada inicialmente a malha viária na área da bacia até o ano de 1999. Em seguida, com base na sobreposição do mapa vetorial de 1999 sobre as imagens de 2005, foram geradas as novas vias de acesso para o ano de 2005.

Com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) no ambiente do aplicativo *ArcView* foram sobrepostos os *layers* e gerados os *layouts* dos mapas temáticos de delimitação das bacias hidrográficas e parâmetros hidrológicos, declividade, pedologia, geomorfologia, cobertura vegetal, geologia, desflorestamento, e uso e cobertura do solo. Essa integração resultou na caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Alto Rio Jamanxim objeto deste estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bacia hidrográfica Alto Rio Jamanxim apresentou uma área de drenagem equivalente a 5.867,5 km², sendo que 99% de sua área correspondem ao espaço territorial do município de Novo Progresso e 1% de Altamira, além de apresentar 90% de sua área de drenagem inseridos na área de influência da rodovia BR-163, arbitrariamente assumida como 50 km de cada lado da rodovia, com base em Alves (2002a).

Dentro desse cenário, a área objeto deste estudo foi delimitada, codificada, segundo o método de Pfafstetter (1989) e caracterizada quanto ao seu meio físico, onde foram quantificadas as unidades fisiográficas.

3.1. Características da Bacia

A bacia em estudo foi delimitada e os seus parâmetros hidrológicos foram calculados, passando de 5888,8 km², segundo ANA (2005), para uma área de 5867,5 km², estimada no presente trabalho, sendo dividida em 9 sub-bacias, que incluem "bacias" e "interbacias" codificadas, da foz para montante, em 44291 a 44299. Essa codificação indica que a bacia do Rio Jamanxim pertence à bacia do Rio Amazonas (nível 1, codificada com o primeiro algarismo 4), à bacia do Rio Tapajós (nível 2, codificada com o segundo algarismo, 44) e que é uma das quatro maiores e a primeira de jusante para montante (nível 3, codificada com o terceiro algarismo 442). A bacia do Alto Jamanxim é de fato uma interbacia de cabeceira do Rio Jamanxim (dígito 9 depois de 442, considerada como nível de codificação 4) e que neste trabalho foi codificada até o nível 5 e subdividida em 4 sub-bacias (dígitos 2, 4, 6 e 8 depois de 4429) e cinco interbacias (dígitos 1, 3, 5, 7 e 9 depois de 4429). A área de drenagem mínima encontrada foi de 216 km² (ottobacia 44295) e máxima de 1.445 km² (ottobacia

44299). Os resultados para a bacia principal, Alto Rio Jamanxim estão na Tabela 2. Ressalta-se que os cálculos foram realizados para uma escala 1:250.000.

A subdivisão realizada, mostrando a sobreposição dos *layers* de hidrografia e a ordem dos cursos d'água é apresentada na Figura 5. Visualiza-se a extensão da ramificação dessa bacia que foi classificada, a partir do método de Strahler (ESRI, 1997), como sendo de sexta ordem.

A densidade de drenagem da bacia, objeto deste estudo, foi estimada em $0,5 \text{ km.km}^{-2}$, indicando uma bacia com drenagem pobre, com densidades nas sub-bacias variando de $0,36$ a $0,74 \text{ km.km}^{-2}$. Observou-se que as ottobacias 44291 e 44293 apresentaram praticamente os mesmos valores para os parâmetros calculados.

As vertentes da bacia principal e das sub-bacias estão orientadas no sentido norte. O comprimento da bacia encontrado foi de 142,4 km, e o das sub-bacias entre 22,8 a 75,8 km.

Tabela 2. Características físicas da Bacia Alto Rio Jamanxim.

PARÂMETROS	VALORES
Área de drenagem (km^2)	5867,5
Declividade média da bacia (%)	3,3
Trajetória máxima do escoamento (km)	214,2
Declividade do trajeto máximo do escoamento (%)	0,2
% Sul	43,4
% Norte	56,6
Comprimento máximo do rio (km)	211,1
Declividade média do rio mais longo	0,1
Comprimento da bacia (km)	142,4
Fator de Forma	3,5
Sinuosidade do rio principal	1,5
Perímetro (km)	747,1
Elevação média (m)	307,9
Comprimento total dos cursos d'água (km)	2973,7
Densidade de drenagem (km/km^2)	0,5
Coefficiente de compactidade	2,7
Ordem da Bacia	6ª Ordem

Das sub-bacias delimitadas, a “ottobacia” 44299 apresentou a maior área de drenagem ($1.445,1 \text{ km}^2$) e menor densidade de drenagem ($0,27 \text{ km.km}^{-2}$). Secundariamente, a sub-bacia 44296 apresentou maior índice de densidade de drenagem, em torno de $0,74 \text{ km.km}^{-2}$ (Figura 5).

3.2. Quantificação das Unidades Fisiográficas

As unidades fisiográficas foram quantificadas em relação à cobertura vegetal, geologia, geomorfologia, pedologia e uso e ocupação do solo.

3.2.1. Cobertura Vegetal

A principal fitofisionomia existente na bacia, caracterizada pelo SIPAM/IBGE (1998), em 1998, era representada pela Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Cipó, abrangendo 66,7% da área, e, secundariamente, a Floresta Ombrófila Densa Submontana Dossel Emergente, com 13,1%. A principal atividade antrópica era caracterizada pela pecuária que abrangia 9,2% e, em menor proporção, pelas culturas anuais com menos de 1%. As áreas de cobertura vegetal da Bacia Alto Rio Jamanxim, ano base de 1998, estão indicadas na Tabela 3.

Geologicamente, a unidade dominante na área da bacia é representada pela Suíte Intrusiva Creporizão, abrangendo 46,3%, que é composta basicamente por granitóides. Secundariamente, a Formação Salustiano, com 12,9%, onde predominam riolitos, dacitos e andesitos associados. A quantificação das áreas, relativa às unidades geológicas, caracterizadas na Bacia Alto Rio Jamanxim, estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 3. Quantificação da cobertura vegetal e uso do solo.

Fitofisionomia	Área (km²)	(%)
Culturas Anuais	6,6	0,1
Floresta Estacional Decidual Submontana Dossel Emergente	264,0	4,5
Floresta Estacional Semidecidual Submontana Dossel Emergente	79,1	1,4
Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Cipós	3914,8	66,7
Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Palmeiras	26,9	0,5
Floresta Ombrófila Densa Aluvial Dossel Uniforme	64,6	1,1
Floresta Ombrófila Densa Submontana Dossel Emergente	765,8	13,1
Pecuária	544,4	9,2
Refúgio Vegetacional Montano Herbácea	141,4	2,4
Savana Florestada	44,9	0,8

Fonte: Extraído de SIPAM/IBGE (1998).

Tabela 4. Quantificação das unidades geológicas.

Unidade Geológica	Área (km²)	(%)
Aluviões Holocênicos	97,2	1,7
Cobertura Detrito-Laterítica	111,2	1,9
Pleistocênica		
Coluviões Holocênicos	12,3	0,2
Formação Aruri	705,3	12,0
Formação Salustiano	757,5	12,9
Grupo Beneficente	475,4	8,1
Grupo Iri	113,4	1,9
sem informação	15,3	0,3
Suíte Intrusiva Creporizão	2713,6	46,3
Suíte Intrusiva Cururu	0,2	Sem representatividade
Suíte Intrusiva Maloquinha	458,3	7,8

Fonte: Extraído de SIPAM/IBGE (1998).

3.2.3. Unidades Geomorfológicas

As unidades geomorfológicas encontradas na área da bacia estão representadas pelas Chapadas do Cachimbo, Planícies Amazônicas, Depressão do Rio Jamanxim-Xingu e Planaltos Residuais do Sul do Pará, tendo sido quantificadas e apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Quantificação das unidades geomorfológicas.

Unidade Geomorfológica	Área (km²)	(%)
Chapadas do Cachimbo	330,0	5,6
Planícies Amazônicas	109,2	1,9
Depressão do Rio Jamanxim-Xingu	5149,0	87,8
Planaltos Residuais do Sul do Pará	264,0	4,5

Fonte: Extraído de SIPAM/IBGE (1998).

Na bacia ocorre predominância da unidade denominada Depressão do rio Jamanxim-Xingu, em 87,8% da área. Principalmente, ocorrendo formas de dissecção caracterizadas por um conjunto de formas de relevo de topos convexos, em geral esculpidas em rochas cristalinas e, eventualmente, também em sedimentos, às vezes, denotando controle estrutural, definidas por vales pouco profundos, apresentando vertentes de declividade suave.

3.2.4. Classes de Solos

As quantificações de todas as unidades pedológicas, caracterizadas na bacia, estão indicadas na Tabela 6. Observou-se que os solos predominantes foram os Argissolos (Podzólico Vermelho-Amarelo), que ocorrem em 73,7% da área.

Tabela 6. Quantificação das unidades pedológicas.

Unidade de Solo		Área (km ²)	(%)
Sipam/IBGE (1998)	EMBRAPA (1999)		
Afloramento de Rochas	Afloramento de Rochas	317,4	5,4
Areia Quartzosa	Neossolos	134,6	2,3
Cambissolo	Cambissolos	15,3	0,3
Gleissolo	Gleissolos	194,8	3,3
Latossolo Vermelho-Amarelo	Latossolos	131,2	2,2
Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolos	4327,0	73,7
Podzólico Vermelho-Escuro	Nitossolos	479,9	8,2
Solo Litólico	Neossolos	252,2	4,3

Fonte: Adaptado de SIPAM/IBGE (1998) ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

3.2.5. Atividades Antrópicas

A classificação digital com o objetivo de mapear as áreas de desflorestamento resultou em erros de omissão e inclusão em algumas porções da imagem. Assim, foi necessária uma edição pelo analista das imagens classificadas a fim de corrigir confusões ou erros inerentes ao processo. As principais confusões encontradas foram descontinuidades em classes que na realidade não poderiam ser descontínuas (estradas, desflorestamentos) e classificação de áreas de solo exposto natural como se fossem áreas desmatadas (e.g. banco de areia).

No ano de 1999, foi constatada a existência de um padrão de desflorestamento mais concentrado na porção norte da bacia do Alto Jamanxim em áreas adjacentes ao eixo da rodovia. Na porção sul, que não é seccionada pela rodovia, observou-se um padrão de menor frequência marcado por desflorestamentos médios e grandes. O mapa de desflorestamento é composto por três classes representativas (floresta, não-floresta e desflorestamento). Foram gerados os seguintes mapas: i) mapa do desflorestamento acumulado até 1999 (Figura 6a) e do desflorestamento acumulado até 2005 (Figura 6b).

O mapa temático apresentado na Figura 6c mostra a distribuição espacial do incremento do desflorestamento entre os anos de 1999 e 2005 na área da bacia hidrográfica. Observa-se o aparecimento de novos desflorestamentos em áreas de floresta. A porção oeste passou a ser bastante desflorestada nesse período.

Na área total da bacia hidrográfica do Alto Jamanxim (5.867,5 km²) foram quantificados 172 polígonos de área sem a cobertura original até o ano de 1999, o que representava uma área já convertida em classes de uso da terra (principalmente uso agropecuário) de 635 km² (11% da área da bacia). Já no ano de 2005, foram mapeados 419 polígonos de incremento da remoção da cobertura vegetal ocorrida entre os anos de 1999 e 2005. Foram quantificados, em 2005, um desflorestamento acumulado de 1.257 km² representando cerca de 21 % da área total da bacia do Alto Jamanxim associado a um incremento, entre as duas datas investigadas, de 622 km², ou seja, 98 % de aumento. Observações de campo revelaram que o desflorestamento ocorrido entre 1999 e 2005 foi convertido para exploração agropecuária e crescimento urbano, entre outras. Parte da área desflorestada foi abandonada e encontrava-se em regeneração. A Tabela 7 mostra os valores calculados do desflorestamento nos anos de 1999 e 2005 para a área da bacia do Alto Jamanxim e para as nove sub-bacias delimitadas.

Figura 6. Mapa do desflorestamento acumulado: (a) até 1999; (b) até 2005; (c) incremento do desflorestamento entre 1999 e 2005 na bacia hidrográfica do Alto Jamanxim; (marrom=desflorestamento até 1999, vermelho=desflorestamento até 2005, verde=floresta e bege=não-floresta).

Dentre as sub-bacias mais afetadas pelo desflorestamento ao longo do período de estudo, destacam-se negativamente as “ottobacias” 44295 e 44296 que tiveram um incremento do desflorestamento, entre 1999 e 2005, em torno de 1246% e 860%, respectivamente. As sub-bacias mais preservadas nos últimos anos foram 44298 e 44294. Mesmo assim, tiveram incrementos de 45% e de 47%, respectivamente. Os mapas temáticos: desflorestamento detectados no ano de 1999 (Figura 6a), desflorestamento detectado no ano de 2005 (Figura 6b) e incremento do desflorestamento (Figura 6c) nas nove sub-bacias do Alto Jamanxim, demonstram o panorama crescente atual da remoção da cobertura vegetal no período avaliado neste trabalho.

Os desflorestamentos ocorridos na área da bacia estão geralmente associados à abertura de estradas para acesso às áreas de interesse econômico para extração de madeira. Outro vetor de expansão do desflorestamento na área da bacia do Alto Jamanxim são os rios, nos quais desflorestamentos pequenos e médios têm se intensificado desde 1999. Nas porções norte e central da bacia ocorre uma maior densidade de desflorestamentos, principalmente na margem esquerda do rio Jamanxim.

Igualmente, foram analisadas as estradas vicinais dentro da bacia que somaram uma extensão total estimada de 3637,5 km, até julho de 2005. Isso representa um aumento de estradas abertas em torno de 54%, em um período de 6 anos (Tabela 8). O mapa contendo o resultado desta variação é apresentado na Figura 7 (a) para o ano de 1999 e 7 (b) para o ano de 2005.

Tabela 7. Áreas das sub-bacias, dos desflorestamentos (até 1999 e até 2005) e incrementos de desflorestamento nesse período para as sub-bacias codificadas.

<i>Sub-Bacias</i>	<i>Área das Sub-bacias (km²)</i>	<i>Desflorestamento em 1999 N° de Polígonos (ha)</i>	<i>Desflorestamento em 2005 N° de Polígonos (ha)</i>	<i>Incremento (ha) (%)</i>
44291	723,5	53 polígonos 121,4	79 polígonos 201,3	80,0 65,9%
44292	346,8	18 polígonos 52,2	27 polígonos 83,6	31,4 60,2%
44293	770,5	53 polígonos 159,0	67 polígonos 294,2	135,2 85,0%
44294	288,6	24 polígonos 128,6	27 polígonos 189,8	61,2 47,6%
44295	216,0	4 polígonos 3,8	19 polígonos 51,1	47,3 1246,4%
44296	966,1	13 polígonos 12,6	44 polígonos 120,9	108,3 860,4%
44297	271,3	15 polígonos 37,0	29 polígonos 76,3	39,3 106,2%
44298	839,5	8 polígonos 64,7	52 polígonos 93,6	29,0 44,8%
44299	1.445,2	37 polígonos 56,0	75 polígono 146,4	90,4 161,3%
<i>Bacia</i>	<i>Área Total</i>	<i>Desflorestamento 1999</i>	<i>Desflorestamento 2005</i>	<i>Incremento 2005-1999</i>
<i>Alto Jamanxim (4429)</i>	<i>5.867,5 km²</i>	<i>635,3 km²</i> <i>10,8 %</i>	<i>1257,3 km²</i> <i>21,4 %</i>	<i>622,0 km²</i> <i>97,9 %</i>

Tabela 8. Quantificação da extensão das estradas em cada ottobacia.

<i>Ottobacia</i>	<i>Extensão de Estradas até 1999 (km)</i>	<i>Extensão de estradas entre 1999 e 2005 (km)</i>	<i>Extensão total de estradas (km)</i>
44291	200,3	124,7	324,9
44292	129,0	136,5	265,5
44293	417,4	351,5	768,9
44294	372,5	189,5	562,0
44295	31,0	121,0	152,0
44296	155,6	313,6	469,2
44297	53,9	190,9	244,8
44298	85,0	228,1	313,1
44299	239,9	297,2	537,2
Total Alto Jamanxim	1684,6	1952,9	3637,5

Figura 7. Mapa da malha viária entre (a) 1999 e (b) 2005 na área da bacia hidrográfica do Alto Jamanxim e ottobacias.

O maior incremento percentual na abertura de estradas foi na bacia 44295, onde houve um aumento de 79,6% e, em segundo lugar, na bacia 44297, com 78,0%. Porém, visualizando a Figura 8, pode ser observado que a bacia 44293 apresentou a maior extensão de estradas em sua área de drenagem.

Figura 8. Extensão da malha viária até 1999 e até julho de 2005, por ottobacia.

Observou-se ainda, que a construção de estradas ou caminhos apresentou um sentido leste oeste, em formato de “espinha de peixe” sem levar em consideração a direção da drenagem, é notório que o melhor local para a construção de estradas é no divisor hidrográfico para minimizar o impacto na drenagem (Silva Jr. e Mattos, 2003).

4. CONCLUSÃO

A área estimada para a bacia resultou em uma diferença de 20 km² em relação ao limite previamente conhecido para escala 1:1.000.000, o que representa uma diferença significativa para planejamento e gestão. O método de codificação (*ottobacias*) permitiu a hierarquização de nove bacias as quais variaram de 44291 a 44299, e as bacias aparentemente homogêneas apresentaram valores dos parâmetros hidrológicos similares.

As unidades fisiográficas predominantes na área da bacia são: i) Vegetação: Floresta Ombrófila Aberta Submontana com cipós ocupando 66,7%; ii) Geológica: Suíte Intrusiva Creporizão, ocorrendo em 46,3% da área da bacia; iii) Geomorfológica: Depressão do Rio Jamanxim-Xingu; ocupando quase que totalmente (87,8%) da bacia; iv) Solos: Argissolos (Podzólico Vermelho Amarelo), ocorrem em 73,7% da bacia Alto Rio Jamanxim.

No ano de 1999, foi constatada a existência de um padrão de desflorestamento mais concentrado na porção norte da bacia do Alto Jamanxim em áreas adjacentes ao eixo da rodovia. Enquanto a porção sul, que não é seccionada pela rodovia, apresentava um padrão de desflorestamento menos intenso, com talhões médios e grandes.

Até o ano de 1999, foi quantificado uma área já convertida em classes de uso da terra (principalmente uso agropecuário) de aproximadamente 635 km² (11 % da área da bacia) e em 2005 foi quantificado um desflorestamento acumulado de 1.257 km² representando cerca de 21 % da área total da bacia, associado a um incremento, entre as duas datas investigadas, de aproximadamente 622 km², ou seja, 98% de aumento. Entre 1999 e 2005 esse desflorestamento foi convertido principalmente para uso para agropecuária, área urbana, entre outras.

As “ottobacias” 44295 e 44296 tiveram destaque negativo por terem sofrido um incremento de áreas desflorestadas, entre 1999 e 2005, de 1246% e 860%, respectivamente. As sub-bacias mais preservadas nos últimos anos foram 44298 e 44294, mesmo assim, com incrementos em torno de 45% e 47%, respectivamente.

Os desflorestamentos ocorridos na área da bacia estão geralmente associados à criação de estradas vicinais com a finalidade de acesso às áreas de interesse para extração de madeira. Outro vetor de expansão do desflorestamento na área da bacia do Alto Jamanxim são os rios, em que desflorestamentos pequenos e médios têm sido intensificados desde 1999. Nas porções norte e central da bacia, ocorre uma maior densidade de desflorestamentos, principalmente na margem esquerda do Rio Jamanxim.

A malha viária mapeada apresentou uma extensão total de 3638 km, até julho de 2005. Observou-se um aumento de estradas abertas em torno de 54%, no período de estudo (6 anos). O maior percentual na abertura de estradas foi na bacia 44295, onde um houve um aumento de 79,6%, em segundo lugar, a bacia 44297, com 78%. Observou-se ainda, que as estradas ou caminhos apresentaram um sentido dominante leste-oeste, em formato de “espinha de peixe” sem levar em consideração a direção dominante da drenagem, portanto, favorecendo erosão e dificultando a manutenção das estradas.

Para a elaboração do plano de gestão dessa bacia, recomenda-se que os dados sejam validados em campo, além da realização do monitoramento da vazão na confluência do rio principal, denominado Rio Jamanxim com o Rio Mutuacá, para a realização do cálculo de disponibilidade hídrica.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio que viabilizou a participação da autora principal no Curso de Especialização a Distância em Gestão de Recursos Hídricos em Bacias Hidrográficas da Pró-Reitoria de Pesquisas e Pós-Graduação da Universidade de Taubaté, Processo CNPq/CT-Hidro N°504304/2003-8 (Edital MCT/CNPq/CT-Hidro N°03/2003 – Capacitação de Recursos – Chamada 1).

Ao SIPAM - Sistema de Proteção da Amazônia, Centro Técnico e Operacional de Belém, por facilitar o acesso às informações e pelo apoio operacional que foi de extrema importância para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HidroWeb**: sistema de informações hidrológicas. 2005. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 12 set. 2006.
- ALENCAR, A.; MICOL, L.; REID, J; AMEND, M. O.; ZEIDEMANN, V; SOUSA JÚNIOR, W. C. **A pavimentação da BR-163 e os desafios à sustentabilidade**: uma análise econômica, social e ambiental. Belo Horizonte: CSF, 2005. Disponível em: <<http://www.estacaovida.org.br/pdf/pavimentacaobr163.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2007.
- ALVES, D. S. An analysis of the geographical patterns of deforestation in Brazilian Amazonia in the 1991-1996 period. In: WOOD, C. H.; PORRO, R. (Org.). **Land use and deforestation in the Amazon**. Gainesville: University Press of Florida, 2002a. p. 95-161.
- ALVES, D. S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, p. 2903-2908, 2002b.
- BARBOSA, F. L. R.; SILVA, M. A.; TEIXEIRA, A. de A.; PRADO, A. do; SCHERER-WARREN, M.; RIBEIRO, R. M. P. Delimitação de otobacias a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a bacia do Verde Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 21-26 abril 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3271-3278.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. Grupo de Trabalho Interministerial. **Plano de desenvolvimento sustentável para a área de influencia da BR-163**. Brasília: MIN, julho de 2004. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br>>. Acesso em: 15 jul. 2006.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Recursos hídricos**: conjunto de normas legais. 2. ed. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 2002. 141p.
- BRASIL. Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia. **Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira**. Belém: SUDAM, 1984. (Publicação, 39).
- CÂMARA, G.; AGUIAR, A. P. D.; ESCADA, M. I.; AMARAL, S.; CARNEIRO, T.; MONTEIRO, A. M. V. et al. Amazonian deforestation models. **Science**, v. 307, n. 5712, p. 1043-1044, 2005.

- CHAVES, H. M. L.; ALIPAZ, S. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index. **Water Resource Management**, Athens, v. 21, n. 5, p. 883-895, may 2007.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412 p.
- ESRI. **Arc-Info version 7.3**. Redlands: Esri, 1997. Software.
- FERNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 3. / ENCONTRO AMAZÔNICO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS, 1., 22 a 26 de junho de 2004, Manaus. **Resumos...** Manaus: INPA, 2004. Disponível em: <http://www.philip.inpa.gov.br/publ_livres/Resumos%20e%20anais/Unpublished%20abstracts/Fearnside%20resumo-desmatamento.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2007.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades@**. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>>. Acesso em jul. 2007.
- KOHLHEPP, G. Conflitos de interesse no ordenamento territorial da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 16, n. 45, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142002000200004&script=sci_arttext>. Acesso em: 18 mar. 2007.
- MARTORANO, L. G.; PEREIRA, L. **Estudos climáticos do Estado do Pará, classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica (Thornthwaite)**. Belém: SUDAM/EMBRAPA, 1993.73p.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto alegre: ABRH, 2001.
- PFAFSTETTER, O. **Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989. p. 19. Manuscrito não publicado.
- RAO, S. S.; MURTHY, Y. V. N. K.; ADIGA, S.; AMMINEEDU, E. Performance index for watershed development. **The Journal of Indian Geophysical Union**, Hyderabad, v. 7, n. 4, p. 239-247, 2003
- SILVA JUNIOR, J. A.; MATTOS, J. T. de. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na elaboração de projetos de traçado de rodovias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 05 a 10 de abril 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1943-1950.
- SILVA, P. A. **Classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras segundo o método pfafstetter, com uso de geoprocessamento**. In: ENCONTRO DAS ÁGUAS, 2., 15 a 18 de junho 1999, Montevidéu. **Resúmenes y Trabajos presentados...** Montevidéu: IICA, 1999. Disponível em: <<http://www.iica.org.uy/16-6-pan1-pon10.htm>>. Acesso em: julho 2007.
- SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA. **Base de dados georreferenciados do Centro Técnicos e Operacional de Belém**. 1998. 1 CD-ROM.
- STRAHLER, A. N. Quantitative slope analysis. **Bulletin of the Geological Society of América**, Rochester, v. 67, p. 596-671, 1956.

- TAVARES, A. C. F., MORAES, J. F. L. de; ADAMI, S. F.; LOMBARDI NETO, F.; VALERIANO, M. de M. Expectativa de degradação dos recursos hídricos em microbacias hidrográficas com auxílio de sistemas de informação geográfica. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 417-424, 2003.
- VENTURIERI, A.; SANTOS, J. R. dos. Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de informações geográficas**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 1998. p. 351-371. Capítulo 18.
- VERDIN, K. L. A system for topologically coding global drainage basins and stream networks. In: ANNUAL ESRI USERS CONFERENCE, 17., July 1997, San Diego. **Proceedings...** Disponível em: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to350/pap311/p311.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2006.
- VERDIN, K. L.; VERDIN, J. P. A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 218, n. 1, p. 1-12, 1999.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245p.

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X

www.agro.unitau.br/ambi-agua

E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br

Tel.: (12) 3625-4116

Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais (doi:10.4136/ambi-agua.28)

Fábio Marcelo Breunig¹; Flávio Wachholz²; Waterloo Pereira Filho³; Conrado de Moraes Rudorff⁴

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Mestrando em Sensoriamento Remoto

E-mail: fabiobreunig@gmail.com

²Universidade Federal de Santa Maria – Mestrando em Geografia

E-mail: fwalemao@gmail.com

³Universidade Federal de Santa Maria – Docente do Departamento de Geociências

E-mail: waterloopf@gmail.com

⁴Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Mestre em Sensoriamento Remoto

E-mail: cmr@ltid.inpe.br.

RESUMO

O trabalho avaliou a separabilidade de classes de água, a partir de técnicas de análises da reflectância de superfície, com dados medidos em campo e imagens multiespectrais adquiridas em nível orbital. A área de estudo foi o reservatório Rodolfo Costa e Silva, localizado na região central do Rio Grande do Sul. A metodologia foi baseada na coleta de dados *in situ* – total de sólidos em suspensão, clorofila (a, b, c), transparência da água e espectros de reflectância bidirecional – em 21 pontos amostrais no dia 16 de maio de 2006. A técnica de remoção do contínuo foi aplicada aos espectros de campo em quatro intervalos de bandas de absorção: 400-550 nm, 610-640 nm, 650-680 nm e 580-700 nm. Os parâmetros de remoção do contínuo das bandas de absorção analisados foram: profundidade, área e largura. Verificou-se que os parâmetros de profundidade, área e a largura da banda de absorção não apresentaram potencial de separabilidade em classes espectrais relacionadas à pequena variação na concentração dos componentes opticamente ativos na água. Imagens CBERS-2/CCD e Landsat 5/TM adquiridas em datas próximas à atividade de campo foram corrigidas dos efeitos atmosféricos e classificadas. Os resultados das classificações não apresentaram correlações significativas com os parâmetros de qualidade da água, a fim de proporcionar uma caracterização espectral das classes de água ou compartimentos. A dificuldade no estabelecimento de relações entre os parâmetros de reflectância espectral e qualidade da água foi devida, principalmente, à baixa variabilidade dos componentes opticamente ativos na água do Reservatório Rodolfo Costa e Silva. Neste caso, as análises espectrais testadas neste trabalho não foram sensíveis às pequenas variações observadas por meio dos dados de campo.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; reservatórios; remoção do contínuo.

Analysis of optical proprieties of the water reservoir Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brazil, with field spectral data and orbital multispectral images

ABSTRACT

An evaluation of the discrimination of water classes using continuum removal technique applied over spectral data obtained in field and multispectral images classification is

presented. The study area was the Rodolfo Costa e Silva water reservoir, located in central region of Rio Grande do Sul (RS) State, in Southern region of Brazil. The methodology was based on *in situ* data collection of: total suspended solids, chlorophyll (a, b and c), water transparency, and bidirectional spectral reflectance. These data were collected in 21 point (samples) in May 16, 2006. The continuum removal technique was applied on the spectral data over 4 absorption bands: 400-550 nm, 610-640 nm, 650-680 nm e 580-700 nm. The continuum removal parameters analyzed for each absorption band were: depth, area and width. The multispectral images used were CBERS-2/CCD and Landsat 5/TM. The images were acquired in a date nearest to field work and with appropriate weather conditions. These images were corrected by removing atmospheric effects and then classified. According to the results obtained from the continuum removal technique, it was verified that band depth, area and width did not present a good potential to separate different water classes. Digital classification results did not show significant correlations with the limnological parameters collected in field and, therefore, could not be used to characterize spectrally different water classes or compartments. The main problem of establishing relationships between spectral reflectance and water quality parameters was due to the low variability of optical components in the water of Rodolfo Costa e Silva Reservoir. In this case the spectral analyses (considering both techniques) were not sensitive to the relative small variations observed in field data.

Keywords: Remote sensing; reservoirs; continuum removal.

1. INTRODUÇÃO

O reservatório Rodolfo Costa e Silva, atualmente vinculado a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), é uma das fontes de água usadas para abastecer a cidade de Santa Maria, no centro do Rio Grande do Sul. A qualidade da água desse reservatório tem implicações diretas no processo de tratamento e no custo da água. Vários fatores influenciam na qualidade da água das barragens, dentre os quais se destacam os processos agrícolas, o desmatamento, urbanização, indústrias, mineração e o sistema de transportes (Jobin, 1998). Os impactos sobre os lagos, reservatórios e rios são inúmeros, destacando-se a variação da temperatura, oxigênio dissolvido, total de sólidos em suspensão, concentração de nutrientes, modificação da hidráulica, aumento da concentração de mercúrio e ação dos gases do efeito estufa (NRC, 1993, 2002; Norling et al., 2004).

O estudo de reservatório a partir da espectroradiometria e de imagens de satélite constitui uma nova forma de acessar as características limnológicas. Ao considerar a extensão e quantidade de corpos hídricos no Brasil, fica evidente a necessidade de novas ferramentas para monitorar a dinâmica e características desses ambientes. A isso se soma o fato de as barragens terem relevância quanto à produção de energia no Brasil (Jobin, 1998). Devemos atentar ainda para o fato da construção de numerosas barragens e açudes, para servirem de reservatório de água (Esteves, 1998).

A presença de sedimentos nos lagos é importante para a avaliação do ecossistema, estudo da evolução e interações que ocorrem entre o sistema terrestre e aquático, e para avaliar os impactos ambientais. Os sedimentos límnicos podem ser orgânicos ou inorgânicos. Os sedimentos orgânicos em suspensão são representados pelo fitoplâncton, detritos e microorganismos vivos. Esses compostos possuem menor condutividade e baixa resistência dielétrica. Os sedimentos inorgânicos em suspensão são representados por partículas trazidas das áreas de captação do reservatório ou drenagem, representados por minerais (Esteves, 1998).

O uso do sensoriamento remoto nos estudos limnológicos possibilita avaliar grandes áreas e relacionar a resposta espectral da água com dados limnológicos obtidos em campo (Dekker, 1993). A eficiência dessa ferramenta foi comprovada em vários estudos, pela utilização de imagens multiespectrais (Novo et al., 2006) e hiperespectrais (Galvão et al., 2003; Rudorff et al., 2006), além de dados espectrais obtidos em campo e laboratório.

O sensoriamento remoto permite estimar a transparência da água, a concentração de sedimentos em suspensão e a quantidade de clorofila, identificar o estado trófico do meio, quantificar e mapear plantas submersas e emersas (Pasterkamp et al., 1999; Novo, 2001). Entretanto, é preciso considerar que o comportamento espectral da água em geral é determinado pela absorção das algas, o espalhamento provocado por moléculas de água nas ondas curtas e o espalhamento de Raman nas ondas intermediárias, além da fluorescência. Nos estudos de ambientes aquáticos continentais essas características somam-se ao retroespalhamento, a absorção em ondas curtas do visível, e ao decréscimo do espalhamento molecular, Raman e da contribuição da fluorescência. Isso torna o estudo de corpos hídricos terrestres mais complexos e cautelosos (Dekker, 1993).

Em um estudo comparando os resultados estimados com uso de sensoriamento remoto e resultados de algoritmos, Melack e Gastil (1994) verificaram que para estimar a quantidade de clorofila é necessária a confirmação por meio de sensores remotos de alta resolução espectral. Por outro lado, Dekker et al. (1991) estimaram a qualidade da água de ambientes aquáticos continentais pelo sistema MSS, sugerindo o uso das faixas entre 600 e 720 nm para estimar a quantidade de detritos orgânicos, algas e matéria dissolvida.

Numa breve abordagem sobre a aplicação do sensoriamento remoto à hidrografia, Garcia (1982) comenta que a quantidade de sedimentos carregados para as represas de hidroelétricas é um fenômeno que pode ser estudado pelo uso de sensoriamento remoto. Dekker et al. (2001) comentam que medidas de matéria em suspensão incluem o peso seco do séston, inclusive a matéria inorgânica, como silte e argila, e matéria orgânica incluindo detritos e algas. A quantidade de sólidos em suspensão determina uma variação positiva na reflexão em todas as faixas, isso está relacionado ao aumento do retroespalhamento.

O aumento da concentração de sólidos em suspensão ocasiona um aumento da reflectância em direção aos comprimentos de onda mais longos. Entre a faixa dos 500 e 700 nm, a reflectância se mantém praticamente constante, apesar de mais elevada. Ainda é verificado um aumento em direção ao infravermelho (Novo, 2001). De acordo com Pereira Filho (1991), a própria granulometria dos sólidos em suspensão pode afetar a reflexão do corpo de água.

Existe uma relação entre a profundidade do disco de Secchi e a concentração de matéria dissolvida e materiais sólidos em suspensão, que pode ser correlacionada com dados de sensoriamento remoto (Dekker, 1993). A profundidade do disco de Secchi depende do coeficiente de atenuação da água. Esse coeficiente pode ser escrito em função das propriedades inerentes da água (Pasterkamp et al., 1999).

A técnica de remoção do contínuo foi proposta por Clark e Roush (1984) e consiste em remover as feições contínuas dos espectros. O contínuo é representado por uma função matemática utilizada para isolar bandas de absorção particulares dos espectros de reflectância além de acentuar as feições (Mutanga; Skidmore, 2003). Em última instância, consiste numa normalização de dados espectrais que permite reduzir os efeitos externos (Van der Meer, 2000; Clark; Roush, 1984)

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de caracterização das propriedades ópticas da água a partir da técnica de remoção do contínuo aplicada sobre os dados espectrais coletados em campo e da classificação de imagens multiespectrais orbitais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de captação do reservatório Rodolfo Costa e Silva é formada pela bacia hidrográfica do rio Ibicuí-Mirim. Está localizado no planalto do Sul-riograndense, onde as características da estrutura basáltica se refletem no tipo de solo avermelhado. A bacia de captação do reservatório possui 4.880 hectares, onde predominam vertentes suaves, representadas por colinas. O uso da terra predominante na bacia é agrícola, apresentando também áreas de campo destinadas à pecuária, e pequenas áreas de vegetação arbórea, especialmente de matas ciliares. A localização do reservatório pode ser vista na Figura 1.

Figura 1. Localização do reservatório de água Rodolfo Costa e Silva.

Os dados de campo foram coletados no dia 16 de maio de 2006, em 21 pontos amostrais, distribuídos geograficamente no reservatório (Figura 2), de forma a cobrir o reservatório de forma relativamente homogênea.

Foram avaliados os seguintes parâmetros limnológicos: transparência da água por meio da profundidade do Disco de Secchi (SD); Total de Sólidos em Suspensão (TSS), segundo metodologia descrita por CETESB (São Paulo, 1987) e; clorofila a, b e c, de acordo com Nush (1980). Os parâmetros radiométricos avaliados foram: espectros de reflectância bidirecional obtidos pelo espectroradiômetro FieldSpec Hand Held no intervalo espectral de 400 a 900 nm e imagens de satélite do CBERS-2 (20-04-2006) e Landsat TM-5 (5-05-2006).

As condições de tempo para a coleta de dados foram adequadas, ou seja, com sol, ausência de vento ou com brisa e com a superfície da água calma ou com pequenas ondulações, sendo o vento um dos fatores mais importantes na degradação das informações

espectrais em coletas de campo (Pereira Filho et al., 2005). Para a redução de ruídos nos dados espectrais coletados em campo, foi aplicado um filtro de média móvel de 11 pontos.

Figura 2. Localização dos 21 pontos amostrais no reservatório.

A correção atmosférica das imagens CBERS-2 CCD foi feita por meio do código 5S (Vermote et al., 1997). As imagens Landsat 5 TM foram corrigidas pelo modelo MODTRAN implementado no Flaash-ENVI (ENVI, 2004). As imagens resultantes foram convertidas para reflectância de superfície. As imagens de reflectância foram classificadas no aplicativo ENVI pelo classificador *IsoData* (ENVI, 2004). O número de classes foi definido para permanecer entre 3 e 5 classes, considerando a mínima variância dos dados de campo previamente avaliada.

A formulação matemática para a remoção do contínuo dos espectros de reflectância é apresentada na Equação 1 (Clark; Rough, 1984; Galvão, 2001; Hong et al., 2004). Cabe destacar que o espectro do contínuo pode ser formulado matematicamente pela equação da reta, definida pelos coeficientes angular e linear.

$$\rho_{CR(\lambda)} = \frac{\rho_{Original}(\lambda)}{\rho_{contínuo}(\lambda)} \quad [1]$$

Em que $\rho_{CR\lambda}$ é o fator de reflectância direcional cônico com o contínuo removido; $\rho_{Original}(\lambda)$ é o fator de reflectância direcional cônico original; $\rho_{contínuo}(\lambda)$ é o espectro do contínuo e λ

representa o comprimento de onda. Para se obter a profundidade de banda P_d , utiliza-se a Equação 2 (Kokaly; Clark, 1999; Noomem et al., 2005).

$$P_d = (1 - \rho_{CR\lambda}) \quad [2]$$

A escolha dos limites das bandas de absorção deve ser feita de modo a ressaltar as feições de absorção. Os limites das bandas de absorção e o comprimento de onda (λ) central escolhidos como referência neste trabalho são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Bandas de absorção e λ , central de cada banda.

Banda de absorção	λ Central	λ Limite inferior	λ Limite superior
1ª banda de absorção	450	400	550
2ª banda de absorção	630	610	640
3ª banda de absorção	630	580	700
4ª banda de absorção	675	650	680

A área das bandas de absorção (A_p) foi calculada pela aproximação numérica dada pela Equação 3. Por fim, a largura das bandas de absorção é dada pela determinação das posições anterior e posterior ao λ de maior profundidade referentes à metade do máximo (Pu et al., 2003).

$$A_p = \sum_{i=m}^M \frac{(\rho_i + \rho_{i-1})}{2} \cdot (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \quad [3]$$

em que i representa o intervalo de cálculo do limite inferior m ao limite superior da banda (M).

Em relação às análises estatísticas, estas foram baseadas no cálculo da média, desvio padrão, variância e correlação de Pearson (5 % de significância).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A forma dos espectros da água fornece indicativos de quais componentes opticamente ativos estão dominando o espectro. A Figura 3 ilustra os espectros de reflectância bidirecional obtidos nos 21 pontos amostrais. Todos eles apresentam maior reflectância bidirecional na faixa espectral referente ao verde, em que a clorofila é o principal componente que influencia no processo de espalhamento (Kirk, 1996).

A baixa variabilidade dos dados e baixa porcentagem de reflectância restringem a análise direta com dados ópticos (reflectância) coletados em campo. Portanto, foi utilizada a técnica de remoção do contínuo para realçar as diferenças em quatro bandas de absorção, especialmente relacionadas à presença de clorofila na água, pois, normalmente, elas são proporcionais a sua concentração (Kirk, 1996).

Apesar dos dados terem sido filtrados, às vezes, os ruídos se sobressaem. Isso sugere que a variabilidade nos espectros dos diferentes pontos pode estar relacionada à precisão das medidas radiométricas e à influência atmosférica. Esse foi o resultado encontrado para a primeira banda de absorção analisada (400-550 nm).

A variabilidade da profundidade da banda de absorção entre 400 e 550 nm no comprimento de onda de 450 nm (tomado como referência para esta banda) foi baixa. A

maior variação foi relacionada ao ponto P-20. Analisando os valores do desvio padrão e da variância, respectivamente de 0,02971 e 0,0004, verifica-se que a separação de diferentes tipos de classes de água a partir de imagens de satélite é bastante prejudicada, visto que as variações não são significativas.

Figura 3. Espectros de reflectância bidirecional coletados em campo.

Considerando variabilidade da área da banda de absorção entre 400 e 550 nm, constatou-se que o ponto P-6 apresenta maior variação em relação à média da área. Novamente a variância e o desvio padrão foram baixos. Entretanto, deve-se considerar que as imagens analisadas neste trabalho não são da mesma data da obtenção dos espectros de reflectância bidirecional, contudo, obtiveram-se as imagens mais próximas possível, considerando a influência de nuvens e a data de passagem dos satélites CBERS-2 e Landsat-5.

A análise da segunda banda de absorção (610-640 nm) mostra que a profundidade de banda não permitiu identificar variações significativas nos espectros (Figura 4). Nessa banda, os pontos amostrais P-3, 4 e 7 apresentaram as menores absorções relacionadas à menor concentração de Clorofila c (Figura 7). A maior profundidade nos pontos P-13 e P-9 indica uma maior presença de clorofila, concordando com os resultados apresentados na Figura 7.

A Figura 5A mostra a variação da profundidade das bandas de absorção em 630 nm (para o intervalo de 610-640 nm). Verifica-se que a variabilidade dos dados é baixa, novamente indicando dificuldade na classificação das imagens de satélite, em especial a banda do vermelho. A Figura 5B, refere-se à subtração da profundidade de cada ponto da profundidade média do conjunto.

O desvio em relação à média dos parâmetros profundidade e área da banda de absorção entre 610-640 nm mostra que os pontos P-3, 4 e 7 se destacam com menores índices de absorção de radiação. Esse resultado mostra que tanto a área quanto a profundidade de banda produzem resultados similares e explica a alta correlação (97%) entre esses dois parâmetros.

Cabe destacar que isso vale para esta banda de absorção. O desvio padrão e a variância para a área de profundidade de banda não foram significativos.

A terceira banda de absorção (650-680 nm) compreende a faixa que sofre forte influência do TSS e, portanto, poderia ser utilizada para estimar variações desse componente opticamente ativo. O comprimento de onda central adotado para esse intervalo foi 675 nm, e o resultado da profundidade de banda mostrou que a menor absorção aconteceu nos pontos amostrais P-4, 7 e 9, indicando maior concentração de TSS.

Figura 4. Remoção do contínuo aplicado à faixa espectral de 610-640 nm.

Por outro lado, os pontos P-10, 11 e 19 mostraram maior profundidade e, conseqüentemente, uma maior penetração da radiação na água e menor reflectância bidirecional. Entretanto, ao correlacionar os dados de profundidade de banda com o TSS (valores de TSS e SD são apresentados na Tabela 2), os resultados indicaram baixa correlação, fato que pode estar associado à baixa variabilidade dos dados, o que os torna mais susceptíveis aos erros de medida. O desvio padrão da profundidade da banda de absorção centrada em 675 nm foi de 0,0068 e sua variância foi de 0,000046, comprovando sua baixa variabilidade. Considerando o parâmetro área, as estatísticas também indicaram pouca variação.

Avaliando a correlação entre os dados da profundidade de banda e área da banda de absorção, verificou-se um coeficiente de 64%, o que indica que os dois parâmetros podem produzir resultados distintos nessa banda e requerem cuidado ao serem utilizados, a fim de evitar erros. Esse fato recai especialmente quando estão sendo estudados corpos hídricos de baixa variabilidade dos componentes opticamente ativos.

Para a última banda de absorção estudada (580-700 nm), os resultados não indicaram grandes variações da reflectância. A análise da profundidade de banda de absorção entre 580 nm e 700 nm, permitiu verificar que não existem variações significativas nos pontos

amostrados. Cabe destacar que os pontos P-17 e P-18, apresentaram as maiores variações. O desvio padrão calculado sobre esse parâmetro foi de 0,016704, e a variância de 0,000279. Esse baixo valor de variância indica a pequena variabilidade dos dados. Ainda considerando a quarta banda de absorção, a área também não apresentou resultados que incrementassem a separabilidade de classes de água no reservatório Rodolfo Costa e Silva.

Figura 5. A) Variação da profundidade da banda de absorção centrada em 630 nm entre o intervalo espectral de 610-640 nm. B) Desvio em relação à profundidade média da banda de absorção centrada em 630 nm no intervalo espectral de 610-640 nm.

Figura 6. A) Variação da área da banda de absorção entre 610-640 nm. B) Desvio em relação à área média da banda de absorção entre 610-640 nm.

O cálculo do coeficiente de correlação entre a profundidade das bandas de absorção com a profundidade do SD e o TSS apresentou resultados não significativos. Isso também foi

encontrado ao correlacionar o TSS e a SD com o parâmetro área da banda de absorção e largura da banda de absorção (Conforme Tabela 3).

Tabela 2. Concentração de TSS e variação da profundidade da SD no reservatório Rodolfo Costa e Silva – RS, no dia 16 de maio de 2006.

<i>Ponto</i>	<i>SD (cm)</i>	<i>TSS (mg/L)</i>	<i>Ponto</i>	<i>SD (cm)</i>	<i>TSS(mg/L)</i>
1	250	1,04	12	255	1,71
2	252	1,34	13	252	2,24
3	246	0,87	14	255	1,47
4	250	1,64	15	250	2,14
5	255	1,44	16	254	1,37
6	258	1,84	17	270	1,47
7	245	1,87	18	281	1,41
8	261	1,07	19	210	2,34
9	260	1,07	20	264	1,57
10	258	1,11	21	240	0,97
11	248	2,27			

A baixa correlação obtida pode ser atribuída à baixa variância dos dados e à incerteza das medidas radiométricas e dos parâmetros opticamente ativos presentes na água. Os melhores coeficientes (0,24) foram encontrados ao correlacionar a profundidade da banda de absorção entre 610-640 nm e TSS e entre a profundidade da banda de absorção entre as bandas 400-550 nm e 400-550 nm com a transparência da água (SD) e, por fim, o valor de 0,34 foi encontrado ao correlacionar a largura da banda de absorção com a transparência da água.

A variabilidade espacial e amplitude da concentração de clorofila no reservatório Rodolfo Costa e Silva podem ser observadas na Figura 7. Ocorre uma baixa amplitude e verifica-se a existência de dois grandes compartimentos, para as clorofilas a, b e c. Um compartimento aquático com menor concentração de clorofila a jusante e com maior concentração a montante do reservatório.

Tabela 3. Valores obtidos da correlação entre parâmetros da aplicação da remoção do contínuo e parâmetros limnológicos.

Bandas espectrais (nm)	Cor. PBA x SD	Cor. PBA x TSS	Cor. ABA x SD	Cor. ABA x TSS	Cor. LBA x SD	Cor. LBA x TSS
580-700	-0,23612	0,07349	-0,04115	-0,07319	0,34326	-0,03305
400-550	-0,24079	-0,08838	0,20400	0,21646	0,18851	-0,04720
610-640	-0,02004	0,24553	-0,07751	0,20242	0,04539	0,01944
650-680	-0,03669	0,019251	-0,02083	0,13420	0,04539	0,01944

ABA = Área da banda de absorção; PBA = Profundidade da banda de absorção.

Figura 7. Distribuição espacial da concentração de clorofila a, b e c no reservatório.

A Figura 8A mostra a classificação da imagem TM, e a Figura 8B, a classificação da imagem CBERS. Em ambas as classificações, os resultados não apresentaram boas correlações com os dados de campo. Isso pode ser atribuído à baixa variação das propriedades opticamente ativas da água e aos erros nos processos de correção das imagens. A aplicação de outras técnicas de análise de imagens multiespectrais pode ser vista em Wachholz et al. (2007), que explora os resultados de uma série temporal maior. Entretanto seus resultados concordam com os obtidos neste trabalho.

Por fim, considerando a dificuldade de discriminação de classes de água em reservatórios que apresentam baixa variabilidade da concentração de componentes opticamente ativos, é apresentada a Figura 9 com os valores e amplitude do TSS e transparência da água. Ao analisar a variabilidade dos pontos e sua respectiva concentração de TSS e transparência da água, verifica-se que não são definidos compartimentos aquáticos.

Figura 8. A) Classificação da imagem Landsat TM 5, do dia 5 de maio de 2006. B) Classificação da imagem CBERS-2 CCD do dia 20 de abril de 2006.

Figura 9. Variação da profundidade do SD e o TSS nos 21 pontos amostrais.

4. CONCLUSÕES

A técnica de análise por remoção do contínuo aplicada sobre os espectros de reflectância coletados em campo ajudou a realçar as variações ou feições produzidas pelos componentes opticamente ativos, entretanto não permitiu definir compartimentos aquáticos. Verificou-se

que existem alguns pontos que se destacaram, entretanto não permitiram definir compartimentos.

Os testes de classificação não supervisionada de imagens multiespectrais orbitais apresentaram resultados pouco aplicáveis no estudo de corpos hídricos de baixa variabilidade dos componentes opticamente ativos (TSS e clorofila), que é o caso do reservatório Rodolfo Costa e Silva, por motivo de limitações de resolução espectral e radiométrica.

No entanto, é necessário continuar testando técnicas para extrair informações mais específicas da reflectância da água por meio de dados hiperespectrais e da qualificação das medidas e correções radiométricas aplicadas aos dados de campo e multiespectrais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro oferecido por meio de bolsa de mestrado e custeio Procad; à Petrobras Ambiental e à CORSAN pelo apoio para a execução deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, St. Louis, v. 89, n. B7, p. 6329-6340, 1984.
- DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 222f. 1993. Doctor Thesis (Hyperspectral remote sensing of water quality) - Vrije Universiteit, Amsterdam, 1993.
- DEKKER, A.G.; MALTUHUS, T. J.; SEYHAN, E. Quantitative modeling of inland water quality for high-resolution MSS system. **IEEE - Transactions on geoscience and remote sensing**, Piscataway, v. 29, n. 1, p. 89-95, 1991.
- ENVI - The Environment for Visualizing Images. Version 4.1 Aug 20, 2004. Boulder: Research Systems, Inc., 2004.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602 p.
- GALVÃO, L. S. Métodos para análise de espectros de reflectância. In: **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora da UNB, 2001. p.225-247. 2001.
- GALVÃO, L. S.; PEREIRA, W.; ABDON, M. M.; NOVO, E.; SILVA, J. S. V.; PONZONI, F.J. Spectral reflectance characterization of shallow lakes from the Brazilian Pantanal wetlands with field and airborne hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 24, n. 21, p. 4093-4112, 2003.
- GARCIA, G. J. **Sensoriamento Remoto: princípios e interpretação de imagens**. São Paulo: Nobel, 1982.
- HONG, T.; TAO, F.; PENGFEI, S. Nonlinear Spectral Similarity measure. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2004, Anchorade. **Proceedings...** [S.l.]: IGARSS, 2004. p. 3272-3275. vol. 5

- BREUNIG, F. M.; WACHHOLZ F.; PEREIRA FILHO, W.; RUDORFF, C. M. Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 88-102, 2007. ([doi:10.4136/ambi-agua.28](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.28))
- JOBIN, W. **Sustainable management for dams and waters**. Boston: Lewis Publishers, 1998. 288 p.
- KIRK, J. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2. ed. Cambridge: University Press, 1996. 509p.
- KOKALY, R. F.; CLARK, R. N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 67, p. 267-287, 1999.
- MELACK, J. M.; GASTIL, M. Comparison of spectral feature algorithms for remote sensing of chlorophyll in eutrophic lakes. GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 8-12 ago 1994. **Proceedings...** [S.l.]: IGARSS, 1994. p. 2363 - 2365. vol.4, 1994.
- MUTANGA, O.; SKIDMORE, A. K. Continuum-removed absorption features estimate tropical savanna grass quality *in situ*. In: EARSSEL WORKSHOP ON IMAGING SPECTROSCOPY, 3., 13-16 may 2003, Herrsching. **Proceedings...** Paris: EARSSEL, 2003.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Committee on Sustainable Agriculture and the Environment in the Humid Tropics. **Sustainable Agriculture and the Environment in the Humid Tropics**. Washington: National Academic Press, 1993.
- _____. Committee on USGS Water Resources Research. **Estimating water use in the United States: a new paradigm for the national water-use information program**. Washington: National Academic Press, 2002.
- NOOMEM, M. F.; MEER, F. D.; SKIDMORE, A. K. Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 31., 20-24 june 2005, Saint Petersburg. **Proceedings...** Saint Petersburg: ISRSE, 2005.
- NORLING, P.; WOOD-BLACK, F.; MASCIANGIOLI, T.M. **Water and sustainable development: opportunities for the chemical sciences: a workshop report to the chemical sciences roundtable**. Washington: National Academic Press, 2004.
- NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org). **Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília: Universidade de Brasília, 2001.
- NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; FREITAS, R. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; MELACK, J. M.; PEREIRA FILHO, W. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Limnology**, [S.l.], v. 7, p. 1-9, 2006.
- NUSH, E. Comparison of different methods for chlorophylla and phaeopigments determination. **Arch. Hydrobiol.**, Stuttgart, v. 14, p. 14-36, 1980.
- PASTERKAMP, R.; DEKKER, A. G.; HOOGENBOOM, H. J.; RIJKEBOER, M.; HAKVOORT, J. H. M The effect of the specific inherent optical properties on assessing water quality in Dutch inland waters using matrix inversion. GEOSCIENCE AND

BREUNIG, F. M.; WACHHOLZ F.; PEREIRA FILHO, W.; RUDORFF, C. M. Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 88-102, 2007. ([doi:10.4136/ambi-agua.28](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.28))

REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 28 june - 2 july, 1999, Hamburgo. **Proceedings...** Hamburgo: IEEE, 1999. p. 2095 - 2097. vol. 4.

PEREIRA FILHO, W. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo da influência das características da bacia de captação na concentração de sólidos em suspensão em reservatório: o exemplo de Tucuruí.** 175 f. 1991. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1991.

PEREIRA FILHO, W.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. Influência das condições do tempo em espectros de reflectância da água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 415-422.

PU, R.; GE, S.; KELLY, N. M.; GONG, P. Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 24, n. 9, p. 1799-1810, 2003.

RUDORFF, C.M.; NOVO, E.M.L.M.; GALVÃO, L.S. Spectral mixture analysis of inland tropical Amazon Floodplain waters using EO-1 Hyperion. In: IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 27., 2006, Denver. **Proceedings...** Denver: IEEE International, 2006.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia de coleta e preservação de amostras de água.** Coord. de Edmundo Garcia Agudo et al. São Paulo: CETESB, 1987.

VAN DER MEER, F. Spectral curve shape matching with a continuum removal CCSM algorithm. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 21, n. 16, p. 3179-3185, 2000.

VERMOTE, E. F.; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S): an overview. **IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens.**, Piscataway, v. 35, n. 3, p. 675-686.

WACHHOLZ, F.; BREUNIG, F. M.; FONSECA, L. M. G.; SARTOR, S. C. B.; PEREIRA FILHO, W. Identificação de compartimentos aquáticos com imagens CBERS-2 CCD, Landsat TM5 e dados de campo no reservatório Rodolfo Costa e Silva-RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3607-3614.