

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

INCORPORAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS – O CASO DA BACIA DO RIO PARAGUAÇU

Samara Fernanda da Silva¹, Fernando Genz² & Lafayette Luz³

RESUMO – As mudanças climáticas deverão resultar em impactos na disponibilidade hídrica, tanto no aspecto quantitativo quanto qualitativo. Por isto, sua incorporação no planejamento dos usos das águas torna-se indispensável. Assim, este artigo aborda alguns métodos, suas limitações e faz recomendações que poderão ser aplicadas para auxiliar na elaboração do planejamento dos recursos hídricos no contexto das mudanças climáticas através do estudo de caso da Bacia do Rio Paraguaçu.

ABSTRACT – Climate change will result in impacts on water availability, both in quantitative and qualitative. Therefore, its incorporation into the planning of the uses of the waters becomes indispensable. Thus, this article discusses some methods, their limitations and makes recommendations that can be applied to assist in the development of water resources planning in the context of climate change through the Paraguaçu River Basin case study.

Palavras-Chave: Mudanças climáticas, adaptação, recursos hídricos.

INTRODUÇÃO

O aquecimento global vem promovendo mudanças climáticas, alterações na frequência e distribuição das chuvas e, conseqüentemente, nas vazões fluviais. Os cenários projetados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel for Climate Change*), tanto os mais otimistas quanto os pessimistas, prevêem diminuição na disponibilidade hídrica no nordeste brasileiro com aumento da duração do período de estiagem (IPCC, 2008).

Nos últimos anos, a divulgação dos estudos de impactos das projeções de clima futuro sobre os recursos hídricos tem se tornado mais freqüente (GIBSON *et al.*, 2005; BARNETT *et al.*, 2004; O'HARA & GEORGAKAKOS, 2008; RUTH *et al.*, 2007; KIRSHEN, 2008; VONO *et al.*, 2010; MILLY *et al.*, 2005; SALATI *et al.*, 2007; GENZ *et al.*, 2011; PURKEY *et al.*, 2007; POLEBITSKI *et al.*, 2011).

¹ Graduada em Engenharia Sanitária e Ambiental; mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento pela Escola Politécnica da UFBA. samara.nanda@gmail.com

² Pesquisador da FAPESB; doutor associado ao Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. fgenz@pq.cnpq.br

³ Professor doutor do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. lluz@ufba.br

Há um reconhecimento de que as alterações climáticas poderão interferir no consumo de água (RUTH, 2007), nos processos de desestabilização de margens de rios e descarga de sedimentos (BOYER *et al.*, 2010), na qualidade das águas (MOORE *et al.*, 2008; ARNELL, 1998; WHITEHEAD *et al.*, 2009; BONTE & ZWOLSMAN, 2010), nos processos de migração (Barbieri, 200-).

Os impactos do clima exigirão modificações no gerenciamento das águas no futuro, sendo imprescindível sua inserção para avaliação de sistemas de recursos hídricos (WILEY & PALMER, 2008). Ao inserir as alterações hidroclimáticas no gerenciamento dos recursos hídricos busca-se encontrar mais efetivamente o equilíbrio entre disponibilidade hídrica e a demanda, que por sua vez facilitará a avaliação dos gestores das águas sob diferentes condições climáticas (IPCC, 2008). Para MEANS III *et al.* (2010) as mudanças climáticas precisam ser inseridas nas tomadas de decisões, por apresentar potenciais impactos financeiros, sociais e ambientais.

Portanto, torna-se importante avaliar a disponibilidade hídrica e a demanda dos recursos hídricos em cenários de mudanças climáticas de modo a permitir que decisões sejam tomadas para a elaboração de medidas preventivas e/ou adaptativas que evitem racionamento, conflitos ou até mesmo falhas severas ao atendimento aos usos das águas.

MODELOS E CENÁRIOS CLIMÁTICOS

O Centro de Distribuição de Dados do Painel Intergovernamental sobre as Mudanças do Clima – IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) disponibiliza relatórios e os cenários climáticos, resultado das projeções de 23 modelos dos principais centros de modelagem do clima no mundo. Em geral, há poucas instituições onde são executados os modelos climáticos globais, pois os mesmos demandam enormes recursos computacionais.

Segundo Marengo *et al.* (2003 b), os processos que envolvem a circulação geral da atmosfera não podem ser determinados de forma completa, uma vez que são extremamente complexos e possuem comportamentos caóticos.

Os modelos climáticos globais (GCMs e AOGCMs, denominados respectivamente Modelos Globais Atmosféricos e Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera) são ferramentas utilizadas para realizar as projeções do clima no futuro, determinadas considerando diferentes níveis de emissões dos gases de efeito estufa e aerossóis ou cenários (SRES – *Special Report on Emissions Scenarios*), numa combinação coerente e consistente de hipóteses sobre forçantes controladoras, tais como: demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudança na tecnologia, assim como suas interações (IPCC 2001), mas, segundo Marengo *et al.* (2011), sem a inclusão explícita de políticas de reduções das emissões.

Os AOGCMs podem oferecer informações de grande utilidade sobre mudanças de clima em escala continental, entretanto, devido a efeitos orográficos e eventos extremos do clima, não representam bem as mudanças no clima local, tais como as tempestades ou frentes e chuvas, sendo para isto necessário regionalizar os cenários climáticos usando modelos regionais (*downscaling* dinâmico) ou funções estatísticas (*downscaling* empírico ou estatístico) (MARENGO, 2007). Os modelos regionais são de resolução mais alta, alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global (SILVA, 2005), existindo uma dependência direta do desempenho do modelo regional em relação ao global. Enquanto as escalas espaciais dos modelos globais são da ordem de centenas de quilômetros as dos modelos regionais são da ordem de dezenas quilometro, o que possibilita a avaliação dos impactos hidrológicos das mudanças climáticas em médias e grandes bacias.

Essa ampliação na resolução espacial dos modelos globais aumenta a complexidade e a incerteza das projeções. Marengo *et al.* (2011) dividem estas incertezas em quatro categorias: incertezas das emissões, das concentrações de gases de efeito estufa, da variabilidade natural do tempo e clima e da modelagem, as quais fazem parte de qualquer projeção de mudanças climáticas.

A partir de 2000, o IPCC elaborou novos cenários de emissões, sendo estes fundamentados numa interação de desenvolvimento tecnológico, social, demográfico e de níveis de gases de efeito estufa (IPCC 2001). Assim, foram definidos pelo IPCC quatro conjuntos de cenários denominados “famílias”: A1, A2, B1 e B2, onde a família A1 se compõe de três grupos (A1F1, A1B e A1T).

INCORPORAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS

A dificuldade de incorporar as projeções do clima futuro, e por consequência, da disponibilidade dos recursos hídricos no planejamento tem sido visível, estando ausente, por exemplo nos Planos Diretores de Bacia Hidrográfica em elaboração no Estado da Bahia e no Plano Municipal de Saneamento Básico de Salvador.

A integração das alterações climáticas no processo de decisão dos recursos hídricos é dificultada por vários fatores, a começar pela falta de quadros analíticos adequados para avaliar com rigor os impactos de uma série de cenários climáticos futuros (PURKEY *et al.*, 2007), pela falta de acesso a todas as simulações do clima futuro do IPCC (2007), e pela incapacidade de análise da faixa de incerteza representada em simulações climáticas (VONO *et al.*, 2010). A falta de capacitação técnica na modelagem de processo hidrológicos estocásticos ainda é limitada. No Brasil, esta aborgadagem ainda está na academia, portanto, ausente de estudos e projetos aplicados.

A avaliação de impactos os recursos hídricos em cenários de mudanças climáticas sobre é realizada por meio do acoplamento de modelos atmosféricos com os modelos hidrológicos, existindo duas metodologias para isto: *on-line*, na qual há interação simultânea dos processos

atmosfera-superfície, verticalmente e horizontalmente, e *off-line*, no qual o modelo atmosférico fornece dados para serem utilizados como entrada no modelo hidrológico (SILVA, 2005). Após as simulação hidrológicas com dados dos modelos de clima pode-se proceder, por exemplo, as análise em sistemas de apoio a decisão de modo a subsidiar o planejamento.

Silva (2005) e Silva *et al.* (2007) citam as principais limitações dos modelos globais, em relação às aplicações em recursos hídricos: a) a discretização retrata somente os processos atmosféricos de macroescala na superfície da terra; b) muitos processos são representados com fortes limitações no modelo, tais como os processos hidrológicos, por exemplo, que variam na microescala; c) o custo e o tempo de processamento para uma discretização mais detalhada destes modelos são extremamente elevados; e d) diferenças entre as escalas de tempo e espaço dos modelos atmosféricos e hidrológicos.

Mesmo sabendo da grande variedade de cenários climáticos previstos, dos custos e incertezas associados, a inserção das mudanças climáticas no planejamento dos recursos hídricos permitirá que decisões sejam tomadas com relação a medidas preventivas e/ou adaptativas no sentido de evitar racionamento, conflitos ou até mesmo falhas severas aos usos múltiplos das águas. Entretanto ao aumentar a incerteza e com a crescente demanda de diferentes setores e usuários de água, o planejamento se torna mais complexo (MYSIAK *et al.*, 2010).

Means III *et al.* (2010) apresentam cinco métodos de planejamento para o abastecimento de água incorporando as alterações climáticas e incertezas adicionais: análise de decisão clássica, planejamento de cenários tradicionais, tomada de decisão robusta, opções reais e planejamento de portfólio. Este último, segundo tais autores, atualmente não é usado no planejamento de água. Estes métodos podem ser utilizados inclusive para elaboração dos Planos de Bacia. O Quadro 1 apresentadas as principais características de tais métodos.

Quadro 1: Métodos de planejamento para incorporação das mudanças climáticas no gerenciamento de recursos hídricos

Método	Características e Limitações
Análise de decisão clássica	Dá suporte aos tomadores de decisão com o registro sistemático da informação e matematicamente valorando e ordenando as alternativas, confrontando-as com objetivos potencialmente conflitantes. Descreve a incerteza com probabilidades. A análise conduz a estratégias ótimas, geralmente de menor custo. A grande limitação deste método consiste na determinação das distribuições de probabilidade relacionadas às mudanças climáticas.
Planejamento de cenários tradicionais	Elabora vários cenários futuros hipotéticos, sem atribuir qualquer probabilidade de sua ocorrência. Estes cenários extrapolam as tendências atuais e contemplam um conjunto de condições plausíveis.

Quadro 1: Métodos de planejamento para incorporação das mudanças climáticas no gerenciamento de recursos hídricos (continuação)

Método	Características e Limitações
Opções reais	Fundamenta-se na análise financeira de projetos/ações, em que a incerteza de uma estratégia é baseada na comparação de fluxos de caixa e custos, e estes estão correlacionados com as estratégias. Os resultados são flexíveis possibilitando que os projetos dos sistemas de recursos hídricos sejam retardados e separados em etapas/fases. Os resultados produzidos pelo método incorporam o valor da flexibilidade de cada alternativa de investimento, permitindo a comparação dos projetos de maneira direta. Este método é complexo e relativamente desconhecido no setor da água.
Planejamento de portfólio	Incorporam critérios financeiros de modo a permitir uma seleção de portfólio contendo uma combinação de recursos (monetizáveis) ou estratégias que minimizem a exposição financeira devido a futuros cenários de mercado. No caso do planejamento de sistemas de abastecimento de água incorporando as incertezas dos modelos de clima, este portfólio seria, por exemplo: reservas hídricas superficiais e subterrâneas, programas de gestão da demanda, fontes/mananciais emergenciais, estruturas de preço (tarifária), mudanças operacionais e padrões de garantia. Neste modelo a incerteza é tratada com probabilidades.

Fonte: Adaptado de MEANS III, *et al.* (2010)

No Brasil, devido aos esforços computacionais exigidos e aos custos associados, os cenários futuros estão sendo projetado em fatias de tempo (*time slices*) de 30 anos cada um – (2010-2040, 2041-2070, 2071-2100), o que resulta na pré-definição dos horizontes de simulação hidrológica. Os primeiros dados disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) brasileiro foram aqueles para o período de 2070 – 2100. Por isto, muitos dos estudos divulgados foram para esta fatia de tempo (BARBIERI, 200-; GENZ, 2011; MARENGO, 2007; MARENGO *et al.*, 2011; NOBRE *et al.*, 2007; SALATI *et al.*, 2007; SCHAEFFER *et al.*, 2007; TIEZZI, 2009). Contudo, dados disponibilizados neste período inviabilizam a utilização no planejamento dos recursos hídricos, uma vez que o horizonte dos planos, em geral, é de 20 a 30 anos. Adicionalmente, não há no Brasil projeções de população; estimativa de rebanho, de área e culturas irrigadas ou mesmo de expansão industrial desagregada por município para até 2100 de modo a possibilitar a determinação das demandas dos diversos usuários dos recursos hídricos e assim proceder à análise entre demanda e disponibilidade futura.

Recentemente, foram disponibilizados os dados do modelo climático regional Eta/CPTEC referentes ao período de 2010 a 2099 para o território brasileiro, que foi utilizado para estudo de caso de simulação do sistema hídrico da bacia do Rio Paraguaçu. Nele foi possível identificar outras limitações diante dos dados de demanda disponíveis para o planejamento, como será visto a seguir.

ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PARAGUAÇU

A bacia do rio Paraguaçu localiza-se inteiramente no Estado da Bahia e atualmente tem cinco reservatórios: Apertado (204,11 Hm³), Bandeira de Melo (318 Hm³), França (59 Hm³), São José do Jacuípe (355 Hm³) e Pedra do Cavalo (5.330 Hm³). Os reservatórios de Apertado, Bandeira de Melo e de Pedra do Cavalo estão localizados no rio principal e os demais no curso do rio Jacuípe. Está prevista a implantação de dois reservatórios: de Baraúnas e de Casa Branca com capacidade máxima de armazenamento de 39 Hm³ e 22,37 Hm³, respectivamente, ambos nas nascentes do rio Paraguaçu. Na Figura 1 está apresentado o mapa de localização desta bacia.

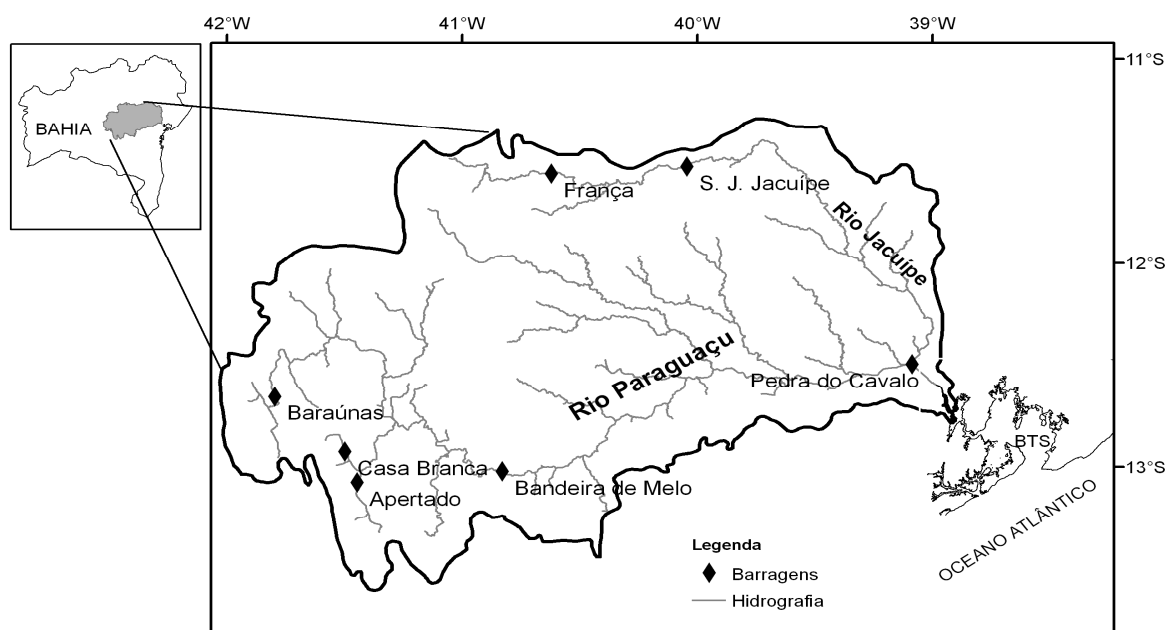


Figura 1: Localização da bacia do rio Paraguaçu e das barragens analisadas.

A montante da barragem de Pedra do Cavalo há apenas os seguintes usos: dessedentação animal, abastecimento humano, irrigação e vazões remanescentes. No reservatório de Pedra do Cavalo há geração de energia elétrica e atendimento as demandas industriais, vazões remanescentes e consumo humano, inclusive atendimento ao Sistema Integrado de Abastecimento de Água de Salvador, do qual é responsável por 60%.

Na bacia do rio Paraguaçu a avaliação dos impactos das mudanças climáticas na disponibilidade quantitativa de águas foi efetuada por meio do método Planejamento de Cenários Tradicionais, utilizando o índice de confiabilidade definido por Hashimoto *et al.* (1982). Este índice é definido como sendo a probabilidade de obtenção de sucesso e, no caso de sistema de recursos hídricos, este índice traduz o êxito no atendimento às demandas previstas. Portanto, este é função das demandas, dos afluxos ao sistema, das capacidades dos diversos reservatórios e da política de operação (VIANNA JUNIOR, 2007). Para isto foram realizadas simulação no modelo de rede de fluxo AcquaNet, cujas entradas foram alimentadas por dois conjuntos de séries advindas da saída do modelo hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH). Os cenários foram construídos por meio de

dois critérios de disponibilidade: vazões afluentes sem e sob efeitos das mudanças climáticas, considerando os usos das águas da bacia e as projeções de demandas definidas em projeto (reservatórios de montante de Pedra do Cavalo, MEDEIROS *et al.*, 2004) e aquelas definidas por SETIN (200-) e SEDUR (2010). O primeiro conjunto de séries de vazões afluentes foram aquelas simuladas para o período de referência (1961 a 1990), enquanto a segunda refere-se ao cenário de mudanças climáticas (A1B), de 2011 a 2040.

O cenário do clima futuro se baseou nos resultados das simulações climáticas do modelo regional do clima Eta/CPTEC sobre a América do Sul, obtidos com o membro padrão (“controle”). Elas foram conduzidas com condições de contorno provenientes do modelo de clima global HadCM3 do *UK Met Office Hadley Centre*. O Modelo Eta/CPTEC foi configurado com 40 km de resolução horizontal e 38 camadas na vertical. Mais detalhes sobre as simulações e os modelos Eta/CPTEC e HadCM3 podem ser encontradas em Chou *et al.* (2011). Os dados a cada 6 horas de temperatura do ar a 2 m (°C), umidade relativa do ar (%), precipitação (mm) e vento (m/s) foram sumarizados em valores diários e mensais, conforme a necessidade de entrada do modelo hidrológico.

A seguir são descritas as limitações e as soluções que possibilitaram a incorporação das mudanças climáticas nas simulações de rede de fluxo – AcquaNet – da Bacia do Rio Paraguaçu:

- Escolha do modelo e do cenário climático – a dificuldade de realizar o ‘*downscaling*’ para uma resolução adequada à simulação hidrológica de diferentes modelo de clima e diferentes cenários SRES, levou ao uso de dados disponíveis. Nesse caso, utilizou-se o cenário de emissões SRES A1B proveniente do modelo atmosférico Eta/CPTEC (INPE), com condições iniciais e de fronteira fornecidas pelo modelo climático global HadCM3, para a primeira fatia de tempo (2010-2040);
- Definição do período e séries de referência – Foram utilizados como referência (clima sem efeitos das mudanças climáticas) os dados do período de 1961 – 1990. Não foram geradas séries sintéticas das vazões afluentes;
- Definição da série de pluviometria do cenário futuro – conforme relatado em Genz *et al.* (2011), a precipitação simulada em geral necessita ser corrigida para se aproximar daquelas observadas. Em alguns casos essa correção pode ser feita em cima dos dados simulados para o futuro e em outros ela é realizada nos dados observados. Dessa maneira, a chuva do cenário futuro, além da magnitude, pode ter diferença de distribuição temporal e espacial daquelas utilizadas para o cenário presente. Essa situação tem impacto sobre os índices de desempenho da simulação do sistema, conforme será discutido adiante;

- Inexistência e/ou desatualização do cadastro das outorgas concedidas, das projeções das demandas para a primeira fatia de tempo (2010-2040) e do Planos de Bacia Hidrográfica – para a bacia em estudo havia apenas as projeções definidas nos projetos das barragens, que foram elaboradas na década de 1990 com horizonte de projeto até 2020. No caso do reservatório de Pedra do Cavalo haviam dados das projeções definidas pelo Plano Municipal de Saneamento de Salvador, cujo horizonte de projeto é até 2030. Portanto, havia uma limitação entre a escala temporal das projeções de demanda em relação ao escala das saídas do modelo de clima – Eta/CPTEC – (2010 – 2040). Desta forma, para as demandas dos reservatórios de montante de Pedra do Cavalo as projeções de demanda foram estendidas. Algumas destas projeções eram constantes entre 2002 e 2022 e, portanto, permaneceram constantes até 2040. A demanda para a irrigação do período de 2012 a 2040 foi constante, pois a partir deste ano foi a demanda para este usuário foi definida como a máxima de projeto. No caso da produção de energia elétrica na Barragem de Pedra do Cavalo, a demanda é fixa em função da capacidade instalada. A demanda industrial do período de 2019 a 2030 foi mantida até 2040, pois os aumentos citados por SEDUR (200-) destinam-se à demanda da Refinaria Landulpho Alves (Petrobrás) que vem desenvolvendo, em parceria com a Universidade Federal da Bahia um projeto de Uso Racional da Água, tendo, entre outros objetivos, otimizar o uso da água e minimizar a geração de efluentes líquidos na fábrica. Para as demais demandas foram realizadas análise das séries temporais (demanda x tempo) e se observou uma tendência linear com forte correlação linear (R^2 superior a 0,98), sendo aplicada para as projeções de demanda para consumo humano. Mesmo havendo sinalizações quanto à possibilidade das mudanças climáticas terem influência nos fluxos migratórios da região semi-árida do Nordeste brasileiro (BARBIERI *et al.*, 200-) as projeções de demanda humana permaneceram as mesmas em relação aquelas definidas nos respectivos projetos das barragens, conforme apresentando anteriormente.
- Definição dos valores das vazões remanescentes a jusante das barragens – a determinação das vazões remanescentes é função da capacidade de regularização dos reservatórios. Neste trabalho estas foram determinadas apenas para as vazões sem efeitos das mudanças climáticas, ou seja, para as vazões referentes ao período de 1961 a 1990, admitindo assim que em situação de restrição da disponibilidade hídrica decorrentes das mudanças climáticas as vazões remanescentes não serão alteradas, de modo a assegurar o atendimento das necessidades do ecossistema e minimizar os efeitos sobre os ecossistemas. Deste modo, as vazões remanescentes foram

determinadas em função do critério de outorga vigente (Instrução Normativa nº. 01/2007 – INEMA/Bahia). Portanto, as vazões remanescentes foram 20% e 5% das vazões regularizadas com 90% de garantia para os rios perenes e intermitentes, respectivamente. Para definir as vazões regularizadas foram realizadas simulações no AcquaNet considerando as condições naturais, pré-implantação das barragens. Para os reservatórios de Bandeira de Melo, São José do Jacuípe e Pedra do Cavalo foram desconsiderados as regularizações dos reservatórios de montante. Foi realizado deste modo, pois a legislação não faz menção sobre as vazões outorgáveis quando da existência de reservatórios em cascata, como é o caso da bacia do rio Paraguaçu;

- Uso e cobertura do solo – o modelo de transformação chuva x vazão utilizado (MGB-IPH) permite modificar as características de uso e cobertura do solo em cada célula de simulação. As projeções climáticas para a região semi-árida do Nordeste brasileiro e, portanto, para a bacia do rio Paraguaçu apontam para um ambiente semelhante a deserto, com solos mais pobres, vegetação com menor diversidade biológica e alguns lugares inabitáveis (BARBIERI *et al.*, 200-). Entretanto, no estudo de caso do caso do rio Paraguaçu optou-se por manter inalteradas tais características.
- Definição das taxas de evaporação – um dos impactos esperados das mudanças climáticas para o Nordeste do Brasil é o aumento da evaporação nos reservatórios. De posse dos dados hidroclimáticos sem e sob efeitos das mudanças climáticas utilizou-se o método de Penman para determinação das taxas de evaporação. Por uma limitação do modelo de rede de fluxo utilizado, foram utilizadas as médias mensais das taxas de evaporação, ainda que fosse possível determinar as séries mensais desta variável ao longo de todo período de simulação, o que poderia agravar a perda líquida nos reservatórios no final do período, uma vez que a temperatura tem uma tendência de aumento crescente.
- Outras limitações do modelo de rede de fluxo Acquanet: a) no caso de demandas pequenas (inferiores a 0,01) não é possível determinar os índices de desempenho uma vez que a saída do modelo apenas fornece o resultado com duas casas decimais; b) como na bacia hidrográfica estudada há geração de energia hidrelétrica foi necessário corrigir os dados de geração (potência gerada), uma vez que o AcquaNet não contabiliza as vazões remanescentes como oferta para geração de energia, embora destine a vazão turbinada para a vazão remanescente; c) o intervalo de tempo mensal para o caso de avaliação da geração de energia hidrelétrica não é o mais adequado; melhor seria utilizar dados diários.

A incorporação das mudanças climáticas no planejamento dos recursos hídricos na bacia do rio Paraguaçu foi realizada conforme Figura 2.

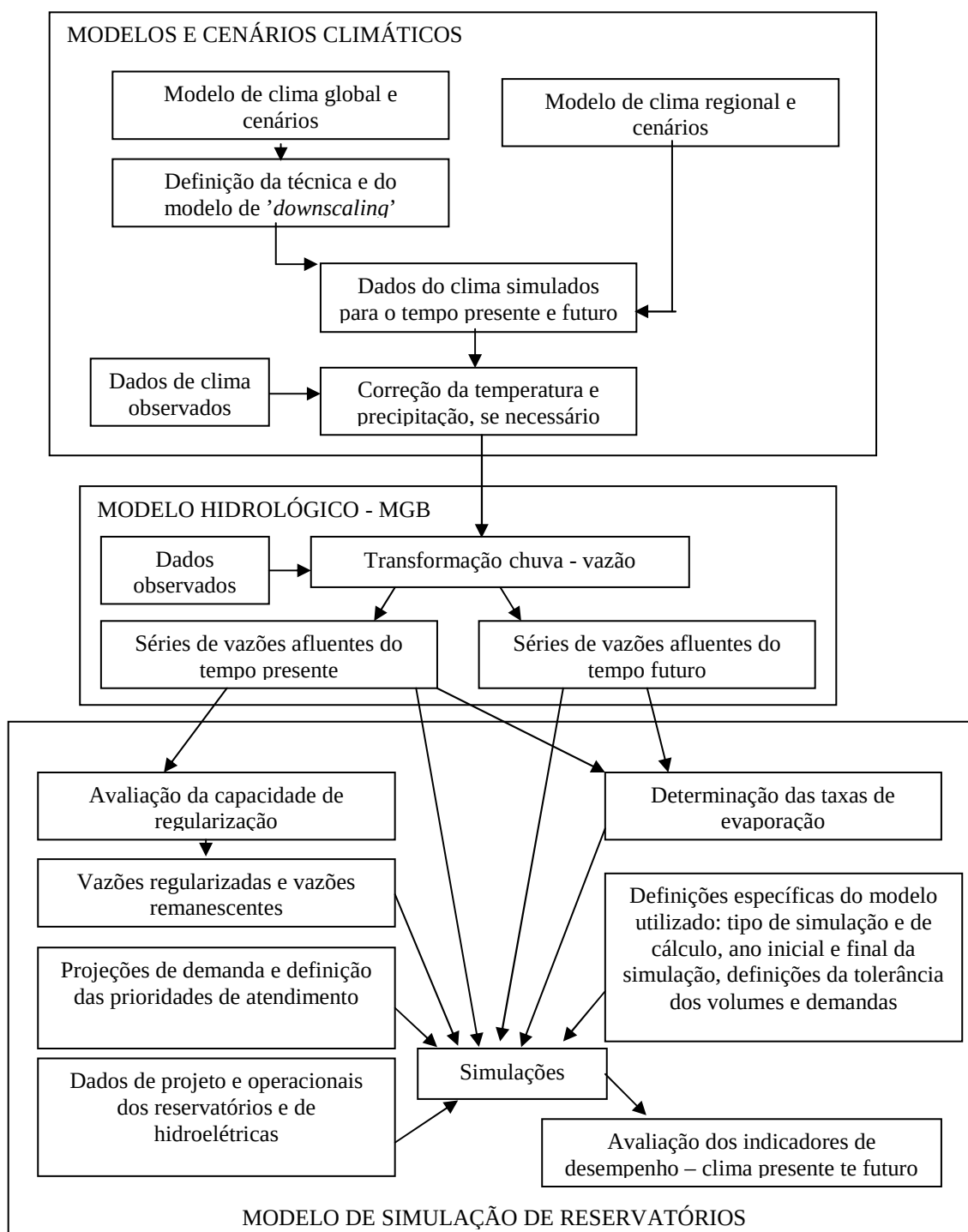


Figura 2: desenho da incorporação das mudanças climáticas no planejamento da bacia do rio Paraguaçu – adaptado de Genz (2011) e Silva *et al.* (2006)

SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O SISTEMA DE RESERVATÓRIOS NA BACIA DO RIO PARAGUAÇU

Os resultados obtidos com a simulação do sistema de reservatórios da bacia do Rio Paraguaçu utilizando o Acquanet são apresentados a seguir e eles têm influência das prioridades definidas para

cada uso. Buscou-se atender a legislação de Recursos Hídricos (Lei 9.433/07). Os usos para consumo humano e dessedentação animal tiveram prioridades iguais, porém inferiores à das vazões remanescentes. Por outro lado, as vazões para irrigação e para o setor industrial tiveram prioridades iguais, contudo inferiores àquela para consumo humano. A geração de energia elétrica teve prioridade inferior ao da irrigação, enquanto que a prioridade do volume meta dos reservatórios a montante de Pedra do Cavalo foram inferiores às demandas existentes nos reservatórios: consumo humano, dessedentação animal e irrigação. O atendimento ao volume meta do reservatório de Pedra do Cavalo teve prioridade inferior às das demandas para usos consuntivos e superior a demanda para geração de energia elétrica. O volume meta deste reservatório foi definido na cota de 113m, nível acima da qual é permitida a geração de energia elétrica. A prioridade máxima no atendimento das vazões remanescentes foi definida com base no conceito de caminhos suaves (BRANDES *et al.*, 2009; BROOKS & HOLTZB, 2009 e FARIA *et al.*, 2010), por priorizar o atendimento das necessidades do ecossistema e depois reduzir os usos humanos.

Os resultados obtidos para o índice de confiabilidade sem e sob efeito das mudanças climáticas para as demandas dos reservatórios da bacia do rio Paraguaçu estão apresentados na Figura 3. Devido a uma limitação dos resultados de saída AcquaNet (número de casas decimais) e, aos baixos valores das demandas nos reservatórios de Casa Branca (consumo humano) e Baraúnas (dessedentação animal) respectivamente, 0,001 e 0,005 m³.s⁻¹, não foi possível verificar o atendimento a essas demandas. Portanto, na Figura 3 não constam as confiabilidades obtidas para estas demandas.

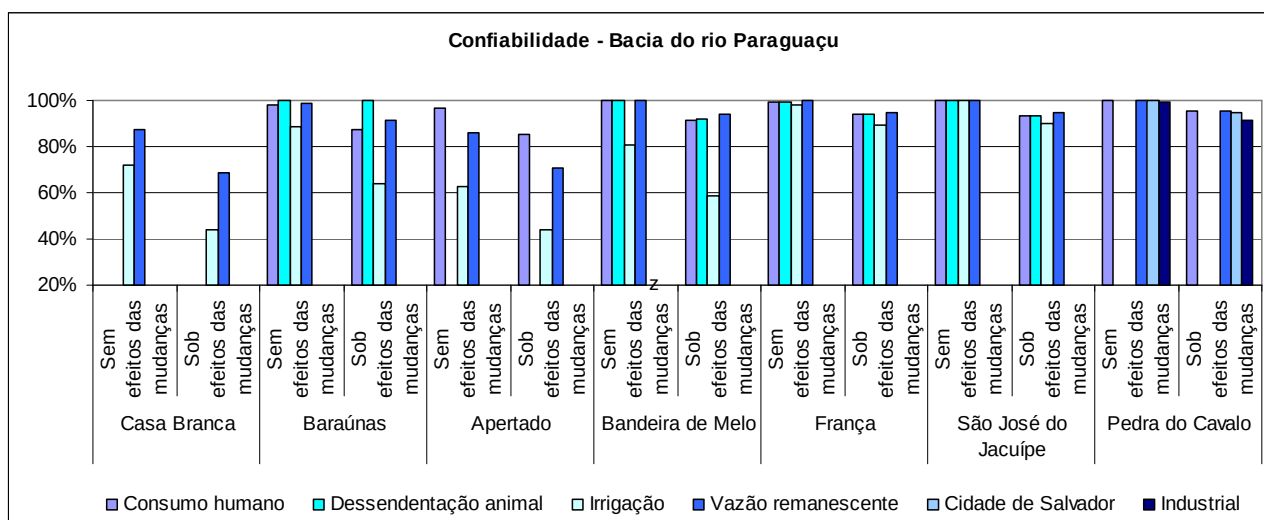


Figura 3: Índice de confiabilidade referente às demandas dos reservatórios da bacia do rio Paraguaçu

Os reservatórios de França, São José do Jacuípe e Pedra do Cavalo apresentaram os menores efeitos negativos em decorrência das mudanças climáticas (falhas nos atendimentos às demandas). Estes foram os únicos reservatórios em que as confiabilidades referentes às demandas no cenário de emissões A1B foram superiores a 89%. Isto ocorre também devido a proporção entre o somatório

das demandas em relação à capacidade de regularização de cada reservatório. Esta proporção para o ano de 2040 dos reservatórios de França, São José e Pedra do Cavalo representa 67%; 40% e 43%, respectivamente, enquanto que para Casa Branca, Apertado e Bandeira de Melo representa 123%, 206% e 147%, respectivamente. Casa Branca e Apertado apresentaram os maiores impactos, com redução da confiabilidade de cerca de 20% em relação a todas as demandas.

Dentre os setores usuários das águas do rio Paraguaçu a montante de Pedra do Cavalo, a irrigação foi o mais impactado pelas alterações devido as mudanças climáticas. As mudanças climáticas resultaram na redução drástica da confiabilidade do atendimento a irrigação nos reservatórios de Baraúnas de 89% para 64%; Casa Branca de 72% para 44%, Apertado de 63% para 44% e Bandeira de Melo de 80% para 58%.

Analisando os impactos sobre as vazões afluentes ao reservatório de Pedra do Cavalo por década (Figura 4), observa-se que enquanto a série de vazões sem efeito das mudanças climáticas apresenta-se crescente entre a 1ª e 2ª década e praticamente constante entre a 2ª e 3ª década, na série sob efeitos das mudanças climáticas esta tendência é decrescente. Comparando os resultados década a década entre as duas séries de vazões, observa-se, para o período de 2011 a 2021 que as mudanças climáticas promoveriam um aumento das vazões afluentes em 26%; enquanto entre 2021 e 2031 uma redução de 41% e entre 2031 a 2040 uma redução de 60%.

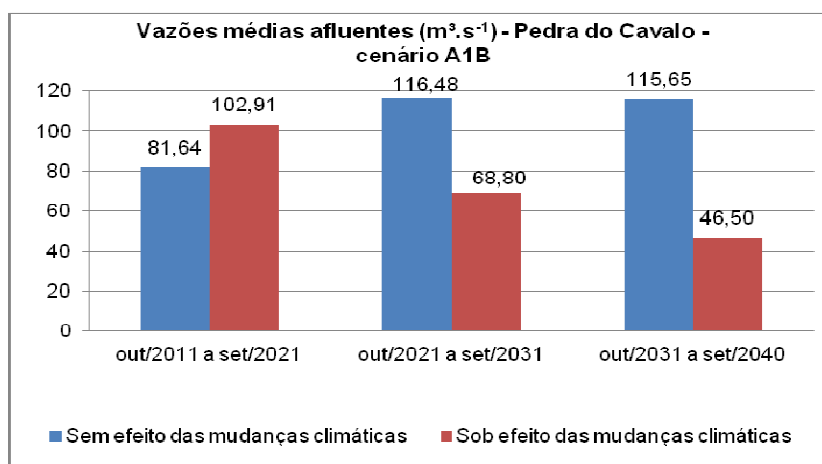


Figura 4: Efeitos das mudanças climáticas sob as vazões afluentes aos reservatórios da bacia do rio Paraguaçu, cenário A1B, período de 2011 – 2040

As diferentes características das séries de vazões estudadas influenciam os resultados dos índices de desempenhos, a exemplo da confiabilidade. Os resultados da análise da confiabilidade por década em relação ao atendimento das demandas do reservatório de Pedra do Cavalo são apresentados na Figura 5. Observou-se que no cenário sem efeitos das mudanças climáticas as falhas ocorrem concentradas na primeira década (2011 - 2021), enquanto no cenário sob efeito das mudanças climáticas as falhas ocorrem somente ao longo das duas últimas décadas.

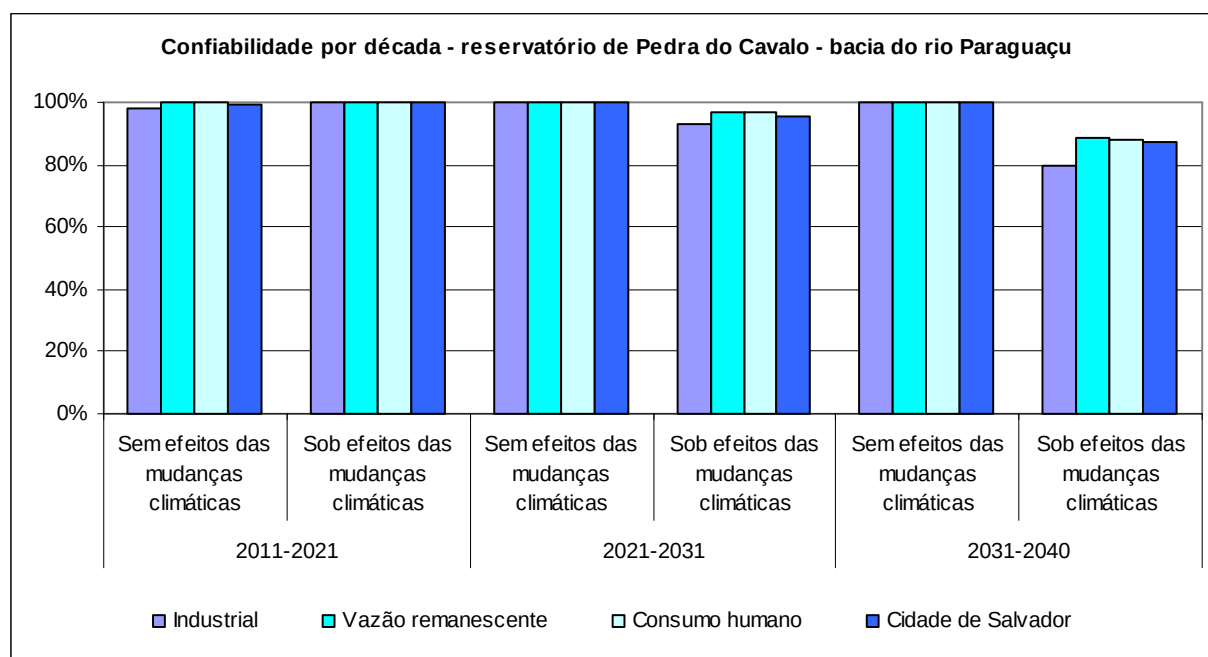


Figura 5: Índices de desempenho por década do atendimento às demandas dependentes do reservatório de Pedra do Cavalo por década

Assim, as falhas nos atendimentos às demandas dos usos consuntivos do reservatório de Pedra do Cavalo por década permitiu, na avaliação dos cenários propostos, verificar a dependência dos resultados dos indicadores à peculiaridade das séries das vazões afluentes. Portanto, caso fosse utilizado método de correção da precipitação ou tivessem sido geradas séries sintéticas das vazões para os cenários sem e sob efeitos das mudanças climáticas, cuja sequência dos dados não fosse exatamente aquelas simuladas (mesmo que fossem mantidas algumas características estatísticas, como a média e variância), os resultados do número de falhas e, consequentemente, dos demais índices de desempenho poderiam ser diferentes. Uma alternativa seria proceder a correção da precipitação observada com base nas alterações projetadas, mantendo igual a distribuição temporal das séries sem e sob efeito das mudanças climáticas, embora com magnitudes diferentes, e assim possibilitar uma avaliação mais direta dos resultados do índice de confiabilidade.

CONCLUSÃO

O trabalho buscou a inserção os efeitos das mudanças climáticas no gerenciamento dos recursos hídricos apresentando como estudo de caso a Bacia do Rio Paraguaçu. Nesta bacia utilizou-se do método de Planejamento de Cenários Tradicionais. Assim, foram feitas simulações no modelo de rede de fluxo AcquaNet. Este teve como dado de entrada dois conjuntos de séries advindas da saída do modelo hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH).

O Planejamento de Cenários Tradicionais foi constituído por dois critérios de disponibilidade: vazões afluentes sem e sob efeitos das mudanças climáticas, considerando os usos das águas da bacia e as projeções de demandas definidas em projeto, definidas por SETIN (200-) ou SEDUR

(2010). O primeiro conjunto de séries de vazões afluentes foram aquelas simuladas para o período de referência (1961 a 1990), enquanto a segunda refere-se ao cenário de mudanças climáticas (A1B). Neste foi utilizado o método regional Eta/CPTEC, cujas condições de contorno foram aquelas do modelo global HadCM3. Os dois conjuntos de séries de vazões foram simuladas *off-line*, uma vez que o modelo hidrológico não interage com o atmosférico.

A metodologia empregada na incorporação das mudanças climáticas no planejamento do sistema da bacia do rio Paraguaçu mostrou-se adequada na mensuração dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos e poderá ser utilizada para elaboração de planos de bacia de modo a buscar estratégias de mitigação e planejamento de adaptação do uso das águas. No entanto, é necessário buscar minimizar as incertezas aqui discutidas e incorporar outros possíveis cenários tanto de disponibilidade quanto de demanda futura. A utilização da metodologia proposta requer alguns cuidados quanto a:

- Escolha dos dados de clima e a metodologia *downscaling* a ser empregada de modo a compatibilizar a escala espacial de saída do modelo de clima com a do modelo chuva x vazão;
- A análise do período representativo de dados observados a ser utilizado como período de referência;
- Avaliação da necessidade de correção da precipitação e da temperatura;
- Definição do modelo hidrológico e respectiva transformação chuva x vazão;
- Avaliação da evolução das alterações do uso e cobertura do solo;
- Existência de cadastro atualizado de outorgas concedidas;
- Avaliação das projeções de demanda dos múltiplos usuários;
- Compatibilização da escala temporal das projeções de demanda em relação às projeções de disponibilidade;
- Avaliação de projetos de transposição de água para outra bacia ou para sistemas de produção ou abastecimento;
- Definição do modelo de avaliação de disponibilizada e demanda;
- Definição das taxas de evaporação, da capacidade de regularização e das vazões para outorga;
- Avaliação da precisão das saídas do modelo de rede de fluxo utilizado com as entradas das demandas de modo a ser possível a análise dos índices de desempenho;
- Seleção dos índices de desempenho a ser utilizado.

Assim, recomenda-se para a bacia do rio Paraguaçu, embora possa e deva ser considerada em qualquer bacia:

- Simulações no modelo de rede de fluxo utilizando séries de vazões determinadas por meio de simulações hidrológicas de outros cenários climáticos e/ou de outros modelos climáticos;
- Utilização de modelos de geração estocástica de séries sintéticas das vazões afluentes sem e com efeitos das mudanças climáticas;
- Projeção e simulação de outros cenários de demanda. Embora na presente pesquisa tenha sido trabalhada somente uma projeção de demanda seria interessante na composição dos cenários elaborar diferentes projeções de demanda, incluindo possibilidades de aumento e redução dos consumos dos diversos usuários, como aqueles elaborados por Vono *et al.* (2010);
- Incorporação das demandas de captação na calha do rio e compatibilização com a escala temporal das projeções de disponibilidade;
- Avaliação da alteração da capacidade de regularização do sistema de reservatórios decorrentes das mudanças climáticas e impactos nas vazões a serem outorgadas;
- Simulações do cenário utilizado na presente pesquisa ou de outros de modo a avaliar: a qualidade das águas e custos econômico-financeiros decorrentes de possíveis adaptações e/ou mitigações dos efeitos das mudanças climáticas;
- Simulações modificando uso e ocupação do solo, conforme já sinalizada em outros estudos;
- Análise para as outras fatias de tempo de modo a possibilitar ajustes contínuos nas estratégias de adaptação e/ou mitigação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, ao CNPq, ao CT Energ e Fapesb pelo apoio e bolsas concedidas.

BIBLIOGRAFIA

- ARNELL, Nigel W. 1998. *Climate Change and Water Resources in Britain*. Climatic Change 39: 83–110.
- BARBIERI, Alisson Flávio. Et. al. 200-. *Mudanças Climáticas, Migrações e Saúde: Cenários para o Nordeste Brasileiro, 2000-2050*.
- BARNETT, Tim. Et al. 2004. *The effects of climate change on water resources in the west: introduction and overview*. Climate Change, 62, 1–11.
- BONTE, Matthijs. ZWOLSMAN, John J.G. 2010. *Climate change induced salinisation of artificial lakes in the Netherlands and consequences for drinking water production*. Water Research. 44. 4411 e 4424.
- BOYER, Claudine. VERHAAR Patrick M. G. ROY, Andre. BIRON, Pascale M. MORIN, Jean. 2010 *Impacts of environmental changes on the hydrology and sedimentary processes at the*

- confluence of St. Lawrence tributaries: potential effects on fluvial ecosystems. *Hydrobiologia*. 647:163–183. DOI 10.1007/s10750-009-9927-1.
- GENZ, Fernando. TANAJURA, Clemente Augusto Souza. DE ARAÚJO, Heráclio Alves. 2011. *Impacto das mudanças climáticas nas vazões dos rios Pojuca, Paraguaçu e Grande – cenários de 2070 a 2100*. Bahia análise & dados, Salvador, v. 21, n. 24, p.807-823, out./dez. 2011. INSS 0103 8117.
- GIBSON, C. A. Et. al. 2005. *Flow Regime Alterations Under Changing Climate in Two River Basins: Implications for Freshwater Ecosystems*. *River Research and Applications*.v. 21, p. 849–864.
- HASHIMOTO, T., STEDINGER, J., LOUCKS, D. P. 1982. *Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation*. *Water Resources Research*. Vol. 18. N 1. P 14-26.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Climate change and water*. IPCC Technical Paper VI.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 94 p. Paris.
- KIRSHEN, Paul. RUTH, Matthias. ANDERSON. William. 2008. *Interdependencies of urban climate change impacts and adaptation strategies: a case study of Metropolitan Boston USA*. *Climatic Change*. 86:105–122.
- LOUCKS, D.P. 1997. *Quantifying trends in system sustainability*. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4): 513–530.
- MARENGO, José A. Et al (b). 2003. *Assessment of regional rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM*. *Climate Dynamic*. V.21, p.459-475.
- MARENGO, José A. Et al. 2011. *Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: Análise Conjunta Brasil-Reino Unido sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido.
- MARENGO, José A. 2007. *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*. Ministério do Meio Ambiente. Brasília. 2ª edição.
- MEANS III, Edward. Et al. 2010. *Decision Support Planning Methods: Incorporating Climate Change Uncertainties into Water Planning*. Water Utility Climate Alliance White Paper. United States.
- MEDEIROS, Yvonilde Dantas Pinto. Et al. 2004. *Relatório do Projeto Gerenciamento de Recursos Hídricos do Semi – Árido do Estado da Bahia. Subprojeto Sistema de Apoio a Decisão para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraguaçu*. Volume III. Capítulo 7. Salvador – Bahia.
- MELLER, A. ALLASIA. 2006. *Modelo Hidrológico da Bacia do Alto Paraguai*. Dissertação (Doutorado) Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 195p.
- MILLY, P. C. DUNNE, K. A. VECCHIA, A. V. 2005. *Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate*. *Nature*, v.438, 347-50.
- MOORE, Karen. Et al. 2008. *Effects of warmer world scenarios on hydrologic inputs to Lake Malaren, Sweden and implications for nutrient loads*. *Hydrobiologia*. 599:191–199.

- MYSIAK, Jaroslav. HENRIKSON, Hans Jorgen. SULLIVAN, Caroline. BROMLEY, John. Pahl-Wostl, Claudia. 2010. *The Adaptive Water Resource Management Handbook*. Earthscan, London, UK.
- NOBRE, Carlos A; SAMPAIO, Gilvan; SALAZAR, Luis. *Mudanças climáticas e Amazônia*. Cienc. Cult., São Paulo, v. 59, n. 3, Sept. 2007. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252007000300012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 Maio 2011.
- O'HARA, Jeffrey K. GEORGAKAKOS, Konstantine P. 2008. *Quantifying the Urban Water Supply Impacts of Climate Change*. Water Resour Manage. V. 22, p. 1477–1497.
- POLEBITSKI, Austin S. PALMER, Richard N. WADDELL, Paul. 2011. *Evaluating Water Demands under Climate Change and Transitions in the Urban Environment*. Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 137, Issue 3, p.249.
- PURKEY, David R. HUBER-LEE, Annette. YATES, David N. HANEMANN, Michael. HERROD-JULIUS, Susan. 2007. *Integrating a climate change assessment tool into stakeholder-driven water management decision-making processes in California*. Water Resour Manage. 21:315–329. DOI 10.1007/s11269-006-9055-x.
- PURKEY, David R. HUBER-LEE, Annette. YATES, David N. HANEMANN, Michael. HERROD-JULIUS, Susan. 2007. *Integrating a climate change assessment tool into stakeholder-driven water management decision-making processes in California*. Water Resour Manage. 21:315–329. DOI 10.1007/s11269-006-9055-x.
- RUTH, Matthias. BERNIER, Clark. JOLLANDS, Nigel. GOLUBIEWSKI, Nigel. 2007. *Adaptation of urban water supply infrastructure to impacts from climate and socioeconomic changes: the case of Hamilton, New Zealand*. Water Resour Manag 21:1031–1045.
- SALATI, Eneas. Et. al. 2007. *Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI*. Relatório 4 Tendências de Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI. Ministério do Meio Ambiente.
- SCHAEFFER, R. et. al. 2008. *Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil*. Rio de Janeiro RJ. Junho.
- SEDUR, Secretaria de Desenvolvimento Urbano da Bahia. 200-. *Estudos de Aproveitamento dos Mananciais da RMS – Revisão e Atualização das Proposições do Plano Diretor de Abastecimento de Água, Incluindo o rio Pojuca, e Visando o Uso Racional dos Recursos Hídricos Regionais - Estudo de Demandas*. Relatório 1100.11-REL. EST. DEMANDAS-00. 73p. Salvador.
- SETIN, Secretaria Municipal dos Transportes Urbanos e Infraestrutura de Salvador. 2010. *Plano Municipal de Saneamento Básico. 1ª Etapa – Diagnóstico da Situação do Saneamento Básico de Salvador: Serviços de Água e Esgotamento Sanitário*. Salvador. 260p.
- SILVA, Benedito Cláudio da. 2005. *Previsão Hidroclimática de Vazão para a Bacia do rio São Francisco*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA, Benedito Cláudio. COLLISCHONN, Walter. TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. CLARKE Robin Thomas. CORBO, Martin Delgado. 2007. *Previsão Hidroclimática de Vazão de Curto Prazo na Bacia do Rio São Francisco*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 12 n.3. P. 31-41.
- SILVA, Benedito Cláudio. TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. COLLISCHONN, Walter. 2006. *Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 11 n.3. P. 15-29.

TIEZZI, Rafael de Oliveira. 2009. *Impactos da variação pluviométrica associada às mudanças climáticas sobre a geração de energia hidrelétrica na Bacia do Alto Paranapanema*. Dissertação (Mestrado). Programa Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas.

VONO, Julie A. VOISIN, Nathalie. CUO, Lan. HAMLET, Alan F. ELSNER, Marketa McGuire. PALMER, Richard N. POLEBITSKI, Austin. LETTENMAIER, Dennis P. 2010. *Climate change impacts on water management in the Puget Sound region*, Washington State, USA. *Climatic Change*. 102:261–286.

VONO, Julie A. VOISIN, Nathalie. CUO, Lan. HAMLET, Alan F. ELSNER, Marketa McGuire. PALMER, Richard N. POLEBITSKI, Austin. LETTENMAIER, Dennis P. 2010. *Climate change impacts on water management in the Puget Sound region*, Washington State, USA. *Climatic Change*. 102:261–286.

WHITEHEAD, P. G. A. Et al. 2009. *Review of the Potential Impacts of Climate Change on Surface Water Quality*. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 54(1) February.

WILEY, Matthew W. PALMER, Richard N. 2008. *Estimating the Impacts and Uncertainty of Climate Change on a Municipal Water Supply System*. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 239 – 246p.