

CENÁRIO FUTURO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA DO ALTO TIETÊ

SCENARIO FUTURE OF WATER AVAILABILITY IN THE UPPER TIETÊ RIVER BASIN

Maíra Cristina de Oliveira Silva

Gestora Ambiental pela
Universidade de São Paulo (USP).
Mestre em Ciência e Tecnologia
Ambiental pela Universidade
Federal do ABC (UFABC) – Santo
André (SP), Brasil.

María Cleofé Valverde

Professora do Curso de Engenharia
Ambiental e Urbana no Centro de
Engenharia, Modelagem e Ciências
Sociais Aplicadas (CECS) da UFABC –
Santo André (SP), Brasil.

Endereço para correspondência:

Maíra Cristina de Oliveira Silva –
Universidade Federal do ABC – Rua
Santa Adélia, 166 – Bangu –
09210-170 – Santo André (SP), Brasil –
E-mail: maira.maidi@gmail.com

Recebido: 06/09/2016

Aceito: 03/02/2017

RESUMO

Este estudo objetivou analisar o comportamento futuro (*near-future*, de 2017 a 2039) da chuva e da vazão na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT). Para isso, empregou-se o modelo climático global *Meteorological Research Institute-Japanese Meteorological Agency* (MRI-JMA) para o cenário de emissões A2, pertencente ao Quarto Relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC-AR4). Também foram utilizadas séries históricas com dados fluviométricos, pluviométricos e de temperatura do ar oriundos, principalmente, da Agência Nacional de Águas (ANA). A fim de estimar a vazão futura, foi estabelecida uma relação empírica baseada na equação hidrológica simplificada. Os resultados das projeções indicam que a BHAT poderá ter um acréscimo na precipitação (5,9 mm) e na temperatura (0,86°C) médias mensais em relação à climatologia. Para a vazão futura, projeta-se elevação durante a primavera (19,6%) e o verão (13,7%), e decréscimo no inverno (-9%) e no outono (-7%). Apesar das incertezas inerentes às projeções climáticas, é fundamental gerenciar os recursos hídricos da bacia visando a uma provável ampliação da variabilidade sazonal.

Palavras-chave: projeções climáticas; disponibilidade hídrica; gestão de recursos hídricos; Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.

ABSTRACT

This study aims to analyze the future behavior (*near-future*, of 2017–2039) of rainfall and streamflow in the Upper Tietê River Basin (BHAT). For this, the global climate model *Meteorological Research Institute-Japanese Meteorological Agency* (MRI-JMA) was used, for the emissions scenario A2, belonging to the Fourth Assessment Report of the *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC-AR4). Also was used observed database of streamflow, rainfall and air temperature obtained from the National Water Agency. In order to estimate the future streamflow was established an empirical relation based on the simplified hydrological equation. Projections results indicate that BHAT may have an increase in precipitation (5.9 mm) and temperature (0.86°C) monthly average in relation to climatology. For future streamflow is projected a rise in the spring (19.6%) and summer (13.7%) and decrease in the winter (-9%) and fall (-7%). Despite the uncertainties of projections is essential to manage water resources of the basin targeting a probable broadening of seasonal variability.

Keywords: climate projections; water availability; water resources management; Upper Tietê River Basin.

INTRODUÇÃO

Considerando-se que a disponibilidade de água depende, em grande parte, do clima, é previsto que o Brasil sofra importantes alterações com as mudanças climáticas (MARENGO, 2008). Entende-se por mudanças climáticas as alterações estatisticamente significativas em um ou mais parâmetros climáticos (como temperatura, precipitação ou ventos) ou na variabilidade, durante um extenso período, em que esses fenômenos ocorrerem. Essas alterações são ocasionadas por processos naturais do próprio planeta ou por forçantes externas, incluindo variações na intensidade da radiação solar, ou, ainda, pela ação antrópica (IPCC, 2007).

Segundo Marengo (2007), um clima mais quente implicará mudanças importantes no regime de precipitação, interferindo no ciclo hidrológico e nos recursos aquíferos. Pequenas variações no regime de chuvas devido à variabilidade de fenômenos naturais ou às mudanças climáticas podem ocasionar significativas alterações nas vazões da bacia hidrográfica, produzindo transformações no ambiente da bacia, o que resulta em modificações no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica (TUCCI & MENDES, 2006). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2013), as conseqüências das mudanças climáticas no ciclo hidrológico não serão uniformes, acentuando o contraste de precipitação entre as estações e as regiões secas e úmidas. As incertezas sobre o comportamento futuro do clima são expressivas no que se refere ao que ocorrerá com esse ciclo (MARENGO & ALVES, 2015).

Nessa perspectiva, o conhecimento, em diferentes escalas de tempo e espaço, sobre os padrões predominantes de precipitação e temperatura (incluindo suas modificações) é extremamente pertinente para o planejamento dos recursos hídricos e ambientais. Assim, tornou-se crescente o desenvolvimento de pesquisas que objetivam entender as mudanças climáticas, identificar e avaliar seus possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos, assim como auxiliar na elaboração de medidas de mitigação e adaptação que minimizem as conseqüências adversas (MARENGO, 2008).

O Rio Tietê e seus afluentes, considerados recursos hídricos importantes do Estado de São Paulo, poderão ter seu regime influenciado pelas alterações climáticas. O Rio Tietê tem sua nascente na Bacia Hidrográ-

fica do Alto Tietê (BHAT), região mais povoada e com maior demanda de água do Estado. A BHAT localiza-se na região sudeste do Estado de São Paulo e engloba importantes cidades, abrigando uma população de aproximadamente 20 milhões de habitantes, uma das maiores densidades demográficas do Brasil. A demanda por recursos hídricos na bacia é de aproximadamente o dobro de sua disponibilidade, tornando-a a região mais crítica do Estado (FUSP, 2009).

Recentemente, a BHAT sofreu uma das maiores crises de abastecimento hídrico da história. As vazões médias observadas nos primeiros meses do primeiro semestre de 2014 foram inferiores às mínimas já registradas desde 1930 (ANA, 2014). O volume de água retido nos reservatórios do Sistema Cantareira, que abastece aproximadamente 10 milhões de habitantes da BHAT, chegaram a 12,8%, enquanto o volume de água retido em todos os reservatórios do Alto Tietê foi de 7,2%, com um volume de todo o sistema (morto e útil) de 28,19 hm³ (REIS, 2014). Em junho de 2015, o Sistema Cantareira teve uma vazão de 13,64 m³/s, o que representa apenas 44% da vazão média histórica e mais do que o dobro da média registrada em junho de 2014, de 6,62 m³/s (ANA, 2015).

De acordo com a ANA (ANA, 2014), entre os meses de outubro de 2013 e março de 2014, observaram-se vazões naturais afluentes excepcionalmente baixas para a época, o que colaborou para que os reservatórios não alcançassem o volume de água aguardado. Segundo Coelho, Cardoso e Firpo (2015), durante o verão de 2013/2014 o Estado de São Paulo recebeu somente 47,8% da chuva esperada pela climatologia, e em 2014 choveu apenas 25% da média acumulada anual da região, o que representa um déficit expressivo de precipitação. Outro fator que contribuiu para a estiagem na região foi o aumento de temperatura. De acordo com Marengo e Alves (2015), a região Sudeste registrou, em 2014, temperaturas 2,5°C acima da média histórica de 1961-1990, e 2015 foi o ano mais quente já registrado desde 1850.

Além da baixa precipitação registrada nesses últimos anos, a região metropolitana de São Paulo (RMSP) sofre constantemente com escassez hídrica. Isso ocorre porque o território está localizado em uma cabeceira e é o maior aglomerado urbano do País, o que torna a

procura por água muito superior à sua disponibilidade. Outro agravante é o aumento da demanda de água nas bacias hidrográficas vizinhas, reflexo do crescimento populacional e econômico do Estado de São Paulo (SORIANO *et al.*, 2016)

Estudos sobre prováveis cenários futuros de alterações nos padrões climáticos locais em bacias são fundamentais para verificar e compreender o comportamento desses sistemas com o passar do tempo, pois permitem estimar as demandas de água no futuro, melhorar as estratégias de adequação do uso múltiplo do recurso e definir políticas ambientais (MESCHIATTI *et al.*, 2012).

Pesquisas recentes desenvolvidas por Silveira *et al.* (2013a; 2013b) e Hamada *et al.* (2012) sobre o desempenho das simulações de diferentes modelos climáticos globais nas regiões sudeste, nordeste setentrional e da Bacia do Prata destacam o modelo climático global *Meteorological Research Institute-Japanese Meteorological Agency* (MRI-JMA) como um dos melhores instrumentos globais, pois suas saídas apresentam

elevada correlação com a precipitação observada nas regiões de estudo e são capazes de capturar os padrões de variação sazonal e interanual.

Assim, realizar um trabalho que utilize saídas do modelo climático MRI-JMA com projeções futuras, gerando cenários que proporcionem informações hidroclimatológicas da BHAT, é de suma importância, visto que contribuirá para estabelecer panoramas futuros de possíveis comportamentos da dinâmica da bacia e identificar os prováveis impactos negativos das mudanças climáticas nos reservatórios da BHAT e de bacias adjacentes. Além disso, poderá coadjuvar o planejamento ambiental na região, contribuindo para os usos múltiplos da água e integrando estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Desse modo, tendo como base as projeções do modelo climático MRI-JMA, o presente trabalho objetivou analisar o comportamento futuro da vazão e das chuvas na Bacia do Alto Tietê, fornecendo subsídio para a gestão dos recursos hídricos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A Bacia do Alto Tietê é formada por 34 municípios, possui uma área de drenagem de 5.868 km² e tem uma população de aproximadamente 20 milhões de habitantes, com densidade demográfica média de 10.232 hab/km². Fazem parte da BHAT as cidades de São Paulo, Guarulhos, Osasco, todas as municipalidades da Região do Grande ABC, Barueri, Carapicuíba, Cotia, Suzano, Poá, Santana de Parnaíba, Biritiba Mirim, Pirapora do Bom Jesus, Jandira, Itaquaquecetuba, Mogi das Cruzes, Salesópolis e Paraibuna (FUSP, 2009; HIRATA & FERREIRA, 2001).

Tratamento e análise dos dados observados

Para uma boa representação climatológica da bacia, foi obtido um conjunto de dados hidrometeorológicos mensais, abrangendo o período de 1979 a 2003, das estações fluviométricas e pluviométricas (Figura 1). O levantamento dos dados foi realizado por meio de inventários disponibilizados pela ANA, pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), pelo Instituto Nacional Meteorológico (INMET), pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico

A BHAT tem uma precipitação total média de 1.400 mm/ano. Sua nascente é no Rio Paraitinga, em Salesópolis, e seu talvegue se estende até a Barragem de Rasgão, no Reservatório de Pirapora. Os principais afluentes na margem direita são os Rios Baquirivuguaçu, Cabucu de Cima, Juqueri e Paraitinga, e na margem esquerda, os Rios Aricanduva, Biritiba-Mirim, Cotia, Pinheiros, São João do Barueri e Tamanduaté (FUSP, 2009).

(ONS) e pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Também foram utilizados dados de temperatura do ar mensal, para o mesmo período, oriundos do INMET, do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO), da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP).

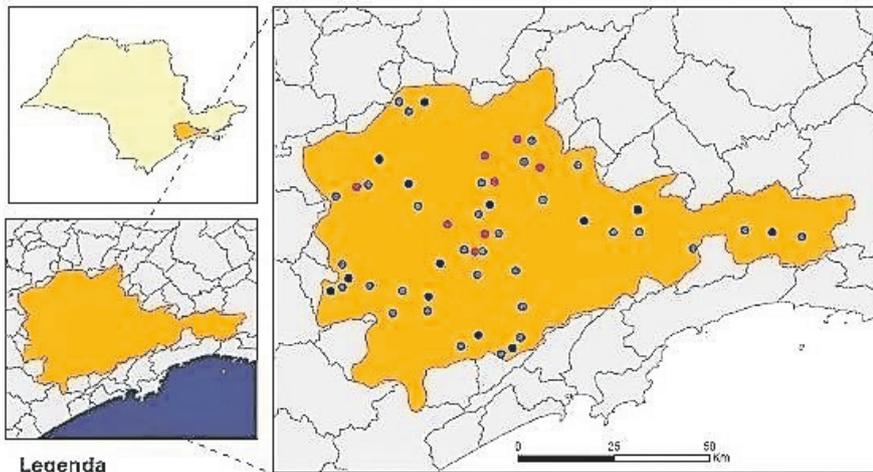
Esses dados foram padronizados e as informações faltantes das séries históricas de um mesmo município foram estimadas com a técnica de regressão linear múltipla, em que estações com falhas ficaram classificadas

como variável dependente, e estabeleceu-se uma relação com as variáveis independentes (séries completas) que possuíam coeficiente de correlação igual ou superior a 0,80 (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Modelo climático global Meteorological Research Institute-Japanese Meteorological Agency

O modelo MRI-JMA foi desenvolvido pelo Instituto Meteorológico do Japão para fazer parte do conjunto de modelos climáticos globais acoplados utilizados nos relatórios do IPCC para geração de projeções futuras

(IPCC, 2013). O modelo possui uma resolução espacial de grade de 20 km horizontal, com 959 ondas de truncamento triangular e 60 camadas verticais, com topo em 0.1 hPa. Atualmente, essa é a resolução mais alta de



Legenda

- Bacia Alto Tietê
- Postos Pluviométricos
- Postos Fluviométricos
- Temperatura

Sistemas de Coordenadas Geográficas
Datum> South America, 1964
Fonte: ANAMIBGE
Órgão: UFABC
Elaborado por: Maira Cristina Oliveira, 2016

Localização dos postos pluviométricos

Município	Fonte	Código	Lat	Lon	
Biritiba Mirim	ANA	2346101	23°34'	46°02'	
Cotia	DAEE	E3-034	23°39'	46°57'	
	DAEE	E3-027	23°43'	46°58'	
Franco da Rocha	DAEE	E3-047	23°20'	46°41'	
	ANA	2346098	23°19'	46°43'	
Guarulhos	INMET	83075	23°43'	46°46'	
	DAEE	E3-002	23°25'	46°24'	
Itapeçerica da Serra	DAEE	E3-068	23°46'	46°50'	
	DAEE	E3-014	23°47'	46°55'	
	DAEE	E3-016	23°43'	46°51'	
Itapevi	DAEE	E3-263	23°32'	46°59'	
Itaquaquecetuba	DAEE	E3-091	23°29'	46°22'	
Mauá	DAEE	E3-237	23°42'	46°29'	
	ANA	2346103	23°35'	46°15'	
Mogi das Cruzes	DAEE	E3-097	23°31'	46°12'	
	DAEE	E2-112	23°34'	45°58'	
Salesópolis	DAEE	E2-131	23°34'	45°50'	
	DAEE	E3-020	23°27'	46°55'	
Santo André	DAEE	E3-159	23°38'	46°32'	
	DAEE	E3-085	23°37'	46°33'	
São Caetano do Sul	DAEE	E3-022	23°38'	46°35'	
	DAEE	E3-142	23°45'	46°32'	
São Bernardo do Campo	DAEE	E3-244	23°41'	46°35'	
	DAEE	E3-150	23°40'	46°34'	
	DAEE	E3-033	23°28'	46°43'	
São Paulo	DAEE	E3-006	23°39'	46°42'	
	DAEE	E3-090	23°35'	46°39'	
	DAEE	E3-035	23°39'	46°38'	
	DAEE	E3-052	23°38'	46°39'	
	ANA	2346100	23°38'	46°28'	
	DAEE	E3-243	23°50'	46°44'	
	CACHOEIRA DA GRAÇA	SABESP	PEDRO BEICHT		

Localização dos postos de temperatura do ar

Município	Fonte	Código	Lat	Lon
Barueri	INMET	86908	23°52'	46°87'
Guarulhos	AGRITEMPO	--	23°43'	46°47'
	INMET	83075	23°43'	46°46'
São Caetano do Sul	CETESB	86	23°37'	46°33'
São Paulo	AGRITEMPO	--	23°50'	46°62'
	IAG	E3-035	23°39'	46°38'
	INMET	83781	23°5'	46°61'
	AGRITEMPO	PARQUE ESTADUAL ALBERTO LOFRIGREN	23°45'	46°63'

Localização dos postos pluviométricos

Município	Fonte	Código
Cotia	SABESP	CACHOEIRA DA GRAÇA
	SABESP	PEDRO BEICHT
Franco da Rocha	CETESB	JQUU00900
Mogi Das Cruzes	DAEE	E3-16
	DAEE	E3-08
Salesópolis	ONS	160
Santana de Parnaíba	ONS	190
	ONS	161
	ONS	116
São Bernardo do Campo	ONS	118
	ONS	104
	ONS	109
São Paulo	ONS	117
	ONS	117

Figura 1 – Mapa e tabela com a localização dos postos pluviométricos, pluviométricos e postos de amostragens com séries históricas de temperatura média do ar.

um modelo climático global atmosférico de alta resolução (AGCM) usado em experimentos de aquecimento global (ALVES & PESQUERO, 2009; MIZUTA *et al.*, 2006).

Devido à alta resolução do MRI-JMA do Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC, optou-se por não usar a sua versão mais recente, adotada pelo Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC, visto que este último possui uma resolução de 1,8° x 2,8°, aproximadamente 198 km x 308 km (PINHEIRO *et al.*, 2014), o que para a escala espacial da BHAT não seria uma simulação adequada.

Neste trabalho foram utilizadas, para o cenário de emissões A2, as variáveis de precipitação e temperatura do ar, na escala mensal, para os períodos de 1979 a 2003 (presente) e de 2017 a 2039 (cenário futuro). Tal cenário é intermediário entre os painéis existentes, sendo o B1 o mais otimista e o A1F1 o mais pessimista. Esse cenário

projeta um mundo com fortalecimento de identidades culturais regionais e baixos níveis de desenvolvimento econômico, associados ao lento desenvolvimento tecnológico e ao elevado crescimento populacional, resultando em concentrações de CO₂ crescentes até 2050 (IPCC, 2000). A escolha deve-se ao fato de que a utilização de um cenário com maior anomalia climática contribuirá para subsidiar ações de adaptação e mitigação de caráter preventivo, além de ser a única rodada do modelo disponível em alta resolução.

A Figura 2 ilustra a resolução espacial do modelo na área da BHAT em imagem processada com o auxílio do *software Grid Analysis and Display System (GrADS)*. Cada ponto representa o centro da grade de resolução do modelo. Para determinar a precipitação e a temperatura do ar na BHAT, trabalhou-se com as médias mensais de todos os pontos de grade do modelo inseridos na bacia.

Avaliação e correção das saídas do modelo climático Meteorological Research Institute-Japanese Meteorological Agency

Examinar e avaliar o período presente das variáveis chuva e temperatura do modelo é de suma impor-

tância, pois ajuda a compreender a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento hidroclima-

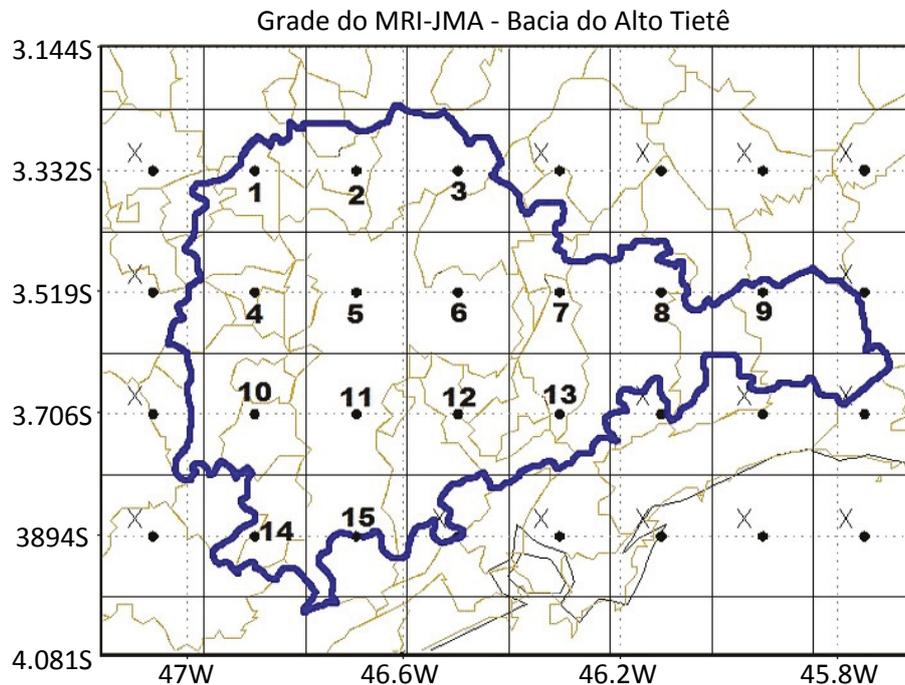


Figura 2 – Grade do modelo climático *Meteorological Research Institute-Japanese Meteorological Agency* na área da Bacia do Alto Tietê.

tológico da bacia estudada e determinar o seu grau de incerteza (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015). Essa validação foi realizada, no período presente (1979 a 2003), para as variáveis climáticas precipitação e temperatura, que foram comparadas com os dados observados, na escala de tempo mensal, por meio da métrica de erro médio (BIAS). O desempenho do modelo climático pode ser avaliado em relação às observações históricas, e para ter confiança nas projeções futuras de tal modelo, seu clima histórico deve ser bem simulado (FLATO *et al.*, 2013). Assim, as análises dos erros associados às saídas do modelo climático para o período presente indicaram a destreza do modelo climático MRI-JMA em representar o padrão climático sazonal da BHAT.

Para remover as diferenças entre os dados observados e as saídas do modelo, é fundamental testar alguns métodos de correção (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015). Neste trabalho foram testados três métodos de correção, e as técnicas consistiram em utilizar, no período presente, os dados observados e as saídas obtidas pelo modelo climático MRI-JMA para as variáveis climáticas precipitação e temperatura. Para isso, as séries históricas e os dados simulados pelo modelo MRI-JMA foram divididos em dois períodos: de controle (1979 a 1991) e de avaliação (1992 a 2003).

A primeira técnica empregada para a correção foi a remoção do erro médio mensal (Equação 1), em que a variável climática corrigida é representada pela diferença entre as condições climáticas previstas e as observadas no período de controle.

$$K^C_{(1992-2003)} = K^M_{(1992-2003)} - (K^N_{(1979-1991)} - K^J_{(1979-1991)}) \quad (1)$$

Em que:

K^C é a variável climática mensal do modelo corrigida para o período de avaliação;

K^M é a variável climática mensal do modelo MRI-JMA para o período de avaliação;

K^N corresponde à média mensal da variável climática do modelo no período de controle; e

K^J representa a média mensal observada da variável climática para o período de controle.

A segunda técnica testada para correção foi a aplicação direta (*Direct Approach*), utilizada por Lenderink, Buishand e Deursen (2007) e Oliveira, Pedrollo e Castro (2015). Nesse método (Equação 2), o comportamento pósterio da variável climática é obtido diretamente da simulação do modelo climático global MRI-JMA, promovendo variações na magnitude de acordo com as diferenças verificadas no passado entre a variável climática do modelo MRI-JMA e a observada na bacia.

O terceiro método testado foi o *Delta Change Approach* (Equação 3), adotado por Graham (2000), Lenderink, Buishand e Deursen (2007) e Oliveira, Pedrollo e Castro (2015). Nessa técnica, assume-se que o mesmo padrão das variáveis climáticas observado no passado estará presente no futuro. As alterações vindouras na magnitude das variáveis climáticas serão estabelecidas em função da razão entre as médias mensais simuladas pelo modelo MRI-JMA em dois períodos: de avaliação e de controle.

$$K^{FC}_{(1992-2003)} = K^F_{(1992-2003)} \times \left(\frac{K^O_{(1979-1991)}}{K^C_{(1979-1991)}} \right) \quad (2)$$

$$K^{FC}_{(1992-2003)} = K^O_{(1979-2003)} \times \left(\frac{K^F_{(1992-2003)}}{K^C_{(1979-1991)}} \right) \quad (3)$$

Em que:

K^{FC} é o valor corrigido da variável climática no período de avaliação para um determinado mês;

K^O é a variável climática média mensal observada para o período de controle;

K^F é o valor sem correção da variável climática no período de avaliação para um determinado mês; e

K^C é a variável climática média mensal do modelo no período de controle.

Posteriormente, os dados corrigidos simulados pelo modelo MRI-JMA para a Bacia do Alto Tietê, no período de avaliação (1992 a 2003), foram analisados com as métricas de erro. Desse modo, foram identificadas as séries corrigidas das variáveis climáticas precipitação e temperatura no período de avaliação que mais se assemelharam com as variáveis climáticas observadas, possibilitando reconhecer qual é o método de correção mais eficaz.

Na avaliação das projeções para o período futuro (2017 a 2039), a fim de identificar se a projeção futura indica aumento ou diminuição das variáveis climáticas em relação ao clima simulado pelo modelo no presente, utilizou-se a métrica de anomalia (Equação 4) para os dados mensais de precipitação e temperatura.

$$ANOMALIA = \frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} (K_F - K_{Mc}) \quad (4)$$

Em que:

K_F é o valor mensal simulado pelo modelo no período futuro;

K_{Mc} corresponde ao valor mensal estimado pelo modelo para o período presente (1979 a 2003); e

M_{total} representa o número de observações.

Em seguida, foi realizada a correção dos valores de precipitação e temperatura do ar para o período futuro

Determinação da vazão

Como o modelo climático MRI-JMA não simula a variável vazão, para determiná-la para o cenário futuro foi necessário construir um modelo empírico para sua estimativa com base nos dados observados de precipitação, vazão e temperatura. O modelo empírico foi construído com alicerce na equação do balanço hídrico global. Parte-se da hipótese de que a soma dos processos de entradas e saídas de água em uma bacia corresponde ao seu balanço hídrico, podendo ser expressa quantitativamente sob a forma de uma relação matemática, denominada “equação do balanço hídrico” ou “equação hidrológica” (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Considerando todas as variáveis envolvidas no balanço hidrológico de uma bacia hidrográfica para um determinado período de tempo, a equação hidrológica global será:

$$P = ETP + Q + \Delta s \pm L + U \quad (5)$$

Em que:

P é a precipitação total;

ETP representa a evapotranspiração potencial;

Δs é variação do armazenamento da água do solo;

Q corresponde ao deflúvio;

(2017 a 2039). A técnica de correção adotada foi a mesma optada para o período presente, visto que tal método conseguiu apresentar o menor erro em relação à temperatura e à chuva observadas na região.

A correção das projeções futuras busca minimizar as incertezas dos erros sistemáticos encontrados no clima atual que também são projetados para o futuro, procurando eliminar o erro associado à modelagem climática. Entretanto, as correções nas variáveis climáticas implicam simplificações consideráveis, pois, ao considerar como dados as variações médias sazonais das séries observadas, assume-se que as mesmas anomalias registradas no passado serão observadas no futuro (Lenderink; BUIHAND; DEURSEN, 2007). Outro fator importante a ser considerado é que os erros sistemáticos não se relacionam com as incertezas derivadas da quantidade de concentrações de gases de efeito estufa que os cenários de emissões — neste caso, o cenário A2 — projetam para o futuro.

L representa o vazamento de água no freático; e

U é o vazamento de água que flui por fora do leito.

Em uma bacia hidrográfica ideal, na qual todos os fluxos positivos e negativos são iguais a zero, ou seja, a diferença entre as entradas e saídas na bacia é nula, não ocorrem perdas por percolação profunda ou vazamentos (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Em estudos hidrológicos em longo prazo, o balanço hídrico considera os processos hidrológicos sob a forma de totais mensais; assim, processos que se desenvolvem em intervalos curtos não têm influência direta no balanço hídrico (LIMA, 1986). Desse modo, as variáveis hidrológicas de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial são processos dominantes para o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica. Portanto, a equação de balanço hídrico global simplificado pode ser expressa por:

$$Q_{(mês)} = P_{(mês)} - ETP_{(mês)} \quad (6)$$

A aplicação da equação geral de balanço hídrico está condicionada à complexidade do estudo de uma bacia e alguns modelos matemáticos simples são im-

portantes ferramentas para os estudos hidrológicos, pois permitem estabelecer uma relação entre as variáveis evapotranspiração, precipitação e vazão. Entre eles estão os modelos empíricos de hidrologia, que se baseiam em equações matemáticas estabelecidas a partir da relação de parâmetros físicos de dados observados das variáveis hidroclimatológicas (VILLELA & MATTOS, 1975).

Tendo como base a Equação 6, procedeu-se à construção de um modelo empírico com base em coeficientes que relacionam as variáveis precipitação (P), evapotranspiração potencial e vazão. Para isso, fez-se uso dos dados da precipitação e da evapotranspiração potencial médias mensais da área da bacia e dos valores de vazão afluente do exutório. Assim, foram construídos coeficientes que relacionam as variáveis precipitação e evapotranspiração potencial (Equação 7) com as variáveis vazão e evapotranspiração potencial (Equação 8), em escala de tempo mensal dos dados observados, conforme explicado nas equações seguintes:

$$Coef_{1(MÉS)} = \frac{P_{(MÉS)}}{ETP_{(MÉS)}} \quad (7)$$

$$Coef_{2(MÉS)} = \frac{Q_{(MÉS)}}{ETP_{(MÉS)}} \quad (8)$$

Estabelecidos os coeficientes, procedeu-se à determinação da equação empírica para estimar a vazão. Para isso, foram construídos gráficos de dispersão entre os coeficientes que relacionam os termos do balanço hídrico, ou seja, entre os fenômenos hidrológicos explicativos (precipitação e evapotranspiração) com o fenômeno hidrológico que se deseja explicar (vazão). No eixo X do gráfico é plotado o coeficiente que representa a variável hidrológica independente (precipitação e evapotranspiração), e no eixo Y deve ser registrado o coeficiente que representa a variável dependente (vazão).

Com a construção dos gráficos de dispersão entre os coeficientes, foram estipuladas diferentes linhas e curvas de ajuste entre os coeficientes. O critério para selecionar a equação foi a apresentação do melhor

ajuste, ou seja, os maiores valores do coeficiente de determinação (r^2) e do coeficiente de correlação (r). O r^2 é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico que demonstra a proporção da variação total dos dados em torno da média (NAGHETTINI & PINTO, 2007). Ele é explicado pela relação entre a soma dos quadrados devidos à regressão (variância explicada) e a soma total dos quadrados (variância total) (Equação 13):

$$r^2 = \frac{\text{Variância Explicada}}{\text{Variância Total}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

Em que:

\hat{y}_i é o valor estimado da variável dependente;

y_i representa o valor observado da variável dependente; e

\bar{y} corresponde à média da variável dependente.

O r^2 varia entre 0 e 1, indicando como o modelo estatístico consegue explicar os valores observados, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste. O r é igual à raiz quadrada do r^2 .

A fim de verificar a significância estatística das equações de ajuste, aplicou-se o teste F, medição utilizada para estabelecer se há uma relação funcional relevante entre a variável resposta e as variáveis independentes, ou seja, indicativo se a equação é significativa. A significância estatística deve ser estabelecida antes do uso da equação de ajuste para prever fenômenos futuros e seu valor pode ser definido matematicamente pela Equação 10 (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

$$F = \frac{r^2/k - 1}{1 - r^2/n - k} \quad (10)$$

Em que:

r^2 representa o coeficiente de determinação;

n é tamanho amostral; e

k é o número de regressores.

Assim, após construída a relação empírica para o cálculo da vazão, tal técnica foi aplicada para a obtenção da vazão no período futuro (2017 a 2039), a partir dos dados de precipitação do modelo MRI-JMA corrigido

para a época futura (2017 a 2039); a evapotranspiração potencial futura foi estimada por meio dos dados de

Estimativa da evapotranspiração potencial

A evapotranspiração potencial, necessária para a construção dos coeficientes, corresponde à transformação da água de estado líquido para gasoso, obtido em condições padronizadas de cultivo, e foi calculada pelo método de Thornthwaite (1948). Esse método é o mais difundido mundialmente, pois se baseia apenas na variável dependente temperatura (TUCCI & MENDES, 2006), e é expresso pelas seguintes equações:

$$ETP = Fc \cdot 16 \cdot \left(\frac{10T}{I}\right)^A \quad (11)$$

$$\text{Em que: } I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (12)$$

temperatura média do ar corrigidos oriundos do modelo MRI-JMA para a mesma época.

$$A = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7292 \cdot 10^{-2} + 0,49239 \quad (13)$$

Em que:

T representa a temperatura média mensal de um determinado mês;

I é o índice anual de calor;

A é o expoente de função do índice anual; e

Fc é o fator de correção em função da latitude e do mês, valor predefinido em função da área de estudo e que, no caso da BHAT, corresponde à latitude de 23°S (TUCCI & BELTRAME, 2001).

Com os valores mensais de temperatura observada e de temperatura do modelo climático para os períodos presente e futuro, foram estabelecidos os valores de evapotranspiração potencial da BHAT.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para encontrar a equação empírica para o cálculo da vazão, foram construídos gráficos de dispersão com base nos coeficientes da equação hidrológica. Com isso, foram testadas diferentes linhas de ajuste com as suas respectivas equações: lineares (equação linear) e não lineares (equação potencial, exponencial, logarítmica e polinomial de segunda, terceira e quarta ordem). Assim, por meio da análise das linhas de ajuste, que representam modelos de regressão, e em função dos valores de r^2 e de r , avaliou-se a qualidade do ajuste dos coeficientes do balanço hídrico para cada equação. A Figura 3A mostra as linhas de ajuste para a dispersão dos coeficientes da Bacia do Alto Tietê, nas quais a equação deve estimar a vazão do exutório.

Tem-se que a equação polinomial de quarta ordem apresentou o melhor ajuste entre os coeficientes do balanço hídrico, com r^2 de 0,735 e r de 0,86, ou seja, aproximadamente 74% das variações da vazão na BHAT podem ser explicadas por variações na precipitação e na evapotranspiração potencial, sendo que esses coeficientes estão 86% correlacionados entre si. Dessa forma, a equação empírica para o cálculo da vazão no

exutório da Bacia do Alto Tietê foi representada pela seguinte expressão (Equação 14):

$$y = 0,0103x^4 - 0,0859x^3 + 0,289x^2 - 0,1406x + 0,4994 \quad (14)$$

Substituindo os valores de Y e X , têm-se:

$$Q = \left(\frac{0,0103P^4}{ETP^4} - \frac{0,0859P^3}{ETP^3} + \frac{0,289P^2}{ETP^2} - \frac{0,1406P}{ETP} + 0,4994 \right) \times ETP \quad (15)$$

De acordo com o teste F , a equação de ajuste (Equação 15) foi estatisticamente significativa, por apresentar o valor de 1,10, considerando-se o valor de F crítico de 1,28.

A fim de verificar a capacidade da equação empírica de representar a vazão mensal do exutório da BHAT, as vazões médias mensais foram reconstruídas com a equação empírica e comparadas com os dados obser-

vados para o período de 1979 a 2003. Observa-se que a equação empírica conseguiu reconstruir os valores da vazão mensal (Figura 3B), apesar das dificuldades em representar alguns meses muito chuvosos, como feve-

reiro de 1995 e março de 1996. Isso reflete no padrão mensal, que captura a sazonalidade da vazão, embora superestime a vazão durante a primavera e o verão e a subestime no outono e no inverno (Figura 3C).

Simulação do clima presente e projeções futuras do modelo climático Meteorological Research Institute-Japanese Meteorological Agency

Os resultados das análises do modelo climático MRI-JMA para o período presente (1979 a 2003) mostraram que a simulação do modelo conseguiu capturar a sazo-

nalidade da vazão observada, mostrando ser capaz de representar os padrões de variação sazonal da BHAT, o que indica menores incertezas na simulação das proje-

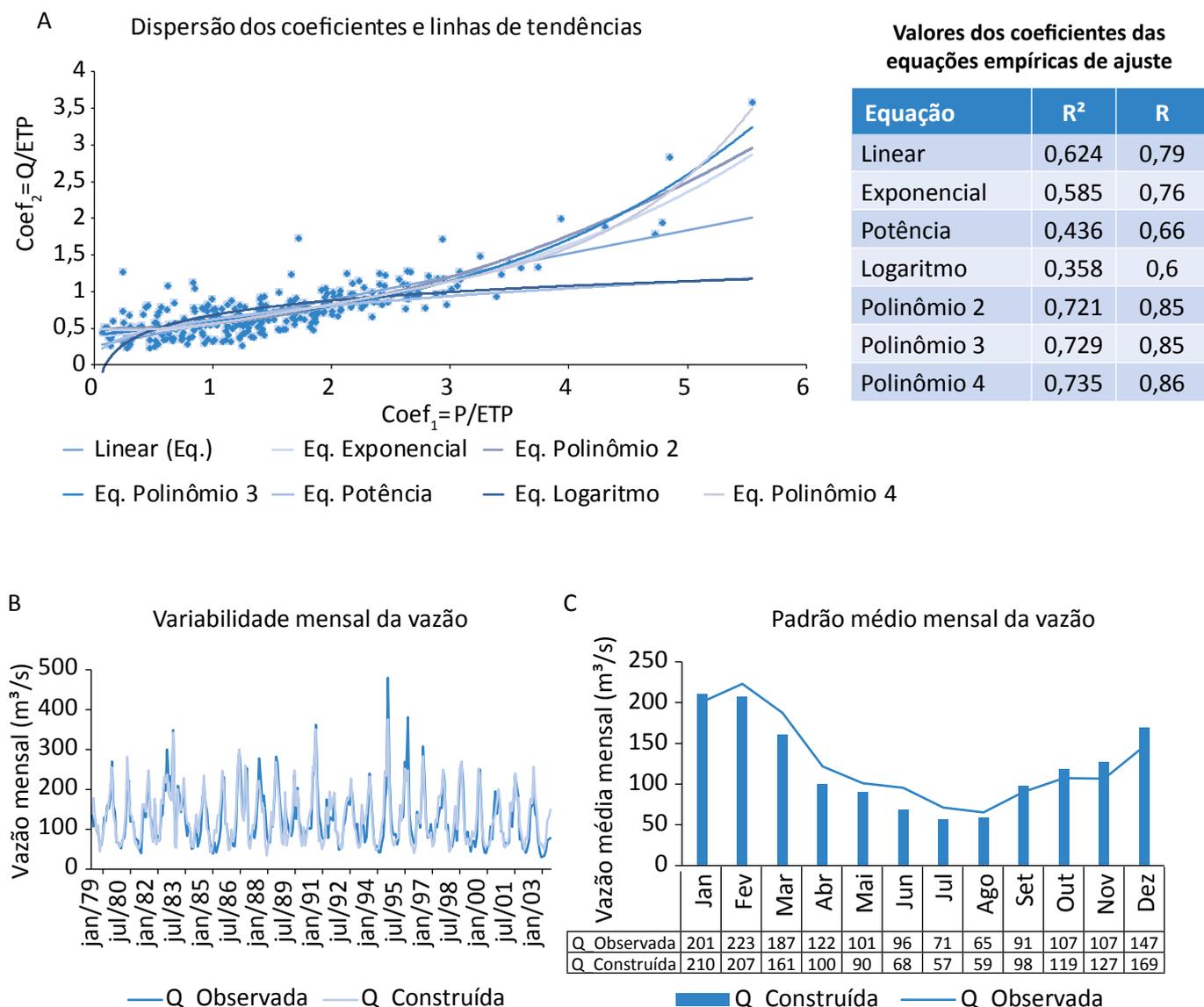


Figura 3 – Gráficos de dispersão dos coeficientes do balanço hidrológico e linhas de tendências (A), variabilidade mensal da vazão (B) e padrão médio mensal da vazão reconstruída com a equação empírica de ajuste para estimativa da vazão (C), na Bacia do Alto Tietê, para o período de 1979 a 2003. E tabela com os valores do coeficiente de determinação (r²) e de correlação (r) das equações empíricas de ajuste.

ções futuras. O modelo subestimou a precipitação na bacia durante o verão e o outono e a superestimou no inverno e na primavera (Figura 4A), sendo o maior erro médio mensal em novembro (43,96 mm) e o menor em dezembro (2,09 mm).

Para definir o método de correção mais eficaz para as séries de precipitação e temperatura da Bacia do Alto Tietê, foram testadas três técnicas de correção. Assim, após os testes de correção, optou-se pela técnica de

correção aplicação direta (Equação 2) para a variável precipitação, visto que ela mostrou a maior diminuição dos erros, ou seja, maior semelhança com a série de dados de chuva observada (Figura 4A). Com a correção das saídas do modelo MRI-JMA, houve maior aproximação em relação à precipitação observada, diminuindo os erros e confirmando que as correções dos dados de chuva possibilitam representar a precipitação da bacia com maior acurácia, sobretudo no segundo semes-

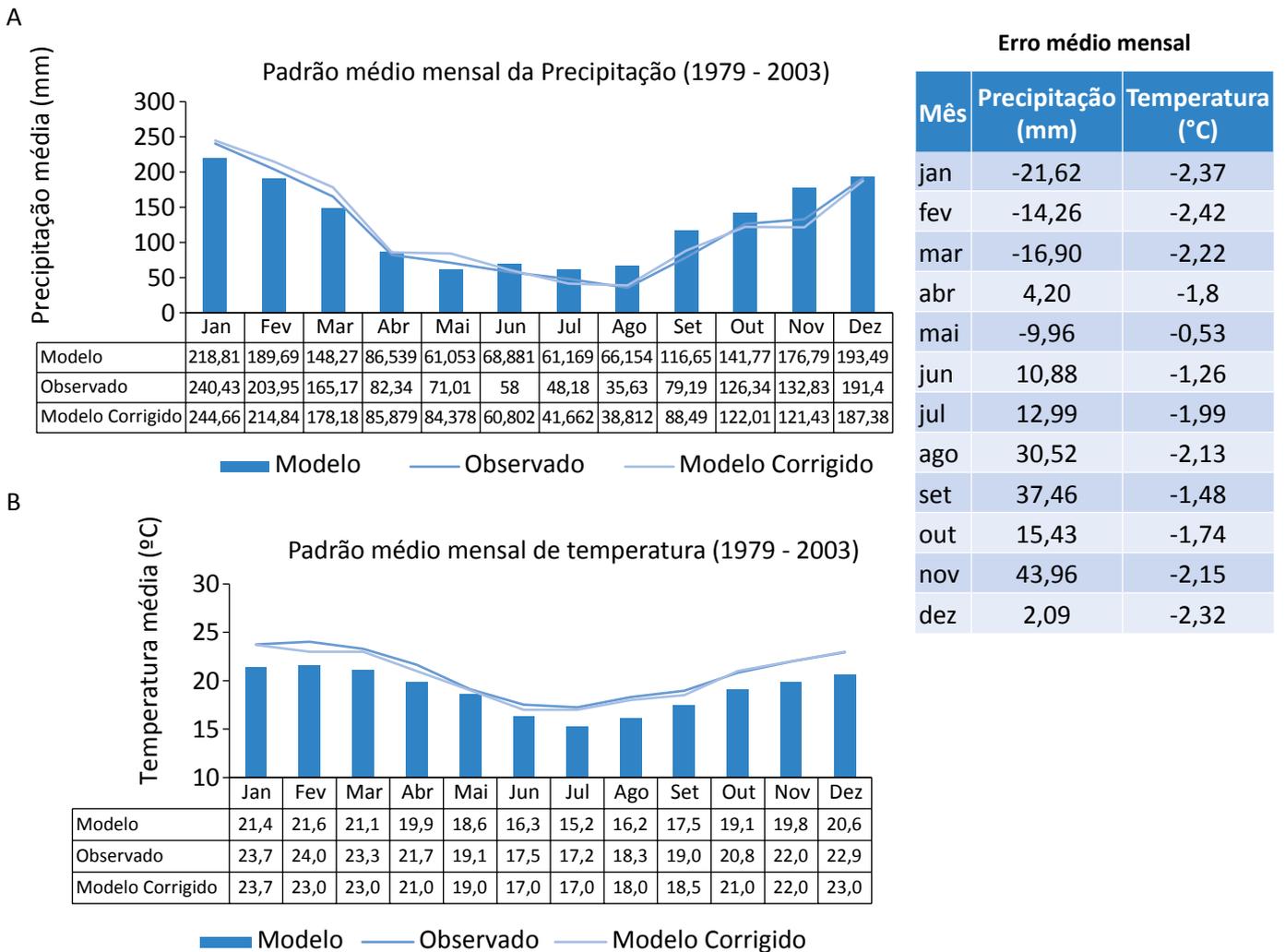


Figura 4 – Gráfico do padrão médio mensal da precipitação (A) e temperatura (B) na Bacia do Alto Tietê, para o período de 1979 a 2003, com os valores dos respectivos erros médios mensais.

tre, no qual é possível observar maior defasagem entre os valores observados e o modelo antes da correção.

No que se refere às temperaturas (Figura 4B), o modelo climático também conseguiu representar o padrão sazonal médio de temperatura na bacia para o período de 1979 a 2003, embora subestime a temperatura média mensal durante todos os meses do ano. As saídas do modelo apresentaram menor erro durante o segundo trimestre do ano, sendo o menor (-0,53°C) em maio e o maior (-2,42°C) em fevereiro. Para a correção dos dados de temperatura do ar, o método adotado foi o de remoção do erro médio mensal (Equação 1). Depois da correção é possível observar um significativo decréscimo do erro em relação à temperatura observada (Figura 4B).

De acordo com as saídas de precipitação e temperatura do modelo climático MRI-JMA para o cenário de emissões A2 do AR4/IPCC, para o período futuro de 2017 a 2039 (Figura 5), tem-se um possível aumento da precipitação em relação à climatologia observada, sendo que o mês de janeiro continuará exibindo a maior precipitação (257,3 mm), enquanto o mês de julho mostra os menores índices pluviométricos, em torno de 41,3 mm. No que se refere às anomalias de precipitação na bacia, em relação ao clima simulado pelo modelo, a menor anomalia positiva (0,34 mm) foi detectada em junho, e a maior (24,4 mm), em agosto. Por outro lado, a maior anomalia negativa (-16,1 mm) deverá ocorrer em abril. Observa-se que o cenário futuro na BHAT projeta, para o período de 2017 a 2039,

verão, outono e inverno mais chuvosos, devido às anomalias positivas, enquanto a primavera deverá ser menos chuvosa, como mostram as anomalias negativas (Figura 5A).

De acordo com o cenário futuro de temperatura do modelo MRI-JMA, a BHAT poderá apresentar, em média, uma anomalia positiva mensal de aproximadamente 0,87°C. De acordo com a projeção futura de temperatura do modelo, o mês de fevereiro continuará sendo o mais quente, passando a ter uma média mensal de 24,74°C. Entretanto, o mês de julho deixará de ser o mais frio, dando lugar a junho, que terá uma temperatura média mensal de aproximadamente 18,3°C. Todos os meses possuem anomalias positivas de temperatura, sendo que a menor (0,51°C) ocorrerá em maio, e a maior (1,47°C), em julho (Figura 5B).

O cenário futuro da vazão (estimada por meio da equação empírica), que utilizou as saídas das variáveis climáticas de precipitação e temperatura do modelo MRI-JMA corrigidas para o período futuro (2017 a 2039), indica para o período de 2017 a 2039 uma provável diminuição da vazão média mensal entre os meses de fevereiro e julho na BHAT, sobretudo em junho, que terá um decréscimo em torno de 28,1 m³/s. Já no segundo semestre do ano ocorrerá um aumento da vazão em relação ao que foi observado, principalmente nos meses de dezembro, novembro e janeiro, que terão um acréscimo aproximado da vazão média de 44,89; 37,79 e 24,28 m³/s, respectivamente.

Medidas de gestão dos recursos hídricos diante dos impactos das mudanças climáticas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

O gerenciamento de recursos hídricos visa a harmonizar e solucionar conflitos resultantes do uso intensivo da água em bacias hidrográficas. Esse gerenciamento é um compromisso entre os usos múltiplos da água e a conservação de suas funções ecológicas. O principal instrumento de gestão empregado é a outorga do uso da água, que depende da disponibilidade hídrica da bacia. A outorga é uma autorização mediante a qual o poder público faculta ao outorgado o direito de uso da água, por prazo determinado, nas condições e nos termos expressos no respectivo ato. A função da outorga é ratear a água disponível entre as demandas existentes ou potenciais, trazendo contribuições ao

crescimento econômico, à equidade social e à sustentabilidade ambiental, mantendo uma vazão ecológica (RIBEIRO, 2011).

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (CBHAT, 2014), na Bacia do Alto Tietê existem 1.754 outorgas, o que totaliza uma vazão de 89,36 m³/s para captação, sendo que 64,5% das outorgas de direito de uso da água são destinadas ao abastecimento público e lançamento de efluentes domésticos, 32,8%, ao uso industrial, e 2,7%, à irrigação. Tendo em vista a forte sazonalidade da demanda de água na RMSP, a segurança hídrica de mais de 20 milhões de habitantes depende de os sistemas de abastecimento serem operados de

forma flexível, respeitados os limites superiores das vazões médias anuais dos sistemas produtores. A BHAT conta com oito sistemas produtores principais, totalizando uma disponibilidade hídrica de aproximadamente 68 m³/s (CBHAT, 2015).

Com base no cenário futuro estabelecido na Bacia do Alto Tietê, poderá ocorrer um aumento médio da vazão durante a primavera (19,6%) e os dois primeiros meses do verão, dezembro e janeiro, de aproximadamente 21,4%. Por outro lado, possivelmente haverá

um decréscimo na vazão no inverno (-9%) e no outono (-7%). Como a BHAT possui grande extensão, os impactos das mudanças climáticas nas sub-bacias que a compõem terão diferentes intensidades e consequências. Assim, apesar das incertezas inerentes às projeções dos modelos climáticos, sua utilização pode contribuir para mitigar os efeitos provocados pelas mudanças climáticas e pactuar ações coordenadas entre os gestores da BHAT e as bacias adjacentes, possibilitando a adoção de vazões de referência que levem em conta os prováveis impactos das mudanças climáticas na re-

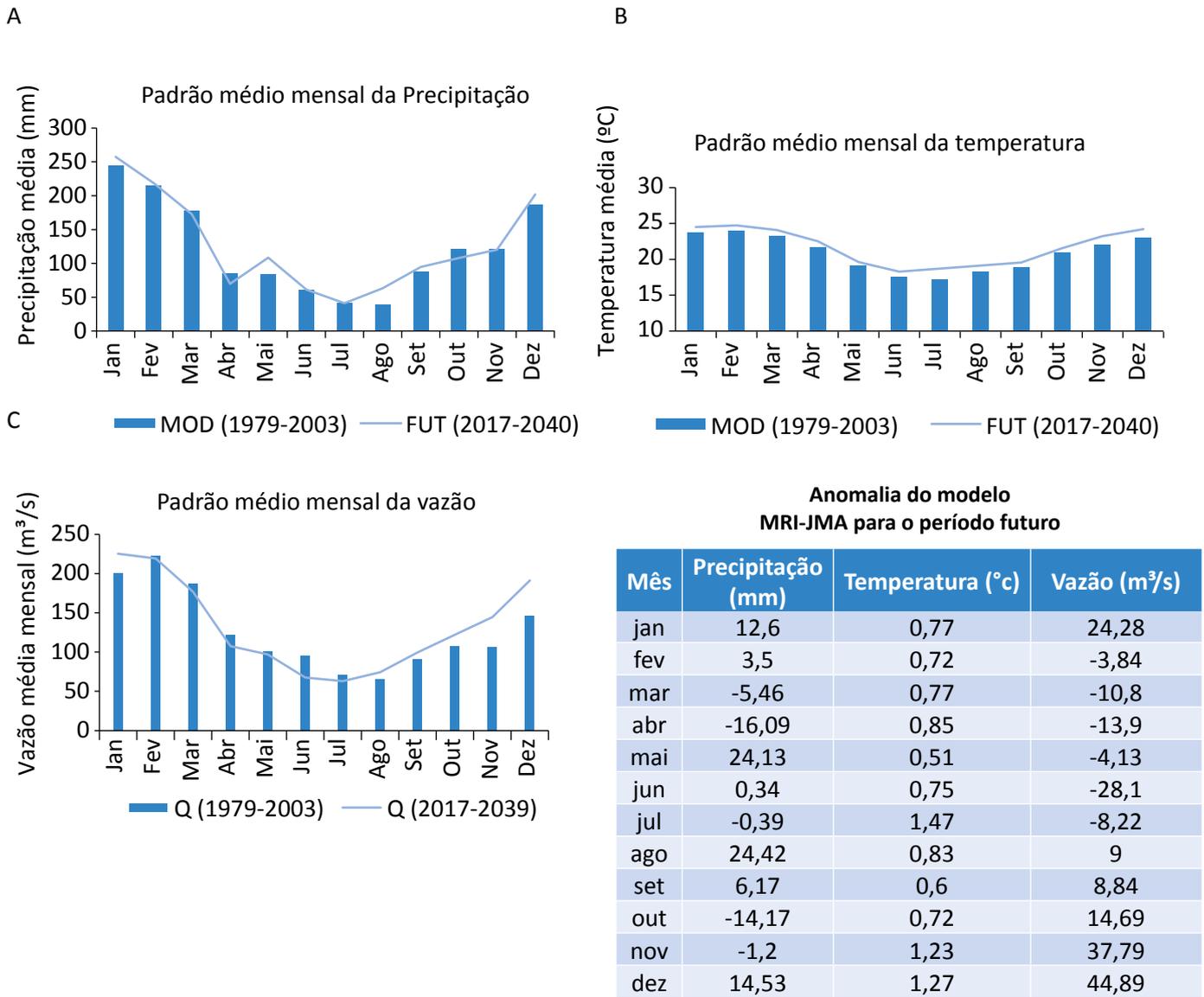


Figura 5 – Gráfico do padrão médio mensal futuro da precipitação (A), temperatura (B) e vazão (C) na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e tabela com os valores das anomalias.

gião. Para que tais impactos sejam precavidos, ou que ocorram em menor intensidade, é essencial a adoção de medidas de gestão preventivas.

O escopo da gestão preventiva engloba diretrizes de ação que objetivam prevenir, mitigar, preparar, alertar e responder os impactos da variabilidade hidroclimatológica na BHAT. As principais medidas que os órgãos gestores da bacia podem adotar visando ao cenário de estiagem na região, projetado pelo modelo climático MRI-JMA durante o outono e o inverno, são:

- elaboração e intensificação dos programas e projetos de incentivo à redução de consumo, por meio de multas, programas de bonificação e promoção da educação ambiental;
- otimização dos processos e programas de combate às perdas do sistema de abastecimento;
- estímulos econômicos e fiscais ao consumo de água de reúso para indústrias;
- maior rigor e controle ao estabelecer novas outorgas; e
- reflorestamento das áreas de mananciais.

Já as medidas relacionadas com o cenário de aumento da vazão na bacia durante a primavera e o verão deverão estar ligadas a desastres naturais, como casos de deslizamento, enchentes e inundações. As principais normas que os órgãos gestores da bacia, em conjunto com as prefeituras e a Defesa Civil, devem adotar são voltadas à gestão de risco de desastres, como construções de piscinões e barragens; melhoria dos sistemas de alerta de desastres; limpezas periódicas dos córregos; desocupação de moradias irregulares; promoção do saneamento ambiental, entre outras.

Entende-se que as medidas preventivas desenvolvidas com a finalidade de promover a prevenção e a adaptação trazem contribuições significativas para o planejamento voltado à redução dos impactos das mudanças climáticas, sobretudo no que tange aos problemas crônicos já existentes na BHAT, como inundações e dificuldades em suprir a demanda de água, que somente seriam agravados diante da confirmação do cenário de aumento da vazão durante a primavera e o verão e redução ao longo do outono e do inverno. Assim, é visível a necessidade de os órgãos gestores adotarem essas medidas com o objetivo de aumentarem sua capacidade de resposta aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas ocasionarão alterações nas variáveis atmosféricas precipitação e temperatura, afetando, assim, a disponibilidade hídrica em muitas regiões do mundo. Considerando a relevância desse tema, este trabalho objetivou analisar o comportamento futuro da chuva e da vazão na Bacia do Alto Tietê, com base nas projeções do modelo climático MRI-JMA para o cenário de emissões A2.

Apesar de subestimar a precipitação na bacia durante o verão e o outono e a superestimar no inverno e na primavera, o modelo climático MRI-JMA capturou a sazonalidade da chuva em relação à climatologia observada no período de 1979 a 2003, mostrando que é capaz de representar o padrão sazonal climatológico da bacia. Isso indica que o modelo pode simular, apesar das incertezas, uma precipitação futura mais provável. A fim de reduzir os erros sistemáticos do modelo climático, as saídas de precipitação e temperatura do modelo, para os períodos presente e futuro, foram corrigidas.

De acordo com as saídas de precipitação do modelo climático MRI-JMA para o cenário de emissões A2, no período de 2017 a 2039, a Bacia do Alto Tietê poderá ter um aumento médio mensal da precipitação em torno de 5,9 mm. No mês de agosto deve ocorrer o maior aumento, com uma maior anomalia média positiva (24,42 mm), e abril terá a maior anomalia negativa (-16,1 mm). Já as saídas de temperatura do modelo indicam que a BHAT terá um aumento de temperatura média mensal de aproximadamente 0,86°C. Em julho ocorrerá a maior elevação de temperatura na bacia (1,47°C), e em maio, a menor (0,51°C). Em relação à vazão futura, possivelmente ocorrerá um acréscimo da vazão média durante a primavera (19,6%) e o verão (13,75%), enquanto no inverno e no outono o modelo projeta um decréscimo da vazão, de 9 e 7%, respectivamente. A Bacia do Alto Tietê possuirá a maior anomalia positiva em dezembro (44,9 m³/s) e a maior anomalia negativa em junho (-28,1 m³/s).

De modo geral, a alteração dos valores da precipitação e a elevação da temperatura na bacia implicarão o aumento da variabilidade sazonal da vazão, um forte indicativo de que a Bacia do Alto Tietê, de acordo com o cenário de emissões A2 do modelo estudado, estará mais suscetível a casos de enchentes e inundações no verão e mais propensa a eventos de escassez hídrica no outono e no inverno, o que pode resultar em graves problemas para o fornecimento de água na RMS, como ocorreu entre 2013 e 2015.

Embora existam incertezas associadas ao modelo climático, as projeções climáticas são importantes ferramentas de planejamento ambiental e é fundamental que as instituições realizem uma gestão integrada dos recursos hídricos empregando ações com enfoque preventivo, a fim de que a região tenha maior segurança

hídrica e aumente sua capacidade de resposta aos impactos das mudanças climáticas.

As projeções de mudança nos regimes e na distribuição de chuva derivadas dos modelos climáticos globais não são conclusivas e ainda há muita incerteza quanto ao uso dessas ferramentas, pois dependem da área de estudo e dos modelos climáticos avaliados. Assim, sugere-se, para trabalhos futuros, o estudo de outros modelos climáticos globais de alta resolução para a região da bacia, bem como a utilização de modelos climáticos regionais que apresentam uma resolução espacial mais alta do que a fornecida por um modelo global. Outra proposta que também permitiria melhorar a caracterização hidroclimatológica futura da bacia é o aperfeiçoamento do modelo hidrológico empírico empregado. Além disso, é importante investigar o desempenho de outros tipos de modelos hidrológicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação Universidade Federal do ABC (UFABC), pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L.; PESQUERO, J. Previsões de mudanças climáticas para América do Sul: resultados da aplicação do “earth simulator”. *Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas – GPMC*, n. 7, p. 2-4, 2009.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Cantareira*, Brasília, n. 4, p. 1-14, nov. 2015.
- _____. *Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Cantareira*, Brasília, v. 9, n. 11, p. 1-11, nov. 2014.
- CBHAT – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ. *Conheça a Bacia do Alto Tietê – Outorgas de usos da água*. São Paulo, 2014.
- _____. *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – UGRHI 6: ano-base 2014*. São Paulo: FBHAT, 2015.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988. 571p.
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 9, jul. 2015.
- FLATO, G. J.; MAROTZKE, B.; ABIODUN, P.; BRACONNOT, S. C.; CHOU, W.; COLLINS, P.; COX, F.; DRIOUECH, S.; EMORI, V.; EYRING, C.; FOREST, P.; GLECKLER, E.; GUILYARDI, C.; JAKOB, V.; KATSOV, C.; REASON; RUMMUKAINEN, M. Evaluation of climate models. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (Eds.). *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge/New York: Cambridge University Press, 2013.

FUSP – FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Plano da Bacia do Alto Tietê*: Relatório Final CBHAT. São Paulo, 2009.

GRAHAM, L. P. *Large-scale hydrological modeling in the Baltic basin*. Tese (Doutorado) – Division of Hydraulic Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Report TRITA-AMI PHD 1033, Estocolmo, 2000.

HAMADA, E.; MAIA, A. H. N.; GHINI, R.; THOMAZ, M. C.; GONÇALVES, R. R. V.; LANA, J. T. O. Precipitações projetadas pelos modelos climáticos globais do Quarto Relatório do IPCC para o Sudeste do Brasil. In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, Embrapa Meio Ambiente, São Paulo, 2012. *Anais...* 2012.

HIRATA, R.; FERREIRA, L. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, p. 43-50, 2001.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Cambio Climático 2013: bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2013.

_____. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

_____. *IPCC Special Report: emission scenarios*. New York: Cambridge University Press, 2000.

LENDERINK, G.; BUISSAND, A.; DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Science*, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.

LIMA, W. P. *Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 241p.

MARENGO, J. Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.

_____. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos modelos globais do clima do IPCC*. CPETEC/INPE, 2007.

MARENGO, J.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. *Geosp – Espaço e Tempo*, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2015.

MESCHIATTI, M.; FONTOLAN, M.; PENNEREIRO, J.; FERREIRA, D. Caracterização estatística de tendências em séries anuais de dados hidro-climáticos no estado de São Paulo. *Geografia Acadêmica*, v. 6, n. 1 (XIII), p. 52-64, 2012.

MIZUTA, R.; OOUCHI, K.; YOSHIMURA, H.; NODA, A.; KATAYAMA, K.; YUKIMOTO, S.; HOSAKA, M.; KUSUNOKI, S.; KAWAI, H.; NAKAGAWA, M. 20-km-mesh global climate simulation using JMA-GSM model mean climate states. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 84, n. 1, p. 165-185, 2006.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do Rio Ijuí, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 101-121, mar. 2015.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, A. S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.

PINHEIRO, J. U.; NEVES, J. A.; CHAVES, R. C.; MENDES, M.; BARRETO, N. J. C. Avaliação de modelos do CMIP5 que melhor expressam a atuação dos vórtices ciclônicos em altos níveis (VACNS) no Nordeste Brasileiro (NEB). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 5, p. 891-904, 2014.

REIS, S. Acabou a cota do volume morto do Alto Tietê. *GGN*, São Paulo, p. 14, 20 nov. 2014.

RIBEIRO, W. C. Oferta e estresse hídrico na Região Metropolitana de São Paulo. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 25, n. 71, 2011.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; CABRAL, S. M.; LEMOS, W. E. D.; PORTO, V. C. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 28, n. 3, set. 2013a.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; LÁZARO, Y. M. C. Avaliação de desempenho dos modelos de mudança climática do IPCC-AR4 quanto a sazonalidade e os padrões de variabilidade interanual da precipitação sobre o nordeste do Brasil, Bacia do Prata e Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 1, p. 177-194, jan.-mar. 2013b.

SORIANO, E.; LONDE, R. L.; GREGORIO, L. T.; COUTINHO, M. P.; SANTOS, L. B. L. Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 21-42, mar. 2016.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, Nova York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: _____ (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 2001. p. 253-287.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. *Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica*. Brasília: MMA, 2006.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245p.