

Metodologia para Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas na Demanda de Água para a Agricultura Irrigada em Nível de Bacia Hidrográfica



ISSN 2179-8184
Setembro, 2011

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroindústria Tropical
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Documentos 140

Metodologia para Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas na Demanda de Água para a Agricultura Irrigada em Nível de Bacia Hidrográfica

*Rubens Sonsol Gondim
Aline de Holanda Nunes Maia
Sílvio Roberto Medeiros Evangelista
Marco Aurélio Holanda de Castro
Sérgio César de França Fuck Júnior*

Embrapa Agroindústria Tropical
Fortaleza, CE
2011

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agroindústria Tropical

Rua Dra. Sara Mesquita 2270, Pici

CEP 60511-110 Fortaleza, CE

Caixa Postal 3761

Fone: (85) 3391-7100

Fax: (85) 3391-7109

Home page: www.cnpat.embrapa.br

E-mail: vendas@cnpat.embrapa.br

Comitê de Publicações da Embrapa Agroindústria Tropical

Presidente: *Antonio Teixeira Cavalcanti Júnior*

Secretário-Executivo: *Antonio Marcos Nakayama*

Membros: *Diva Correia, Marlon Vagner Valentim Martins, Arthur Cláudio Rodrigues de Souza, Ana Cristina Portugal Pinto de Carvalho, Adriano Lincoln Albuquerque Mattos e Carlos Farley Herbster Moura.*

Revisão de texto: *Antonio Marcos Nakayama*

Normalização bibliográfica: *Rita de Cassia Costa Cid*

Editoração eletrônica: *Arião Nobre de Oliveira*

Fotos da capa: Rubens Gondim Sonsol

1ª edição

1ª impressão (2011): on-line

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Agroindústria Tropical

Metodologia para avaliação de impactos de mudanças climáticas na demanda de água para a aquicultura irrigada em nível de bacia hidrográfica / Rubens Gondim Sonsol... [et al.]. - Fortaleza : Embrapa Agroindústria Tropical, 2011.

40 p.; 29,7 cm. - (Documentos / Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 2179-8184, 140).

1. Mudança climática. Irrigação. 3. SIG. 4. Brasil - Semiárido. I. Gondim, Rubens Sonsol. II. Maria, Aline de Holanda Nunes. III. Evangelista, Silvio Roberto Medeiros. IV. Castro, Marco Aurélio Holanda de. V. Fuck Júnior, Sérgio César de França. VI. Série.

CDD 632.1

© Embrapa 2011

Autores

Rubens Sonsol Gondim

Engenheiro Agrônomo, D. Sc. em Recursos Hídricos, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE, rubens@cnpat.embrapa.br

Aline de Holanda Nunes Maia

Engenheira Agrônoma, D. Sc. em Agronomia, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, ahmaia@cnpma.embrapa.br

Sílvio Roberto Medeiros Evangelista

Estatístico, D. Sc. em Engenharia Elétrica, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP, silvio@cnptia.embrapa.br

Marco Aurélio Holanda de Castro

Engenheiro Civil, Ph. D. em Métodos Computacionais Aplicados a Engenharia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, marco@ufc.br

Sérgio César de França Fuck Júnior

Geógrafo, M. Sc. em Geografia, analista da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE, sergiofuck@cnpat.embrapa.br

Apresentação

Com as mudanças climáticas, a agricultura irrigada pode tornar-se mais intensa em demanda de água no semiárido. A melhoria no processo de gestão da água de irrigação em cada parcela causa impacto positivo na gestão do recurso hídrico na bacia, e por isso é de vital importância a capacitação continuada dos irrigantes para uso da água com vistas a elevar a eficiência de aplicação e armazenamento e possibilitar a disponibilidade para outros usuários.

A colaboração para construir o conhecimento sobre o assunto permitirá o desenvolvimento de políticas públicas a tempo de reduzir impactos e vulnerabilidades. A adaptação que vem recebendo progressiva atenção no desenvolvimento de políticas públicas, como um mecanismo complementar à mitigação, considera a habilidade de conviver ou absorver estresses ou impactos. Pode ocorrer de uma forma reativa ou antecipativa (adaptação preventiva).

Políticas públicas que reduzam pressões nos recursos, que melhorem o gerenciamento de riscos ambientais e aumentem o bem-estar podem simultaneamente avançar na equidade e no desenvolvimento sustentável, fortalecendo a capacidade adaptativa e reduzindo vulnerabilidades da agricultura ao clima.

Vitor Hugo de Oliveira

Chefe-Geral da Embrapa Agroindústria Tropical

Sumário

Introdução.....	9
Mudanças climáticas – aspectos conceituais.....	10
Modelos de circulação global e regional	11
Climatologia de base do modelo (condições iniciais).....	12
Construção de cenários.....	13
Cenários de emissões de gases de efeito estufa para projeções climáticas	14
Incertezas das mudanças climáticas.....	16
Redução de escala como método para aumento de resolução de modelos climáticos	17
Integração de modelos visando à análise de impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação em nível de bacia hidrográfica.....	17
Projeções climáticas e análise de impactos	24
Análise de sensibilidade e identificação de medidas adaptativas e mitigadoras	27
Considerações.....	37
Referências	38

Metodologia para Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas na Demanda de Água para a Agricultura Irrigada em Nível de Bacia Hidrográfica

Rubens Sonsol Gondim

Aline de Holanda Nunes Maia

Sílvia Roberto Medeiros Evangelista

Marco Aurélio Holanda de Castro

Sérgio César de França Fuck Júnior

Introdução

A demanda hídrica está em constante incremento devido ao aumento populacional e desenvolvimento econômico. Temperaturas mais elevadas em decorrência de mudanças climáticas intensificam a evapotranspiração das plantas e, conseqüentemente, a demanda de água para irrigação. Os impactos das mudanças climáticas nas vazões e recarga de aquíferos variam regionalmente. As projeções de impactos, por sua vez, dependem dos cenários de emissão de gases de efeito estufa. A alteração da vazão dos cursos de água pode também resultar em alterações na qualidade da água. Assim, mudanças climáticas podem afetar substancialmente quantidade e qualidade de água requerida para irrigação, que depende de como a evaporação e precipitação irão se comportar (IPCC, 2001).

A demanda de água para agricultura, particularmente para irrigação, é considerada mais sensível às mudanças climáticas que as demandas industrial e municipal. Há dois efeitos potenciais: uma mudança do clima em escala de parcela irrigada pode alterar a necessidade e a época de irrigação. Secas prolongadas podem levar ao aumento de demanda, mas esta também pode ser reduzida se a precipitação e, conseqüentemente, a umidade do solo aumentar (IPCC, 2001).

Apesar da importância do assunto ser um consenso, os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação têm sido pouco estudados no Brasil, principalmente porque Modelos de Circulação Global, largamente utilizados para simular cenários climáticos futuros, são geralmente inadequados para gerar projeções de mudanças climáticas em escalas locais. Binder (2006) recomendou maior detalhamento das projeções de mudanças climáticas para a escala de bacia hidrográfica, que, uma vez integradas a modelos hidrológicos, possibilitam o estudo de impactos das mudanças climáticas em recursos hídricos.

A agricultura irrigada influencia diretamente a disponibilidade da água numa bacia hidrográfica, especialmente numa região onde essa atividade é intensiva. O conhecimento local sobre o impacto de mudanças climáticas na demanda de água para irrigação fornecerá diretrizes para o desenvolvimento de políticas para redução de impactos e vulnerabilidades. Perdas sociais, econômicas e ambientais causadas por planejamento deficiente e ausência de critérios de decisão para definir medidas de mitigação e adaptação comprometeriam a equidade de acesso e sustentabilidade do uso da água.

Dentre os relevantes trabalhos de mudanças climáticas e impactos na demanda de água para irrigação citados neste Documento, notadamente os de Silva et al. (2007) e Díaz et al. (2007), a metodologia aqui proposta difere das disponíveis na literatura especializada, devido à utilização de Modelo de Circulação Global submetido a técnicas de redução de escala dinâmica, aplicado em nível de bacia hidrográfica, considerando-se dados reais da área irrigada e da tecnologia empregada, assim como respectiva eficiência de aplicação de água na irrigação e o padrão de cultivo mensal da região. Adicionalmente, o emprego da análise de sensibilidade junto aos resultados fornece respostas diferenciadas sobre o tema.

O objetivo desta publicação é discutir e apresentar uma abordagem metodológica para quantificação de impactos de mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação, em nível de bacia hidrográfica, integrando projeções de cenários climáticos futuros, um modelo de demanda hídrica e informações locais sobre culturas e métodos de irrigação.

Mudanças Climáticas – Aspectos Conceituais

Mudanças climáticas referem-se a um conjunto de alterações no estado do clima que tanto podem ser identificadas por variações nas médias como na variabilidade das propriedades do clima; tais alterações persistem por um período extenso, tipicamente décadas ou mais. Podem ocorrer devido a processos internos e/ou forçantes externas. Algumas influências externas, tais como radiação solar e vulcanismo, ocorrem naturalmente e contribuem para a variabilidade total natural do sistema climático. Outras mudanças externas que se intensificaram com a revolução industrial, como a composição da atmosfera, são resultantes das atividades humanas (antropogênicas). Hegerl et al. (2007) chamam atenção para o entendimento de que as mudanças resultam de forçantes externas antropogênicas e se diferenciam das naturais e, como tal, podem ser distinguidas das mudanças e variabilidades naturais que resultam de processos internos do sistema climático.

A variabilidade interna está presente em todas as escalas de tempo. Processos atmosféricos que geram variabilidade interna são conhecidos por operarem em escalas de tempo, variando do instantâneo até vários anos. Componentes que produzem variabilidade interna como os oceanos e grandes lençóis de gelo tendem a operar em escalas temporais mais longas. Adicionalmente, a variabilidade interna é também produzida pela combinação de componentes, como, por exemplo, o fenômeno *El Niño* - Oscilação Sul (ENOS) (HEGERL et al., 2007).

Há um razoável consenso entre os cientistas de que o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera aumenta a temperatura global (CARTER et al., 2007). Emissões futuras desses gases são produtos de um sistema dinâmico (processo ou conjunto de processos, cuja evolução no tempo é governada por um conjunto determinístico de leis físicas) muito complexo, determinado por forçantes, quais sejam: crescimento demográfico, desenvolvimento sócio-econômico e mudanças tecnológicas. Cenários climáticos são representações do futuro que são consistentes com hipóteses sobre emissões futuras de gases de efeito estufa e outros poluentes, considerando-se as forçantes que os influenciam (NAKICENOVIC et al., 2000).

A distinção entre os efeitos de influências externas e a variabilidade climática interna requer uma comparação cuidadosa entre as alterações resultantes de uma forçante externa (mudanças climáticas forçadas) e aquelas que são esperadas em decorrência da variabilidade interna. Essas expectativas são baseadas na compreensão física do sistema climático. O entendimento desse processo pode ser representado por modelos conceituais ou quantificado via modelos climáticos. Um arranjo de modelos climáticos é utilizado para quantificar expectativas neste sentido, variando de simples modelos de balanço de energia para modelos de complexidade intermediária, até modelos acoplados, tais como combinações de modelos oceânicos e atmosféricos (HEGERL et al., 2007).

A comparação entre mudanças observadas e aquelas que são naturalmente esperadas é realizada de várias maneiras. Detecção formal e atribuição recorrem a métodos estatísticos para pesquisar se dados climáticos observados contêm evidência de respostas esperadas a forçantes externas, as quais são diferentes da variação gerada dentro do sistema climático (variabilidade natural interna). Esses métodos não se limitam a simples análises lineares ou de tendências, mas abrangem a identificação de respostas observadas a uma ou várias forçantes, por meio da exploração do padrão temporal e espacial das respostas esperadas (HEGERL et al., 2007).

Detecção é o processo de demonstração de que o clima mudou em algumas de suas propriedades, utilizando-se dados empíricos, sem a justificativa para a mudança, considerando-se que a variabilidade interna sozinha é considerada pequena. Atribuição das causas das mudanças climáticas é o processo de estabelecimento das causas mais prováveis para a mudança detectada com determinado nível de confiança. Uma atribuição inequívoca requereria experimentação controlada do sistema climático. Como isso não é possível, a atribuição de mudanças climáticas de causa antropogênica é compreendida como a demonstração de que uma mudança detectada é consistente com respostas estimadas para uma dada combinação de forçantes naturais e antropogênicas e não consistente com explicações físicas plausíveis (HEGERL et al., 2007).

A detecção de influência antropogênica não é ainda possível para todas as variáveis climáticas, pois ainda existem incertezas devido a dificuldades na avaliação, apesar dos avanços da pesquisa. Algumas variáveis respondem menos fortemente a forçantes externas ou são menos plausíveis de ser modeladas ou observadas (HEGERL et al., 2007).

Modelos de Circulação Global e Regional

Os Modelos de Circulação Global (GCMs), geralmente utilizados para simular o clima presente e projetar o clima futuro com forçantes de gases de efeito estufa e aerossóis, tipicamente dividem a atmosfera e oceano em grades de resolução horizontal de 2 a 4 graus de latitude e longitude com 10 a 20 camadas na vertical. Em geral, a maioria dos GCMs simulam processos na escala global ou continental em detalhe e proveem uma representação de precisão razoável da média climática planetária (DIBIKE; COULIBALY, 2004a; 2004b; 2005). Por outro lado, os GCMs são incapazes de representar características locais.

Modelos climáticos são baseados em princípios físicos bem estabelecidos, e deve-se demonstrar que sejam capazes de reproduzir características de clima recente e mudança climática passada. Há considerável confiança de que Modelos de Circulação Global Oceânico-Atmosférico proveem estimativas quantitativas aceitáveis das mudanças climáticas futuras, particularmente na escala continental ou maior.

Modelos numéricos representando processos físicos na atmosfera, oceano, criosfera e superfície da Terra (Modelos de Circulação Global) são as mais avançadas ferramentas disponíveis para simular a resposta do sistema climático global ao aumento da concentração de gases de efeito estufa. Enquanto modelos mais simples também têm sido utilizados para prover estimativas globais e regionais da resposta do clima, apenas os GCMs, geralmente em conjunto com modelos regionais aninhados (acoplados) ou outros métodos de redução de escala, possuem potencial para prover estimativas física e geograficamente consistentes de mudanças climáticas regionais (IPCC 1994, citado por CARTER et al., 2007).

Os Modelos de Circulação Global representam o clima utilizando uma malha de quadrículas tridimensionais sobre o globo, tipicamente possuindo uma resolução horizontal entre 250 km e 600 km, 10 a 20 camadas verticais na atmosfera e algumas vezes 30 camadas nos oceanos. Sua resolução é um tanto grosseira, em relação à escala da maioria dos trabalhos de avaliação de impactos (CARTER et al., 2007).

Além do mais, muitos processos físicos, tais como aqueles relacionados a nuvens, também ocorrem em escalas menores e não podem ser adequadamente modelados. Em vez disso, suas propriedades conhecidas devem ser estimadas sobre a escala maior, por meio de técnicas conhecidas, como parametrização. Essa é uma fonte de incerteza em simulações do clima futuro baseadas em GCMs. Dessa forma, diferentes GCMs podem projetar respostas bem diferentes para uma mesma forçante, simplesmente pelo modo como certos processos e respectivas respostas são modelados (CARTER et al., 2007).

Como os modelos climáticos têm evoluído, e a potência computacional aumentado, vem ocorrendo uma tendência de aumento da resolução espacial das projeções. Alguns GCMs antigos operavam numa resolução horizontal de cerca de 1.000 km com 2 a 10 níveis na vertical. Modelos mais recentes são processados com aproximadamente 250 km de resolução espacial com talvez 20 níveis verticais (>20 em alguns modelos oceânicos). Entretanto, embora modelos de maior resolução contenham mais detalhes espaciais (como topografia, melhor definição de bordas terra/mar etc.) isto não necessariamente garante um desempenho superior do modelo (CARTER et al., 2007).

Em simulações de mudanças climáticas, modelos são utilizados para gerar projeções de possíveis alterações em escala de tempo de muitas décadas. O grau de confiança num modelo pode ser adquirido por simulações de registros históricos, comparando-se dados simulados com dados observados. Não há como fazer testes diretamente, para avaliar a qualidade das projeções, uma vez que não há períodos de observação suficientes de mudanças forçadas exatamente como aquelas esperadas para o século 21. O grau de confiança nessas estimativas é maior para algumas variáveis climáticas, como temperatura, do que para outras, como precipitação (RANDALL et al., 2007).

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (INTERGOVERNAMENTAL... 2007) projetou, utilizando 23 Modelos de Circulação Global, mudanças de temperatura para 2090-2099, em relação àquelas de 1980 a 1999, variando de 0,3 °C – 0,9 °C (cenário de concentração de carbono na atmosfera constante ao do ano 2000) a 2,4 °C – 6,4 °C. O padrão de precipitação projetado é *bastante provável* de aumentar para latitudes altas, enquanto reduções são *prováveis* de ocorrer na maioria das regiões subtropicais.

Incertezas no processo de detecção e atribuição das mudanças climáticas ainda perduram. Algumas forçantes ainda são omitidas nos estudos, tais como aerossóis carbonáceos e mudanças no uso e ocupação da terra. Entretanto, análises de detecção e atribuição de mudanças climáticas atribuem significativa influência antropogênica para a temperatura no século 20. Outra fonte de incertezas são erros de instrumentação, tais como métodos de medição ou influência da urbanização (HEGERL et al., 2007).

Climatologia de Base do Modelo

A climatologia de base (*baseline*) ou de referência pode ser definida como aquela em relação a qual a mudança é mensurada, o que torna a caracterização climática da região em algo de suma importância para estudos de impactos de mudanças climáticas. A escolha da climatologia de base e dos cenários pode fortemente influenciar nos resultados. Um dos critérios de avaliação da qualidade do Modelo de Circulação Global é a avaliação de sua performance em simular o clima presente na região. Isso pode ser realizado comparando-se a climatologia de base do modelo com dados da região, determinando-se, assim, a habilidade do modelo climático em simular padrões de circulação (CARTER et al., 2007).

Questões a serem consideradas na seleção da climatologia de base incluem tipos de dados requeridos, duração do período de referência, fontes de dados e como eles podem ser aplicados na avaliação de impactos.

Conforme recomendações do IPCC (1994) citadas por Carter et al. (2007), a climatologia de base do modelo deve ser selecionada de acordo com os critérios abaixo:

- Seja representativa do clima atual ou englobe médias recentes da região de estudo.
- Tenha uma duração que abranja as variações climáticas, incluindo um número significativo de anomalias climáticas (como secas severas ou estações amenas).
- Cubra um período para o qual sejam abundantes os dados da maioria das variáveis climáticas, adequadamente distribuídos sobre o espaço e prontamente disponíveis.
- Inclua dados de alta qualidade para uso em avaliações de impactos.
- Seja consistente e prontamente comparável com climatologias de base utilizadas em outros estudos de impactos.

Uma climatologia de base bem conhecida é a normal climatológica de um período de 30 anos, conforme definida pela Organização Mundial de Meteorologia, a qual pode ser utilizada como de referência ou padrão. Há um número de fontes alternativas de dados de climatologia de base que podem ser aplicadas em estudos de impactos: agências ou arquivos de meteorologia, conjunto de dados globais, saídas de modelos climáticos e geradores climáticos. Um dos conjuntos de dados disponíveis de domínio público é do *Climate Research Unit* (CRU) (CARTER et al., 2007).

Há dois tipos de informações oriundas de modelos de clima global que podem ser úteis na descrição da climatologia de base: reanálise dos dados e saídas das simulações dos modelos de circulação global ou regional. A reanálise de dados é um processo em que dados de resolução fina são gerados pela combinação de dados observados com simulados oriundos de modelos numéricos. Esse processo é conhecido como “assimilação”. Saídas das simulações dos modelos de circulação global ou regional é outra fonte de informação do clima presente. Tais simulações concentram-se em representar a dinâmica do sistema climático global não forçado por mudanças antropogênicas na composição da atmosfera. Para algumas regiões e em algumas escalas temporais, esses modelos estimam a variabilidade natural de forma bastante semelhante com a observada (TETT et al., 1997 citado por CARTER et al., 2007).

Uma vez que registros de observações climáticas globais mal se estendem a um século de duração, simulações de controle dos modelos oferecem uma fonte alternativa de dados que possibilitam investigação da variação multidecadal do clima. Simulações de controle de diversos modelos oceânico-atmosférico de circulação global são disponíveis na página eletrônica do IPCC (*Data Distribution Centre*) (CARTER et al., 2007).

Uma das formas de selecionar, validar a utilização de um modelo de circulação global na construção de cenários regionais de mudanças climáticas é pela avaliação do desempenho do modelo em simular o clima presente na região. Essa avaliação é feita comparando-se as projeções retrospectivas (*hindcasts*) do modelo com dados observados (CARTER et al., 2007).

Construção de Cenários

Atualmente, diversos grupos de tomadores de decisão, consultores e pesquisadores desenvolvem e utilizam cenários de diversas formas. Pode-se definir como sendo descrições de possibilidades futuras que refletem diferentes perspectivas no passado, presente e futuro (NOTTEN et al., 2003).

Ainda segundo Notten et al. (2003), há três temas de alcance para classificação da tipologia de cenários que contemplam os aspectos chaves para seu desenvolvimento: i. *objetivos do projeto* – descrevendo-os, bem como demandas futuras; ii. *suporte à decisão*: devem propor opções estratégicas concretas; iii. *processo de construção*: envolve aspectos como o tipo de dados quantitativos e qualitativos utilizados, ou a escolha de envolvimento do público com encontros, entrevistas ou questionário.

Notten et al. (2003) enumeram diversas características de cenários. Dentre elas, destacam-se: a inclusão de esboço normativo; predição e antecipação; possibilidade de explorarem uma área geográfica particular; variação numa escala temporal de curto a longo prazo, e numa escala espacial que integre multiescala (global para regional ou local para global); e definição de metodologia de coleta de dados (abordagem participativa). Segundo os autores, um cenário deveria distender o pensamento sobre o futuro, numa larga variação de alternativas possíveis (um alto grau de derivação é um pré-requisito para o desenvolvimento de cenários). O cenário convencional adere ao status quo ou a tendências atuais. O nível de integração de um cenário refere-se ao grau de como componentes relevantes ao sujeito de um estudo são incorporados para formar um conjunto no cenário. Demonstram um alto grau de interação entre as variáveis e sua dinâmica; entretanto, a introdução de muitos elementos pode deteriorar o poder de comunicação.

Os pontos de partida para o desenvolvimento participativo dos cenários de recursos hídricos, numa perspectiva de mudanças climáticas, fundamentam-se nos postulados utilizados por Aerts e Droogers (2004):

- É a gestão de recursos hídricos, tanto em nível de bacia, como em nível local (parcela irrigada) que lida com a implementação de medidas adaptativas para lidar com condições climáticas alteradas.
- O sistema de recursos hídricos provê bens e serviços que são gerenciados de forma que valores atuais e futuros sejam otimizados em relação aos objetivos da política de gerenciamento de recursos hídricos.
- Os bens e serviços são funções do estado do sistema de recursos hídricos, expressos em termos de disponibilidade hídrica e qualidade da água.
- Mudanças climáticas são vistas como uma influência exógena no sistema local de recursos hídricos.
- Medidas adaptativas na bacia devem permitir a avaliação de estratégias potenciais, na base de um conjunto de critérios ou indicadores (de estado e de decisão) que se relacionam com os objetivos e metas das políticas locais.
- A fim de se identificarem todos os indicadores relevantes e capturar o potencial de adaptação, deve-se permitir a participação ativa do público envolvido (*stakeholders*).

Segundo Aerts & Droogers (2004), o ponto de partida para desenvolvimento de cenários considerará que o sistema de recursos hídricos pode ser visto como um sistema produtivo que provê bens e serviços, tanto para a população como para o ecossistema. Esses bens e serviços podem ser de quatro categorias: i) água para agricultura; ii) água para indústria; iii) água para a natureza; iv) água para a população. Assume-se que esses bens e serviços relacionam-se diretamente com o estado do sistema de recursos hídricos (disponibilidade hídrica e qualidade da água).

A abordagem no contexto do sistema de recursos hídricos numa bacia hidrográfica pode ser dividida em cinco partes: i) *forçantes*, tais como crescimento populacional, crescimento econômico e mudanças climáticas que atuam sobre: ii) *pressões*: atividades ou poluentes resultantes da influência das forçantes. Essas pressões causam alterações no: iii) *estado do sistema de recursos hídricos*: expresso em termos de indicadores que quantificam uma mudança, ou seja, os: iv) *impactos*: que podem induzir a uma: v) *resposta* (AERTS; DROOGERS, 2004).

Jessel & Jacobs (2005) relatam que a modelagem de cenários aponta para todas as consequências de longo prazo imagináveis, criando exemplos para o público de interesse (*stakeholders*), além de permitir a integração de diferentes disciplinas e metodologias.

Westhoek et al. (2006) afirmam que, para se determinarem os tipos de cenários, consideram-se *otimização de políticas, visão construída e orientação estratégica*. Tipicamente, são construídos a partir do cenário de base ou de referência (o de sempre, sem mudanças). A visão construída considera o futuro desejado ou alternativamente o que queremos evitar, de qualquer maneira; a orientação estratégica questiona que alternativas, em nossos papéis específicos, precisam ser preparadas para nós, o que fazer se tal direção é errada ou muito arriscada, considerando o ponto de vista do ator.

Para um cenário de orientação estratégica, Westhoek et al. (2006) levantam que é extremamente recomendável o uso de um conjunto de cenários contrastantes, considerando-se a direção de importantes fatores forçantes (pode ser crescimento macroeconômico, demografia, produção e consumo agrícola mundial e seus preços, tecnologia). Os cenários devem ter compromisso com política de biodiversidade, agrícola, legislação ambiental, uso legal da terra e mobilidade. Pode começar com uma matriz especificando visões mundiais ou paradigmas de desenvolvimento.

Num cenário de uso e ocupação do solo, por exemplo, o possível conflito com requerimentos legais e padrões de qualidade ambiental é considerado, assim como as características sócio-econômicas de uma região, considerando-se política agrícola, ambiental e fisiografia regional. Jesse & Jacobs (2005) desenvolveram cenários para servirem de ferramenta na gestão de recursos hídricos na bacia do Rio Havel, Alemanha, considerando as opções e estratégias para ação, o desenvolvimento futuro de áreas de assentamento, o futuro de reflorestamento e aproveitamento das florestas e o abandono de áreas cultiváveis. Os cenários de uso e ocupação do solo foram requisitados como uma “entrada” da modelagem hidrológica.

Cenários de Emissões de Gases de Efeito Estufa para Projeções Climáticas

O processo de detecção e atribuição de mudanças climáticas envolve experimentos com cenários idealizados, isto é, aumento de dióxido de carbono (CO₂) em simulações de elevação da concentração. Equilíbrio em níveis atmosféricos de 2 x CO₂ e 4 x CO₂, por exemplo.

Nakicenovic et al. (2000) definiram uma família de cenários de emissões que foram elaborados a partir das seguintes premissas:

A1: Baixo crescimento populacional, crescimento do PIB muito elevado, elevado consumo de energia, baixa mudança no uso da terra, disponibilidade de recursos de alta a média, rápido desenvolvimento tecnológico, energia fóssil e balanceada.

A2: Alto crescimento populacional, crescimento do PIB médio, elevado consumo de energia, mudança de média a alta no uso da terra, disponibilidade de recursos baixa, lento desenvolvimento tecnológico, energia regional.

B1: Baixo crescimento populacional, crescimento do PIB elevado, baixo consumo de energia, alta mudança no uso da terra, baixa disponibilidade de recursos, médio desenvolvimento tecnológico, eficiência e introdução de tecnologias limpas.

B2: Médio crescimento populacional, crescimento do PIB médio, médio consumo de energia, média mudança no uso da terra, disponibilidade média de recursos, médio desenvolvimento tecnológico, dinâmica energética como a usual.

Para geração das projeções de mudanças climáticas no século 21, um subconjunto de três cenários do IPCC *Special Report on Emission Scenarios* – SREs (NAKICENOVIC et al., 2000) dos seis mais comumente usados foram utilizados para o relatório IPCC (2007) com projeções simuladas para 2100:

- A1B: com todos os componentes atmosféricos fixados em valores observados no ano 2000 e são geradas projeções para 100 anos adicionais.
- B1: com componentes atmosféricos fixados em 2100 e são geradas projeções para 100 anos adicionais.
- A2: com componentes atmosféricos fixados em 2100 e são geradas projeções para 200 anos adicionais.

Esses cenários representam média, baixa e alta concentração de CO₂, respectivamente. Essa escolha resultou de limitações computacionais, não representando preferência ou qualificação dos cenários escolhidos sobre outros. Representam cenários de forçantes antropogênicas não mitigadas (MEEHL et al., 2007). O resultado demonstrou aquecimento comparável ao relatório do IPCC (2001) de + 3,0 °C para os anos de 2071 a 2100, em relação a 1961 a 1990 e + 3,13 °C para 2080 a 2099 em relação a 1980 a 1999. O aquecimento é maior no cenário A2, intermediário no crescimento moderado A1B e baixo no crescimento pequeno B1. A precipitação global média aumenta em todos os cenários, indicando uma intensificação do ciclo hidrológico.

Considerando-se as projeções regionais, está prevista redução de precipitação para grandes áreas do Nordeste do Brasil e Amazônia. O aquecimento no cenário A1B entre 1980 a 1999 e 2080 a 2099 é da ordem de 1,8 °C a 5,1 °C, com média de 3,3 °C para o norte da América do Sul (incluindo Amazônia e Nordeste do Brasil), com previsão para aquecimento maior nos meses de Junho, Julho, Agosto (JJA) do que para Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF) (CHRISTENSEN et al., 2007).

As mudanças climáticas dependem das forçantes de emissões de gases de efeito estufa e aerossóis para a atmosfera, tais como aumento de população, intensidade de emissão de carbono das fontes de energia, emissões sulfúricas, modalidade de crescimento econômico, desenvolvimento tecnológico. Os cenários A1 e B1 consideram as mesmas projeções populacionais, assumindo-se baixas taxas de fertilidade e de mortalidade. O cenário A2 assume alta fertilidade e alta mortalidade, e o cenário B2 é intermediário. É frequente na literatura a simulação da demanda de água para os cenários B2 e A2 que consideram uma população global futura entre 8,93 e 10,71 bilhões de habitantes e demais hipóteses de projeções futuras do Produto Interno Bruto (PIB), energia primária, emissões cumulativas de CO₂ e uso da terra, conforme a Tabela 1 (NAKICENOVIC et al., 2000).

Tabela 1. Hipóteses de projeções futuras para 2040 nos cenários A2 e B2.

2040	A2	B2
População (milhões)	10.715	8.930
PIB (Trilhões de US\$ a preços de 1990)	72,3 a 82,2	85,5 a 93,2
Energia Primária (EJ)	871	773
Carvão	211	93
Óleo	244	238
Gás	208	251
Nuclear	34	32
Biomassa	97	79
Outras Renováveis	77	80
Emissões cumulativas (GtCO ₂)	530,7	446,0
Uso da Terra (milhões de ha)	12.949	12.949
Cultivos	1.623	1.598
Pastagens	3.546	3.508
Biomassa	252	190
Florestas	4.307	4.323
Outros	3.220	3.300

Fonte: IPCC-SRES (NAKICENOVIC et al, 2000).

Incertezas das Mudanças Climáticas

Jones et al. (2004) alertam para as incertezas nos principais passos na avaliação de impactos de mudanças climáticas, por meio da aplicação de diferentes cenários. Tais incertezas devem ser consideradas nas opções de avaliação de impactos e vulnerabilidade, bem como de adaptação às mudanças climáticas. Embora ainda não possam ser quantificadas, podem ser apontadas as seguintes fontes de incertezas:

- Incertezas sobre emissões futuras: há incertezas nas hipóteses-chave sobre a relação entre população futura, desenvolvimento sócio-econômico e mudanças tecnológicas que fazem a base dos cenários do IPCC, elaborados por Nakicenovic et al. (2000). Esse tipo de incerteza pode ser aceita, fazendo-se projeções climáticas para uma gama de cenários de emissões que cubra maior parte da amplitude da incerteza. Carter et al. (2007) recomenda o uso e elaboração de múltiplos cenários. As emissões são atualmente consideradas uma das duas maiores fontes de incertezas das projeções climáticas futuras.
- Incertezas nas concentrações futuras: o entendimento imperfeito de alguns processos físicos no ciclo do carbono e reações químicas na atmosfera geram incertezas na conversão das emissões para concentrações de gases. Uma incerteza potencialmente maior é a questão do clima, ciclo de carbono e química atmosférica. A fim de refletir essa incerteza nos cenários climáticos, torna-se necessário o uso de Modelos de Circulação Global Oceânico-Atmosférico (AOGCMs) que explicitamente simulem o ciclo do carbono e química de todas as substâncias presentes.
- Incertezas na resposta climática: existem lacunas de conhecimento sobre diversos processos do sistema climático e incertezas surgem por descrição incorreta ou incompleta de processos-chave e suas respectivas implicações nos prognósticos dos modelos. Tal realidade é ilustrada pelo fato de que atualmente GCMs que contêm representações diferentes do sistema climático projetam diferentes padrões e magnitudes de mudanças climáticas para o mesmo período futuro, para um mesmo cenário de concentrações de gases de efeito estufa. Essa é considerada a maior fonte de incertezas, juntamente com as emissões futuras, discutidas acima.

- Incertezas devido à variabilidade natural: o clima varia nas escalas temporais de anos e décadas, devido a interações naturais entre atmosfera, oceano e terra. Espera-se que tal variabilidade natural persista no futuro. Essa incerteza ainda não pode ser removida, mas pode ser quantificada, por meio do processamento de conjuntos de projeções futuras do clima. Cada membro do conjunto usa o mesmo modelo e o mesmo cenário de emissão ou concentração, mas cada um é inicializado de um ponto de partida diferente no clima de controle. O processamento do modelo para períodos de 10 a 30 anos fornecerá uma amplitude de possibilidades futuras.
- Incertezas nas mudanças climáticas regionais: todas as técnicas de regionalização carregam consigo erros nos campos de forçantes dos GCMs. Técnicas diferentes podem fornecer projeções distintas, até quando baseadas na mesma projeção do GCM.

Redução de Escala como Método para Aumento de Resolução de Modelos Climáticos

Infelizmente, os Modelos de Circulação Global (GCMs) são restritos em sua utilidade para estudos de impactos locais, em função de sua grosseira resolução espacial (tipicamente da ordem de 50.000 km²) e inabilidade de solucionar importantes características da submalha, tais como: nuvens e topografia (IPCC-TGCI, 1999 citado por WILBY et al., 2002). O método usado para converter saídas dos Modelos de Circulação Global em variáveis meteorológicas locais requeridas para modelagem hidrológica viável é geralmente referido como técnica de redução de escala (*downscaling*) (DIBIKE; COULIBALY, 2004a; 2004b; 2005).

Como uma consequência, dois grupos de técnicas emergiram em resposta à necessidade de se relacionarem preditores atmosféricos de escala regional para clima local: a) redução estatística de escala; e b) modelos climáticos regionais de simulação de um subGCM, numa malha de escala de características climáticas dinâmicas, utilizando variáveis atmosféricas temporais supridas por um GCM, contornando um domínio específico (IPCC-TGCI, 1999 citado por WILBY et al., 2002).

As metodologias de redução de escala são agrupadas em quatro grupos principais: a) redução de escala dinâmica; b) tipificação climática; c) geração estocástica do clima; ou d) abordagens baseadas em regressão (WILBY et al., 2002).

Já a utilização de um modelo climático regional (RCM) envolve um modelo climático de alta resolução que cobre uma área limitada do globo (tipicamente 5.000 km x 5.000 km, com uma resolução horizontal típica de 50 km). Os RCMs são baseados em leis físicas representadas por equações matemáticas que são solucionadas utilizando-se uma malha tridimensional (JONES et al., 2004).

Integração de Modelos Visando à Análise de Impactos das Mudanças Climáticas na Demanda de Água para Irrigação em Nível de Bacia Hidrográfica

Para quantificação de impactos de mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação, em nível de bacia hidrográfica, foi utilizada uma abordagem que integra um modelo climático regional, um modelo de demanda hídrica e informações locais sobre culturas e métodos de irrigação, utilizando Sistema de Informação Geográfica. A integração proposta possui o seguinte formato com fluxos de entradas e saídas (Figura 1):

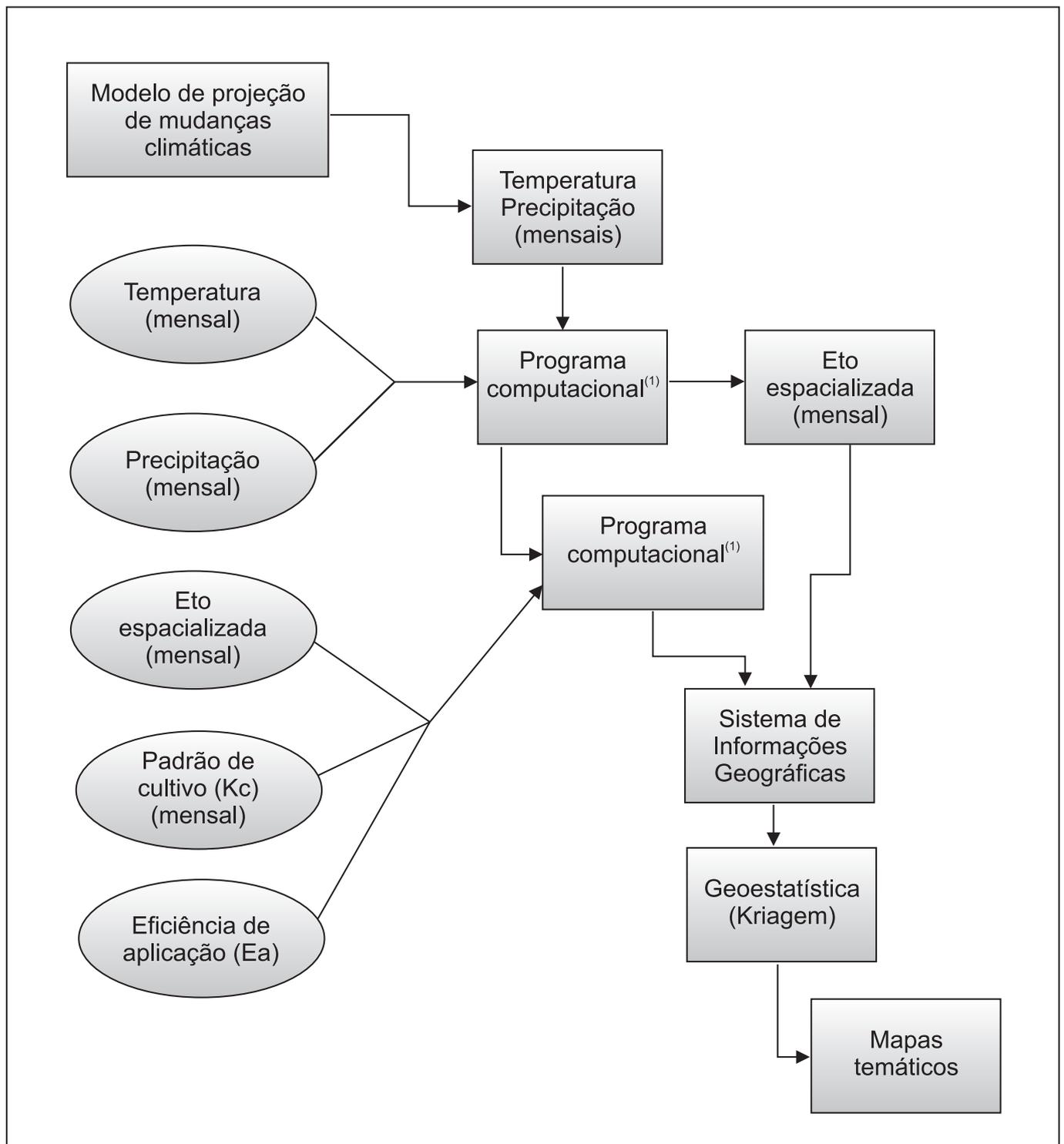


Figura 1. Esquema de integração de modelos.

⁽¹⁾ Programa desenvolvido no ambiente SAS® (*Statistical Analysis System*).

Os instrumentos computacionais de geoprocessamento, chamados de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), permitem a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e criar bancos de dados georreferenciados (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

Há vários métodos de interpolação espacial. Attorre et al. (2007) compararam o método baseado no inverso do quadrado da distância, a *krigagem* e redes neurais na interpolação espacial de variáveis climáticas (temperatura e precipitação) e de nove índices bioclimáticos. Os resultados demonstraram o melhor desempenho para a *krigagem* quando se envolve latitude, longitude, elevação, declividade, continentalidade e radiação solar estimada. O melhor método, no entanto, pode variar de acordo com os dados explorados.

A *krigagem* é uma técnica de interpolação utilizada na Geoestatística para estimar valores de variáveis para locais não mensurados, por meio de observações adjacentes espacialmente correlacionadas. Na *krigagem* ordinária, os valores desconhecidos das variáveis de interesse são estimados por uma média ponderada de valores vizinhos. Os pesos são escolhidos de modo que esse estimador seja o melhor estimador linear não tendencioso (sem viés), para o caso de variáveis com distribuição Normal. Os pesos são derivados de uma função de covariância denominada “variograma”, que pode ser representada por diferentes modelos matemáticos.

O modelo de covariância também permite a incorporação de características qualitativas do local, como, por exemplo, o padrão de anisotropia (o grau de dependência espacial varia com a direção de medida). Freeze & Cherry (1979), por exemplo, definem *anisotropia* em fluxo subterrâneo como: a variação da correlação espacial entre medidas de condutividade hidráulica com a direção de medida, na formação geológica.

Um conjunto de dados composto de uma climatologia de base do modelo de 1961-1990 (*baseline*) e projeções climáticas são fornecidos pelos modelos de mudanças climáticas. Os dados são então extraídos, considerando-se as coordenadas geográficas da região em estudo, com resolução (latitude e longitude) disponível, gerando-se, então, dados espacializados para cada variável, a fim de abranger toda a região estudada.

Considerando o posicionamento georreferenciado dos irrigantes, os dados do modelo (latitude/longitude) são visualizados espacialmente pela suavização proporcionada pela geoestatística (*krigagem*), associada a um sistema de informação geográfica. A mesma metodologia foi empregada para avaliação de impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação de arroz no Sri Lanka por Silva et al. (2007) e na bacia do Guadalquivir, Espanha, por Díaz et al. (2007).

A Figura 2 exemplifica os dados de saída do modelo (pontos). Os pontos representam centros de quadrículas com um valor médio de projeção para a variável de interesse. Para facilitar a suavização dos dados, foram considerados alguns pontos fora do domínio, ultrapassando os limites da bacia.

A metodologia para estimar as necessidades de água da agricultura irrigada em nível de bacia foi utilizada por Knox et al. (1997) para a Inglaterra e País de Gales; por Tsanis e Naoum (2003) para a ilha de Creta, na Grécia; e por Victoria et al. (2005) para Santa Catarina (Brasil). Informações sobre o uso da terra permitem modelar a demanda volumétrica para irrigação. Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são utilizados para mapeamento da informação espacial dos dados meteorológicos e distribuição dos irrigantes, a fim de se estimar a demanda de irrigação, incorporando-se a variabilidade espacial e temporal das variáveis de demanda de água de irrigação, conforme realizado por George et al. (2004) no Uzbequistão e por Fortes et al. (2005) na Índia.

Na abordagem proposta, um modelo simples de balanço hídrico, utilizando precipitação e evapotranspiração mensal é aplicado, onde a demanda mensal de água para irrigação é estimada à medida que diferenças entre evapotranspiração das culturas e precipitação média mensal ocorrem. A evapotranspiração de referência (ET_0) é estimada, utilizando-se de dados espacializados da temperatura mensal (SILVA et al., 2007). Considerando-se a insuficiência de dados (disponibilidade apenas das temperaturas máxima e mínima), utiliza-se o modelo de Penman-Monteith FAO para estimativa da ET_0 (ET_0PM) com dados limitados, conforme proposto por Allen et al. (1998). Metodologia similar foi empregada por Popova et al. (2006) na Bulgária e por Jabloun; Sahli (2008) na Tunísia. A evapotranspiração das culturas (ET_c) foi estimada como o produto entre a evapotranspiração de referência (ET_0PM) e o coeficiente de cultivo (K_c) para os diferentes estádios fenológicos, por meio da expressão apresentada por Doorenbos; Pruitt (1977):

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

ET_c – evapotranspiração da cultura, $[L.T^{-1}]$.

ET_0 – evapotranspiração de referência, $[L.T^{-1}]$.

K_c – coeficiente de cultivo da cultura.

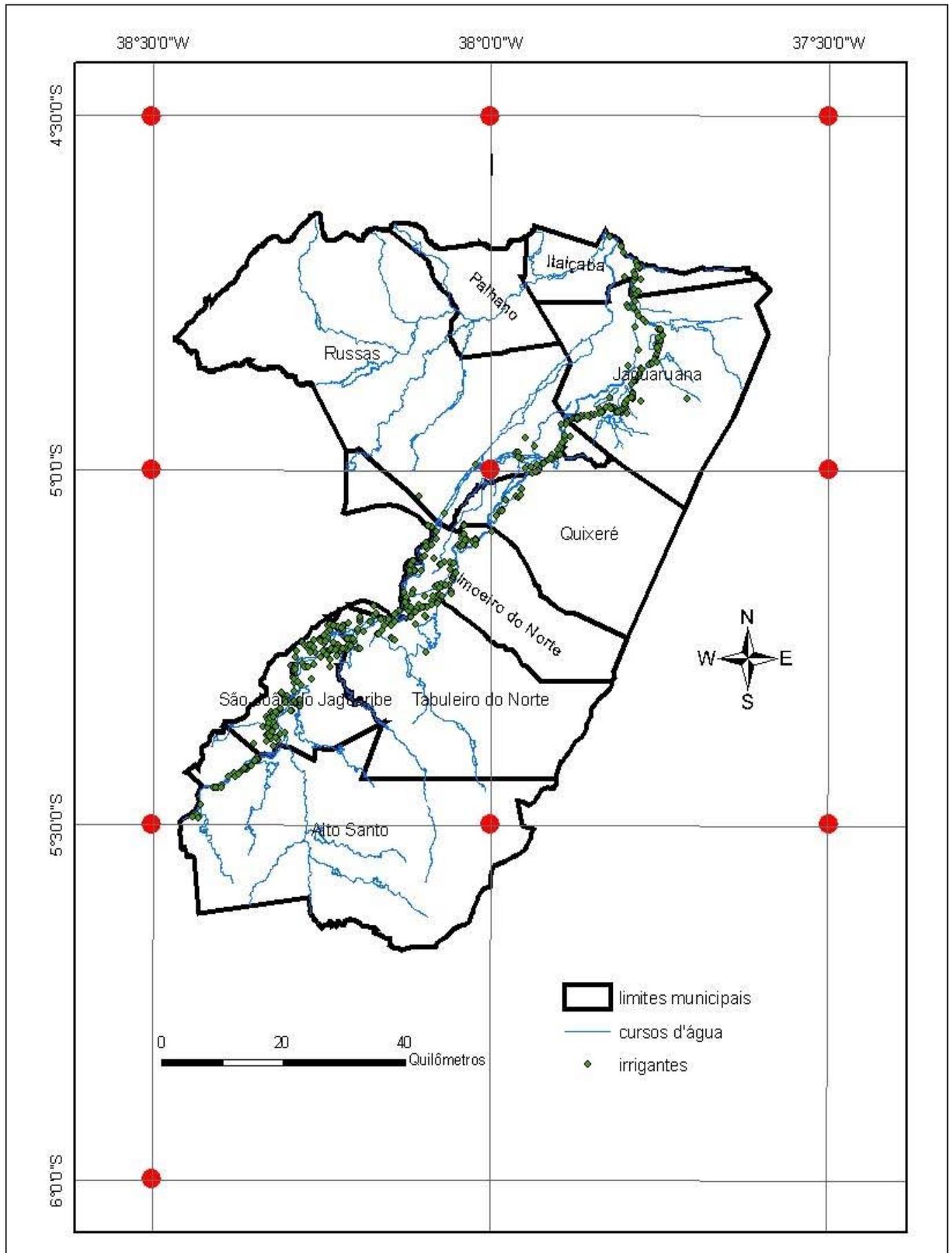


Figura 2. Mapa mostrando pontos utilizados para suavização por *krigagem* dos valores projetados das variáveis de interesse na área de estudo (domínio).

Considerando-se que esta metodologia busca quantificar a demanda de água para irrigação em escala de bacia e não para manejo de água em parcela irrigada, assume-se que, no início das irrigações, não haja déficit de umidade no solo (DÍAZ et al., 2007) e no cálculo da demanda máxima para irrigação pode-se empregar a precipitação mensal média e não a precipitação efetiva, conforme preconizado por Bernardo et al. (2005).

Outro aspecto a ser considerado é a *percentagem da área molhada* em irrigação localizada que considera reduções das perdas de água por evaporação direta do solo. Considera-se que essas perdas estejam embutidas no cálculo da eficiência de aplicação da água de irrigação.

Os valores de coeficiente de cultivo (K_c) são utilizados de acordo com as durações dos estágios de desenvolvimento inicial, intermediário ou final das culturas identificadas na região. Eles podem ser extraídos de uma base de dados, disponível na página eletrônica da Embrapa Agroindústria Tropical (2006) e em Allen et al. (1998).

A necessidade de água para irrigação é relacionada ao clima, área irrigada, tipo de cultura, período de cultivo e tecnologia de irrigação que está sendo utilizada, considerando-se a eficiência do sistema adotado. A necessidade de irrigação líquida (NHL) é definida como a quantidade de água que deve ser adicionada ao solo para que as culturas possam utilizar na evapotranspiração, a uma taxa ótima (BERNARDO et al., 2005).

A necessidade hídrica líquida das culturas (NHL) – definida como a quantidade de água proveniente da precipitação adicional à umidade no solo – que as plantas cultivadas devem receber para se desenvolverem sem estresse hídrico (FISCHER et al., 2007) é dada pela equação:

$$NHL = ET_o K_c - ppt_{\text{mensal média}} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

NHL – necessidade hídrica líquida [$L \cdot T^{-1}$];

$ppt_{\text{mensal média}}$ – precipitação mensal média [$L \cdot T^{-1}$].

Sendo a *Necessidade Hídrica Líquida* (NHL) igual à evapotranspiração da cultura (ET_c), a *Necessidade Hídrica Bruta* (NHB) foi estimada pela Equação 3, com base na metodologia apresentada por Cuenca (1989), utilizando-se a precipitação média, ao invés da efetiva. A partir da NHL e variação da eficiência de aplicação final de irrigação, pode-se estimar a necessidade hídrica bruta (NHB), a qual pode ser considerada como a necessidade de água para as plantas, incluindo-se as perdas ocorridas na irrigação, escoamento superficial ou percolação profunda.

$$NHB = \frac{NHL}{E_a} \quad (\text{Eq. 3})$$

NHB é a necessidade hídrica bruta [$L^3 \cdot T^{-1}$].

Define-se um coeficiente de cultivo mensal ponderado para a área total, correspondente à média ponderada dos K_c s de cada cultura, utilizando, como pesos, as respectivas áreas das culturas irrigadas e uma eficiência de aplicação mensal ponderada considerando os sistemas de irrigação em operação, correspondente à média ponderada das eficiências de cada sistema utilizando como peso as respectivas áreas dos sistemas de irrigação adotados.

Um exemplo de padrão temporal de cultivo das culturas irrigadas (anuais e perenes), em escala mensal, na bacia, é apresentado na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta exemplo de tipologia da agricultura irrigada praticada em determinada região, apresentando todas as áreas, as culturas irrigadas na bacia e os respectivos sistemas de irrigação adotados.

Tabela 2. Padrão temporal de cultivo mensal das culturas irrigadas.

Culturas	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
<i>Euterpe oleracea</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Malpighia glabra</i> L.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Gossypium hirsutum</i> L.								X	X	X	X	X
<i>Annona</i> sp.	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Oryza Sativa</i>							X	X	X	X	X	
<i>Musa paradisiaca</i> L.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Anacardium occidentale</i>	X				X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Saccharum officinarum</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Capim de pisoteio	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Citrus</i>	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Cocos nucifera</i> L.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Vigna unguiculata</i>							X	X		X	X	
<i>Ficus carica</i> L.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Capim de corte	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Psidium guajava</i>	X				X	X	X	X	X	X	X	X
Hortalças	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Manihot esculenta</i> Crantz									X	X	X	X
<i>Carica papaya</i> L.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Mangifera indica</i> L.	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Passiflora edulis</i>	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Citrullus vulgaris</i> Schrad								X	X	X		
<i>Cucumis melo</i>								X	X		X	X
<i>Zea mays</i> (grão)								X	X	X	X	
<i>Zea mays</i> (verde)								X	X	X		
Ornamentais	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Capsicum frutescens</i>								X	X	X	X	X
<i>Capsicum annuum</i> L.									X	X	X	X
<i>Manilkara zapota</i>	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Glycinum max</i> L.							X	X	X	X		
<i>Pennisetum glaucum</i> (L.)								X	X	X	X	
<i>Lycopersicon esculentum</i>								X	X	X	X	
<i>Vitis</i> sp.	X				X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Elaborada a partir de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará – COGERH (2008).

Tabela 3. Tipologia da agricultura irrigada (culturas, sistemas de irrigação e área máxima irrigada ao longo do ano).

Culturas	Sistemas de irrigação e área (ha)					Área total (ha)
	Inundação	Sulcos	Aspersão	Localizada	Pivot	
<i>Euterpe oleracea</i>	-	-	-	9,00	-	9,00
<i>Malpighia glabra</i> L.	-	-	-	78,00	-	78,00
<i>Gossypium hirsutum</i> L.	-	-	-	-	275,00	275,00
<i>Annona</i> sp.	1,50	4,20	-	96,70	15,75	118,15
<i>Oryza Sativa</i>	1.397,30	10,00	-	-	-	1.407,30
<i>Musa paradisiaca</i> L.	92,80	61,45	5,30	748,05	15,75	923,35
<i>Anacardium occidentale</i>	-	0,50	0,75	17,75	-	19,00
<i>Saccharum officinarum</i>	14,30	-	-	-	25,00	39,30
Capim de pisoteio	207,05	56,42	44,25	3,00	225,00	535,72
<i>Citrus</i>	53,75	44,35	-	3,50	-	101,60
<i>Cocos nucifera</i> L.	2,45	1,20	1,80	93,50	-	98,95
<i>Vigna unguiculata</i>	63,50	131,40	509,05	48,25	125,00	877,20
<i>Ficus carica</i> L.	-	-	-	0,50	-	0,50
Capim de corte	11,50	2,25	4,50	-	-	18,25
<i>Psidium guajava</i>	8,65	4,20	1,00	113,70	-	127,55
Hortaliças	-	-	4,50	-	-	4,50
<i>Manihot esculenta</i> Crantz	0,95	-	0,50	-	-	1,45
<i>Carica papaya</i> L.	0,50	-	-	4,70	-	5,20
<i>Mangifera indica</i> L.	-	0,90	-	135,00	-	135,90
<i>Passiflora edulis</i>	-	-	0,50	0,20	-	0,70
<i>Citrullus vulgaris</i> Schrad	-	2,50	2,00	31,25	-	35,75
<i>Cucumis melo</i>	-	2,50	-	120,50	-	123,00
<i>Zea mays</i> (grão)	5,90	10,30	16,05	15,00	275,00	322,25
<i>Zea mays</i> (verde)	-	-	-	-	300,00	300,00
Ornamentais	-	-	0,50	4,00	-	4,50
<i>Capsicum frutescens</i>	0,80	-	-	-	-	4,80
<i>Capsicum annuum</i> L.	-	-	-	16,70	-	16,70
<i>Manilkara zapota</i>	-	0,50	-	7,50	-	8,00
<i>Glycinum max</i> L.	-	-	-	275,00	-	275,00
<i>Pennisetum glaucum</i> (L.)	-	-	-	20,00	50,00	70,00
<i>Lycopersicon esculentum</i>	-	-	-	0,50	-	0,50
<i>Vitis</i> sp.	-	-	-	19,50	-	19,50
TOTAL	1.860,95	332,67	590,70	1.865,80	1.306,50	5.956,62

Fonte: Elaborada a partir de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará – COGERH (2008).

O padrão de cultivo mostra larga variabilidade de culturas irrigadas na área do estudo. A Tabela 4 apresenta a informação da área efetivamente irrigada em cada mês, o coeficiente de cultivo (Kc) mensal ponderado pela área de cada cultura irrigada e a eficiência de irrigação mensal ponderada pela área de cada sistema de irrigação adotado. Pode-se observar que a eficiência de irrigação ponderada varia de 0,62 (julho e novembro) a 0,71 (abril), quando a área de irrigação por inundação apresenta-se mínima (em torno de 110 ha).

Já a área irrigada variou de 1.163,3 ha no mês de março para um máximo de 5.956,6 ha no mês de outubro. O coeficiente de cultivo ponderado varia desde 0,87 (outubro), alcançando máximo de 1,11 e 1,10 em março e abril, quando se pratica irrigação complementar, basicamente em culturas perenes.

Tabela 4. Área irrigada, coeficientes de cultivo (Kc) ponderados pela área de cada cultura irrigada e eficiências médias ponderadas pela área de cada método de irrigação adotado, em cada mês.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Área irrigada (ha)	2.247,7	2.247,7	1.163,3	1.281,5	2.247,7	2.247,7	4.807,2	5.939,9	5.079,4	5.956,6	5.345,9	2.668,6
Kc ponderado	0,94	0,94	1,11	1,10	0,94	0,94	0,98	0,98	0,94	0,87	0,90	0,92
Ea final ponderada	0,67	0,67	0,70	0,71	0,67	0,67	0,62	0,63	0,63	0,63	0,62	0,67

Fonte: Dados do autor.

Projeções Climáticas e Análise de Impactos

Os valores da evapotranspiração de referência média mensal (mm), segundo Penman-Monteith FAO, estimados com dados mínimos, para a climatologia de base do modelo (1961-90) e projeções futuras, cenários A2 e B2, podem ser apresentados em termos de mínimos, máximos, média e desvio padrão. A diferença entre as condições iniciais e projetada pode ser observada por meio dos totais anuais. Aqui, apresenta-se, como exemplo, um estudo de caso na bacia do Jaguaribe, onde se projetou uma elevação média da evapotranspiração anual de 216 mm e 190 mm (12,6% e 11,1%) para os cenários A2 e B2, respectivamente, passando, em 2040, de 1.719 mm para 1.935 mm e 1.909 mm anuais, respectivamente.

Um incremento médio de 543 mm e 564 mm (33,62% e 37,87%) nas necessidades hídricas anuais das culturas em relação à climatologia de base do modelo foi projetado para 2040, cenários A2 e B2, respectivamente (Tabela 5 e Figuras 3 e 4), observando-se maiores níveis, na zona costeira.

Tabela 5. Estatísticas descritivas dos incrementos da demanda anual de água para irrigação (mm) na área de domínio localizada na bacia do Rio Jaguaribe, Ceará.

Estatísticas	Cenários	
	2040 A2	2040 B2
Mínimo	437	462
Máximo	921	914
Média	543	564
Desvio Padrão	76	75

Fonte: Dados do autor.

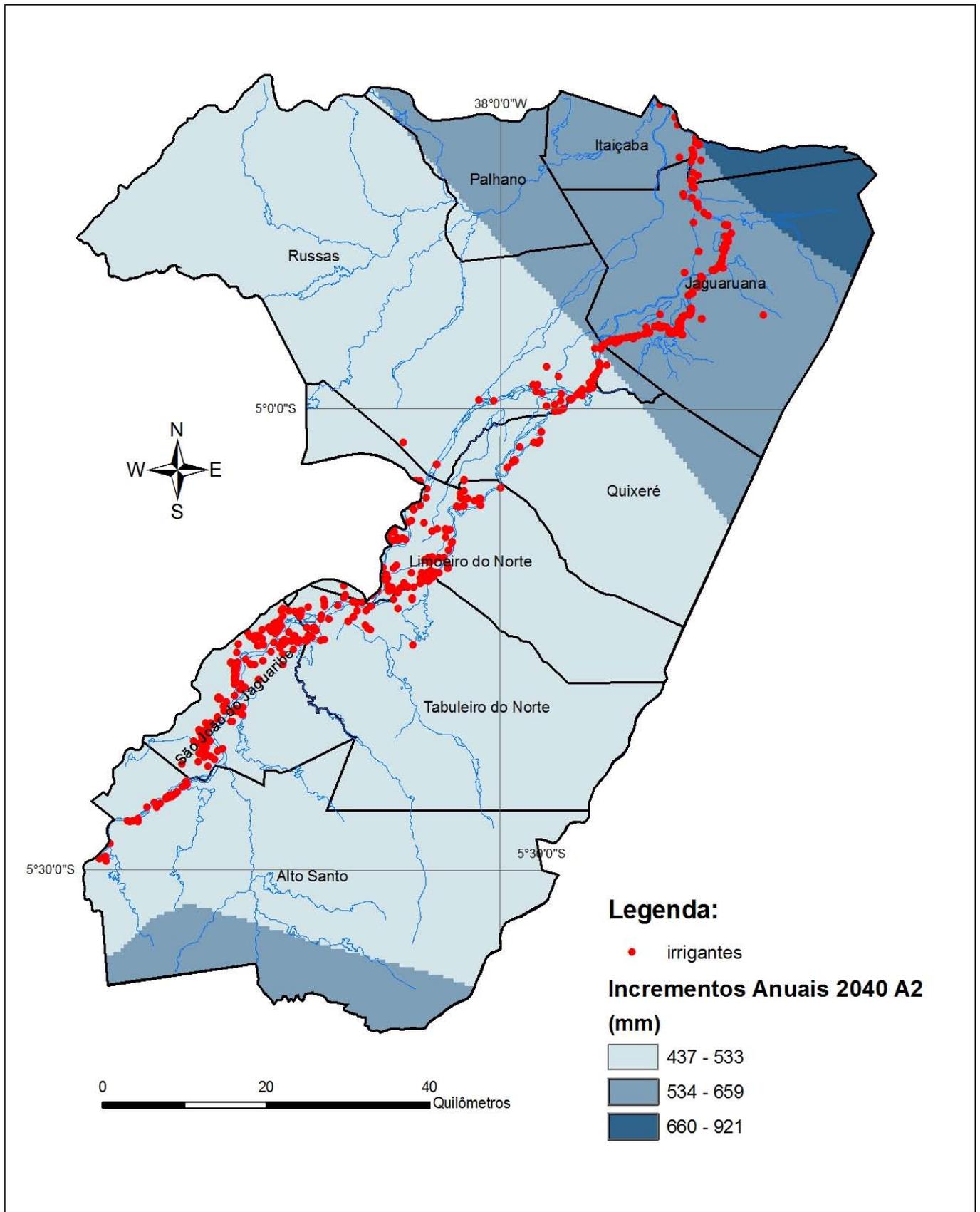


Figura 3. Exemplo de mapa temático das projeções dos incrementos anuais na necessidade hídrica bruta (NHB, mm), para o ano de 2040, cenário A2, na área de domínio localizada na Bacia do Rio Jaguaribe, Ceará.

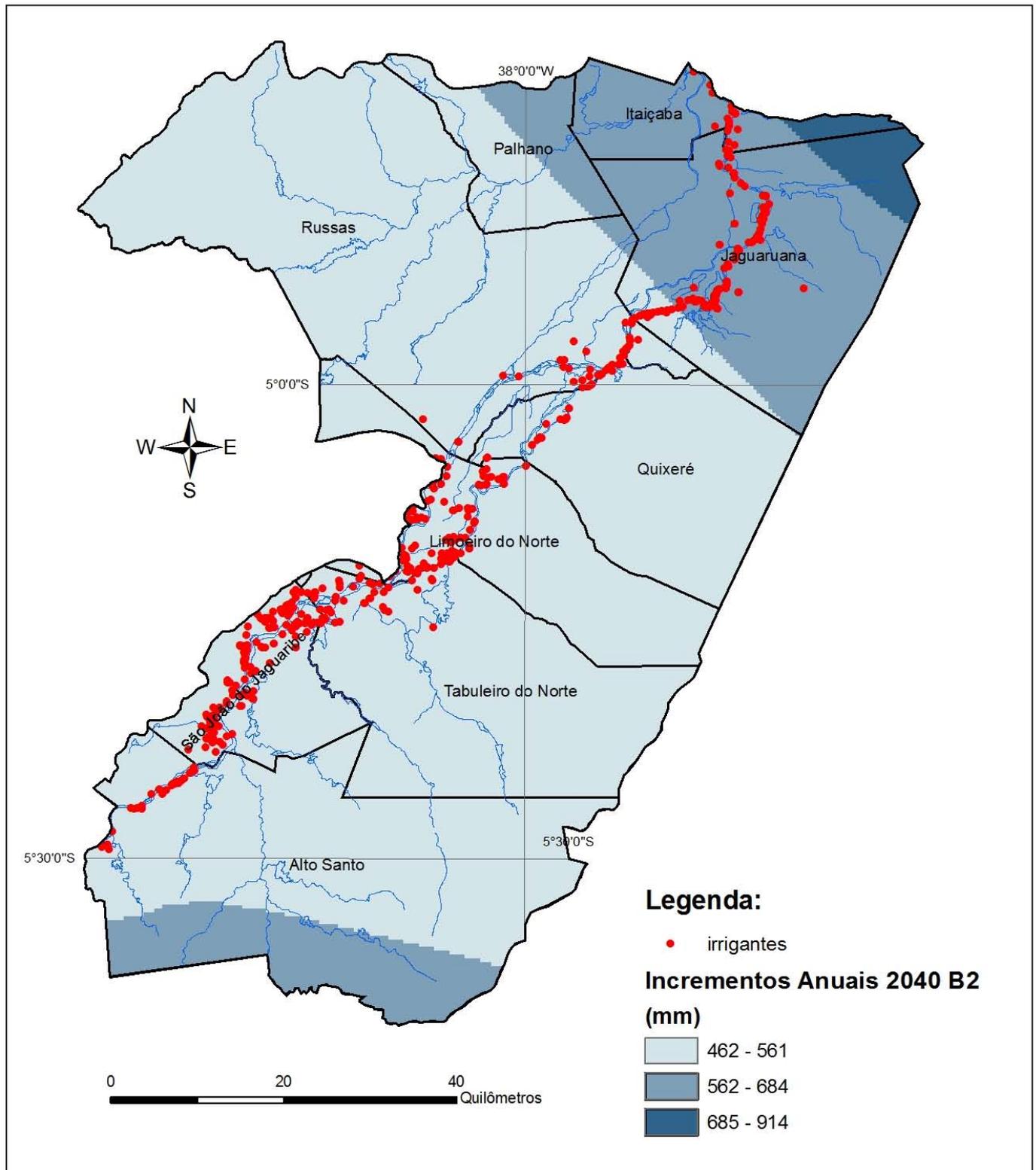


Figura 4. Exemplo de mapa temático das projeções dos incrementos anuais na necessidade hídrica bruta (NHB, mm), para o ano de 2040, cenário B2, na área de domínio localizada na Bacia do Rio Jaguaribe, Ceará.

Para culturas tropicais perenes em clima semiárido, pode ocorrer também um elastecimento na estação de irrigação; porém, isso ocorre basicamente devido à baixa na precipitação, não sendo decorrente do encurtamento da estação fria, conforme advertido por Fischer et al. (2007). Os autores consideram que, quanto à extensão do período de cultivo (ciclo) em consequência das mudanças climáticas, pode-se assumir pequenas alterações nos trópicos. Mudanças projetadas na precipitação, combinadas com elevação na demanda para evapotranspiração, indicam uma maior necessidade hídrica para irrigação no futuro.

Análise de Sensibilidade e Identificação de Medidas Adaptativas e Mitigadoras

Muitas comunidades e regiões que são vulneráveis às mudanças climáticas também estão sob pressão de forças, tais como crescimento populacional, depleção de recursos e pobreza. Políticas públicas que reduzam pressões nos recursos, que melhorem o gerenciamento de riscos ambientais e aumentem o bem-estar dos membros mais pobres da sociedade podem simultaneamente avançar na equidade e no desenvolvimento sustentável, fortalecendo a capacidade adaptativa e reduzindo vulnerabilidades ao clima e outros estresses. Inclusão de riscos climáticos no desenho e implementação de iniciativas de desenvolvimento pode promover a equidade e o desenvolvimento que passa a ser mais sustentável e reduz vulnerabilidade às mudanças climáticas (INTERGOVERNAMENTAL, 2001).

A vulnerabilidade na agricultura pode ser definida em termos de produtividade, lucratividade das fazendas, economia regional e fome. Populações de menor renda e regiões agrícolas marginais, tais como do semiárido, são mais vulneráveis às mudanças climáticas (AERTS; DROOGERS, 2004).

A adaptação vem recebendo progressiva atenção no desenvolvimento de políticas, como um mecanismo complementar à mitigação. A adaptação considera a habilidade de conviver ou absorver estresses ou impactos, ou ainda recuperar-se deles. Pode também referir-se a ações elaboradas para se tirar vantagens das novas oportunidades que podem surgir como resultado das mudanças no clima. A fim de se estudar e se avaliar o desenvolvimento de estratégias de adaptação para bacias hidrográficas, deve-se conhecer o sistema para o qual estratégias de adaptação serão aplicadas (AERTS; DROOGERS, 2004).

A otimização do gerenciamento é um trabalho básico de um gestor de recursos hídricos, assegurando a qualidade da água e sua alocação em resposta às demandas de todos os usuários. Dessa forma, a otimização do gerenciamento pode ser expressa como o uso ótimo dos bens e serviços, pelo fortalecimento do bem-estar humano, da capacidade e segurança alimentar, da capacidade industrial e da qualidade do ecossistema natural. Todo gestor de água numa dada bacia tem que lidar com trocas entre as medidas, em relação aos quatro objetivos citados. Quantificando-se esses objetivos e prioridades, medidas potenciais (incluindo adaptação) podem ser endereçadas ao seu desempenho (AERTS; DROOGERS, 2004).

Ainda segundo os autores, a adaptação pode ocorrer de uma forma reativa ou antecipativa (adaptação preventiva). A maioria das adaptações são modificações nas práticas em vigor e nos processos de tomada de decisão já existentes na agricultura e setor de recursos hídricos. Há diversas medidas possíveis de adaptação que formam a base para o desenvolvimento de estratégias adaptativas (AERTS; DROOGERS, 2004).

A pesquisa alerta que a maioria dos estudos de impactos não consideram a adaptação como integrante do processo de avaliação e esses trabalhos podem superestimar o efeito negativo das mudanças climáticas. Dessa forma, sugere-se que sejam incluídas opções de adaptação interativamente com os estudos de impactos, primeiramente identificando-se os impactos potenciais e, em seguida, simulando-os com a inclusão das medidas adaptativas. Uma das formas de identificação do conjunto potencial de medidas adaptativas é a análise de sensibilidade (AERTS; DROOGERS, 2004).

Até recentemente, a definição de análise de sensibilidade foi considerada como uma medida local do efeito de um dado de entrada em determinado dado de saída. A abordagem local é aceitável para uma determinada classe de problemas. Objetiva determinar quais fatores necessitam de maior precisão nas determinações, além de identificar os elos fracos da cadeia de avaliação do modelo (aqueles que propagam mais variância nos parâmetros de saída).

A análise de sensibilidade neste contexto é geralmente realizada via técnicas de análise de regressão linear para estimação de coeficientes de regressão padronizados. Estes medem sensibilidade das variáveis prognósticas a variações num determinado parâmetro de entrada. Nos métodos de análise de sensibilidade local, apenas um ponto do espaço dos fatores é explorado e os fatores são modificados um de cada vez. Uma desvantagem dos métodos baseados em regressão é que são pobres para modelos não lineares (SALTELLI et al., 2004).

A análise de sensibilidade permite a priorização de pesquisas futuras e direcionamento de investimento e esforço na melhoria da estimativa de valores de parâmetros que mais contribuem para as incertezas das variáveis prognósticas (SALTELLI et al., 2004).

A integração de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e modelagem ambiental tem o potencial de facilitar a análise de sensibilidade de forma interativa e os resultados podem ser visualizados num contexto espacial. Assim, os efeitos de mudanças feitas pelos parâmetros de entrada do modelo podem ser vistos espacialmente (DIXON, 2005).

Saltelli et al. (2004) apontam as propriedades ideais do método de análise de sensibilidade:

- Habilidade de combinar a influência de escala e forma. A influência da entrada deve incorporar o efeito da amplitude (*range*) da variação da entrada e a forma de sua função densidade de probabilidade.
- Apuração multidimensional, isto é, o efeito da variação de um fator quando todos os outros são mantidos constantes nos valores centrais. Um método global deveria, ao contrário, avaliar o efeito de um fator, enquanto todos os outros também estão sendo variados.
- Uma análise de sensibilidade global deve ser capaz de apreciar o chamado “efeito de interação”, o qual é especialmente importante para modelos não lineares, não aditivos, nos quais o efeito da alteração de dois fatores é diferente da soma dos efeitos individuais.

Dixon (2005) empregou a análise de sensibilidade utilizando técnicas de redes neurais associada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) na predição da vulnerabilidade da água subterrânea na Bacia do Rio Illinois, na fronteira dos estados americanos de Arkansas e Oklahoma. Os dados de qualidade da água e localização de poços e fontes foram utilizados para validação do modelo e não como dados de entrada. A análise de sensibilidade envolveu o teste mais comum, isto é, uma comparação da resposta (saída do modelo) ao variar os parâmetros de aprendizagem do modelo. Assim, a análise de sensibilidade de um número de conjuntos neurais foi processada. A análise de sensibilidade demonstrou que os modelos neurais são sensíveis às formas da rede (sino, triangular ou trapezoidal), ao número de conjuntos neurais e à natureza das regras de pesos e técnicas de validação durante os processos de aprendizagem, permitindo indicar a utilização da metodologia para avaliar vulnerabilidade das águas subterrâneas ao transporte de solutos (nitrito).

Como se pode verificar, a análise de sensibilidade vem ganhando aplicação cada vez mais abrangente no universo da modelagem. Pode-se ainda citar como exemplos: Norton (2008) empregou análise de sensibilidade algébrica em modelos ambientais e chamou atenção para a diferença entre análise de sensibilidade determinística e análise de incerteza com métodos probabilísticos. O autor aplicou a análise para descrever fontes de patógenos e respectivos transportes numa rede de drenagem. Concluiu que a análise de sensibilidade algébrica, de equação em equação, fornece valiosa visão da área onde a sensibilidade é alta e onde é baixa, onde há interações e não linearidades significativas. Considera que a descoberta de que algumas sensibilidades são negligenciáveis pode simplificar o restante da análise. E, finalmente, conclui que o papel da análise de sensibilidade é a determinação de como as variáveis se comportam e a natureza das interações não lineares. Segundo Jørgesen & Bendoricchio (2001), a análise de sensibilidade do modelo é uma etapa posterior à verificação.

As projeções do modelo regional de mudanças climáticas, integrado ao modelo de necessidades hídricas da agricultura irrigada em nível de bacia hidrográfica foram expressas em termos de amplitudes (*range*), possuindo um limite inferior e superior (mínimo e máximo). As amplitudes de variáveis climáticas-chave projetadas formam as entradas do modelo de demanda de água para irrigação, conforme observado por Jones (2000). O modo como modificações nessas variáveis de entrada impactam na demanda (NHB) podem ser avaliadas por uma análise de sensibilidade.

Apresenta-se, a título de exemplo, a análise de sensibilidade feita para as seguintes variáveis de entrada, em escala mensal: temperatura máxima (28,5 °C a 37,5 °C), fixando-se a temperatura mínima em 23 °C, temperatura mínima (22,2 °C a 25,8 °C), fixando-se a temperatura máxima em 33,5 °C, evapotranspiração mensal (63 mm a 181 mm), precipitação mensal (0 mm a 200 mm), alterações na eficiência de aplicação da água de irrigação (0,15 a 0,95), e finalmente, uma variação no uso e ocupação do solo com arroz versus banana irrigados (culturas mais intensas em uso de água e área), variando numa proporção de 15% a 85% da área total irrigada.

As amplitudes foram definidas em função dos valores projetados pelo modelo regional de mudanças climáticas. Assume-se que alterações na temperatura e precipitação decorrentes das mudanças climáticas são variáveis independentes, conforme preconizado por Jones (2000).

Aplicou-se uma análise de sensibilidade univariada multidimensional (quando se varia um fator de cada vez, conforme classificado por Saltelli et al. (2004), pela programação no *Statistical Analytic System*® (SAS), a fim de se avaliar a sensibilidade da demanda de água de irrigação às variáveis de entrada do modelo de demanda hídrica.

Na Figura 5, apresenta-se a análise de sensibilidade mensal da necessidade hídrica bruta das plantas, ao longo do ano à eficiência de irrigação. Os valores das abscissas referem-se à amplitude mensurada em pesquisas de campo por Costa & Sousa (2006) e Nunes (2006). Os valores da ordenada referem-se à resposta da necessidade hídrica bruta mensal da bacia (mm) à variação da eficiência de irrigação.

Pela forma dos gráficos, observa-se que a resposta é exponencial, sendo maior quando a eficiência apresenta-se muito baixa (0,15 a 0,45), denotando que a melhoria das eficiências dos sistemas que possuem pior desempenho fornece uma resposta maior à economia de água.

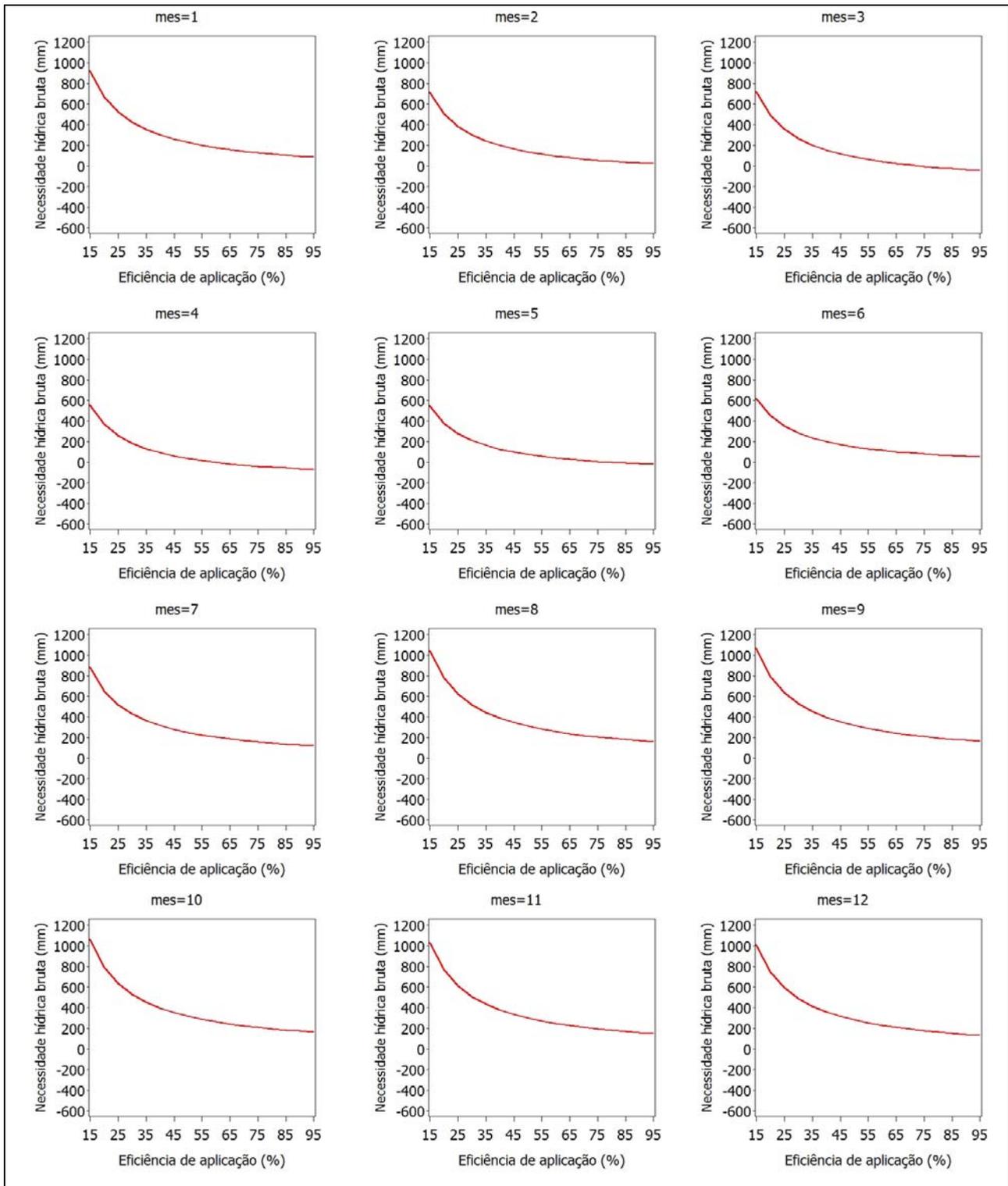


Figura 5. Sensibilidade da necessidade hídrica das plantas à eficiência de aplicação dos sistemas de irrigação utilizados.

A resposta da necessidade hídrica das plantas ao aumento da temperatura máxima apresenta-se positiva e linear para todos os meses do ano (Figura 6). Os valores das abscissas referem-se à amplitude das médias das temperaturas máximas estimadas para a climatologia de base do modelo (1961-90) e para 2040 cenários A2 e B2. Os valores da ordenada referem-se à resposta da necessidade de irrigação na bacia (mm), apresentando-se mais elevados entre os meses de agosto a novembro.

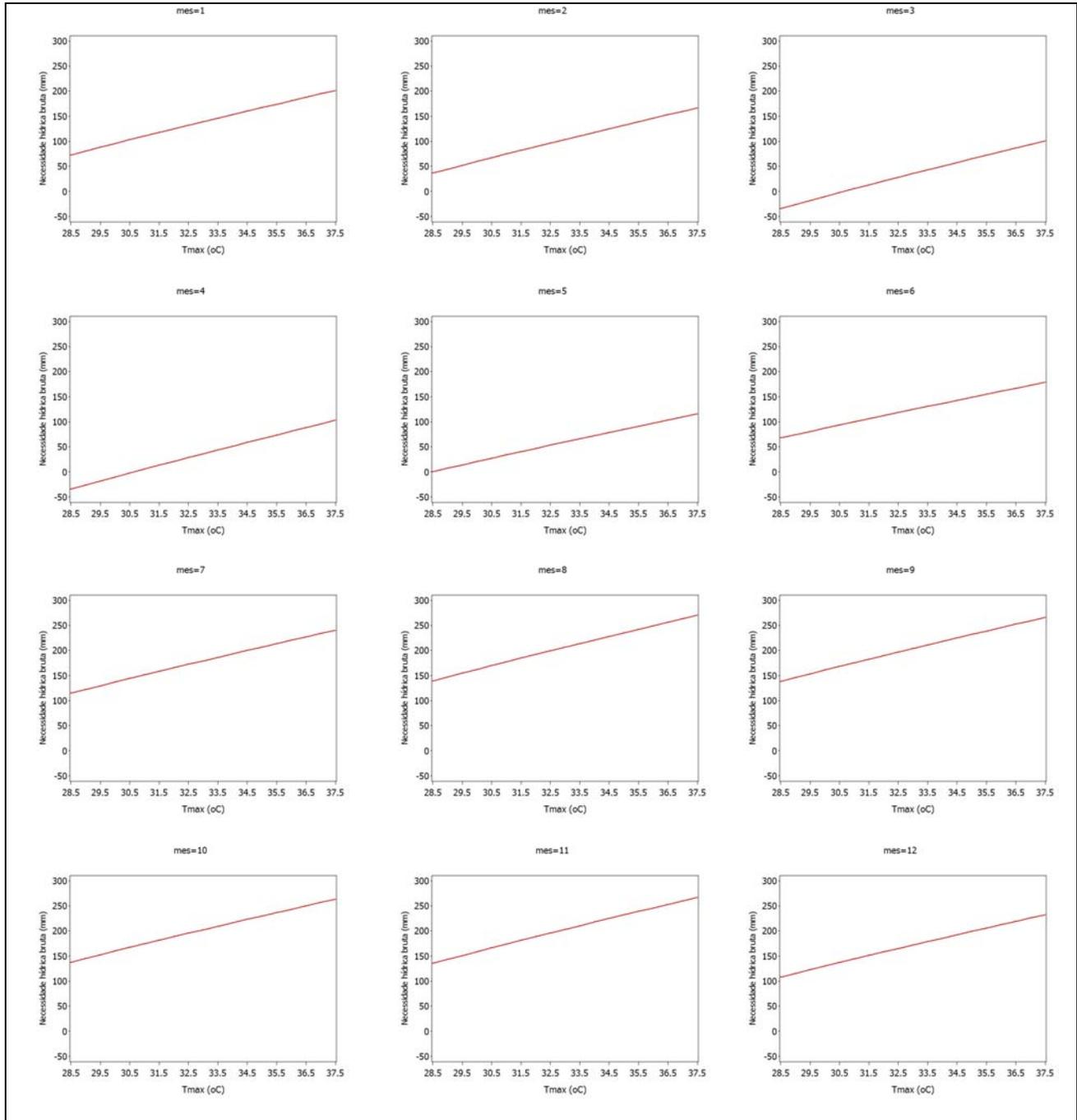


Figura 6. Sensibilidade da necessidade hídrica das plantas ao aumento da temperatura máxima.

A análise de sensibilidade da necessidade hídrica das plantas ao aumento da temperatura mínima apresenta-se negativa e linear para todos os meses do ano (Figura 7). Os valores das abscissas referem-se à amplitude das médias das temperaturas mínimas estimadas para a climatologia de base do modelo (1961-90) e para 2040 cenários A2 e B2. Os valores da ordenada referem-se à resposta da necessidade de irrigação na bacia (mm), apresentando-se mais elevados entre os meses de agosto a novembro.

É interessante salientar que a resposta é oposta à da temperatura máxima, ou seja, a elevação da temperatura mínima, para um mesmo valor de temperatura máxima, resulta numa redução da necessidade hídrica bruta de irrigação. Esse resultado pode ser explicado pela redução no deficit da pressão de vapor que ocorre quando se diminui a amplitude entre as temperaturas máximas e mínimas (considerada temperatura de ponto de orvalho pela suposição do modelo de estimativa da evapotranspiração de Penman-Monteith FAO com dados mínimos). Sendo menor o deficit da pressão de vapor, menor será a ET_{0PM} , o que implicaria uma menor NHB.

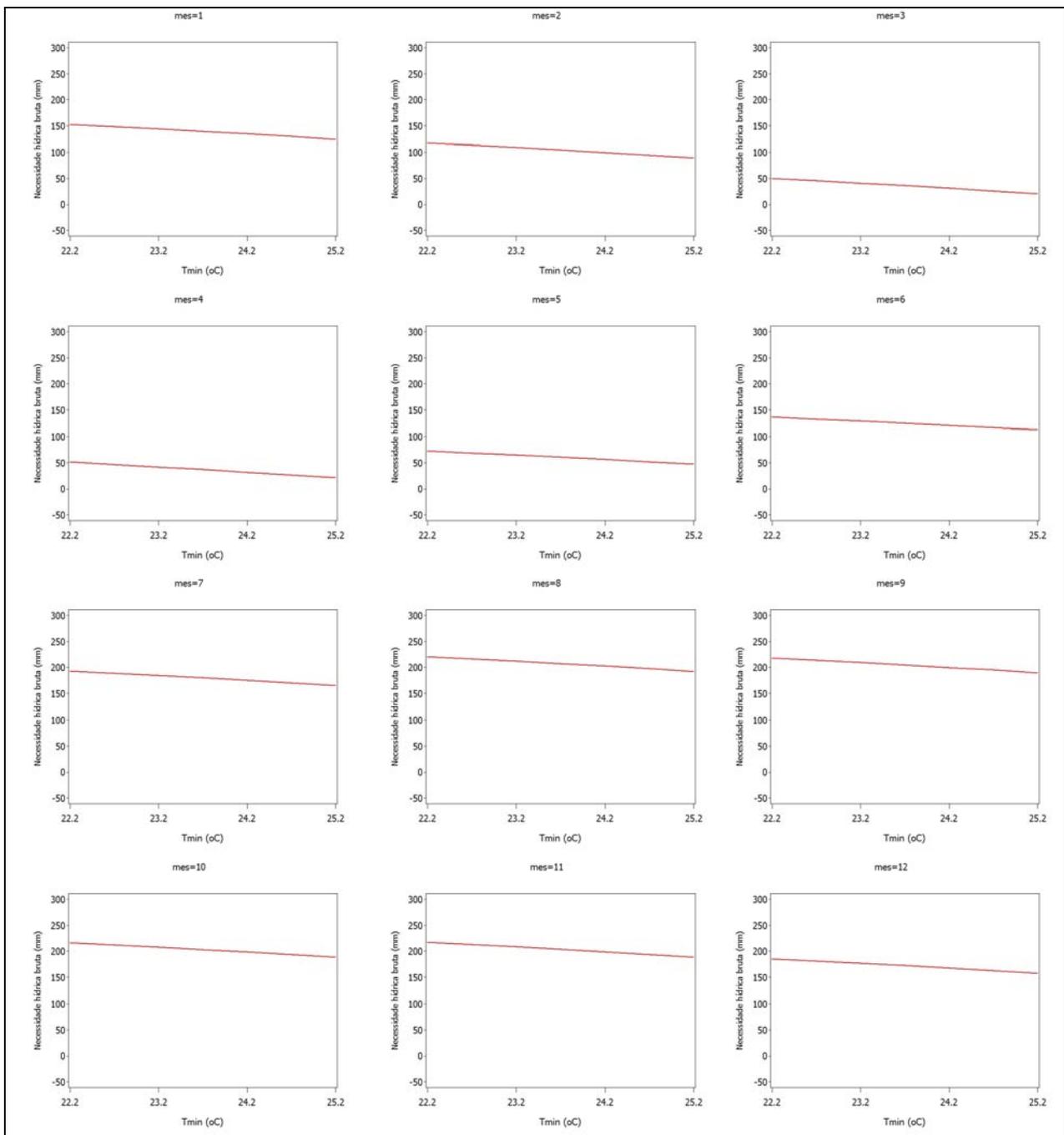


Figura 7. Sensibilidade da necessidade hídrica das plantas ao aumento da temperatura mínima.

Como as temperaturas máximas e mínimas, na realidade, variam simultaneamente, torna-se necessário observar a resposta da NHB ao aumento da ET_o PM. A resposta da necessidade hídrica das plantas ao aumento da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith FAO (ET_o PM) apresenta-se positiva e linear para todos os meses do ano (Figura 47). Os valores das abscissas referem-se à amplitude da ET_o estimadas para a climatologia de base do modelo (1961-90) e para 2040 cenários A2 e B2. Os valores da ordenada referem-se à resposta da necessidade de irrigação na bacia (mm), apresentando-se mais elevados entre os meses de agosto e outubro.

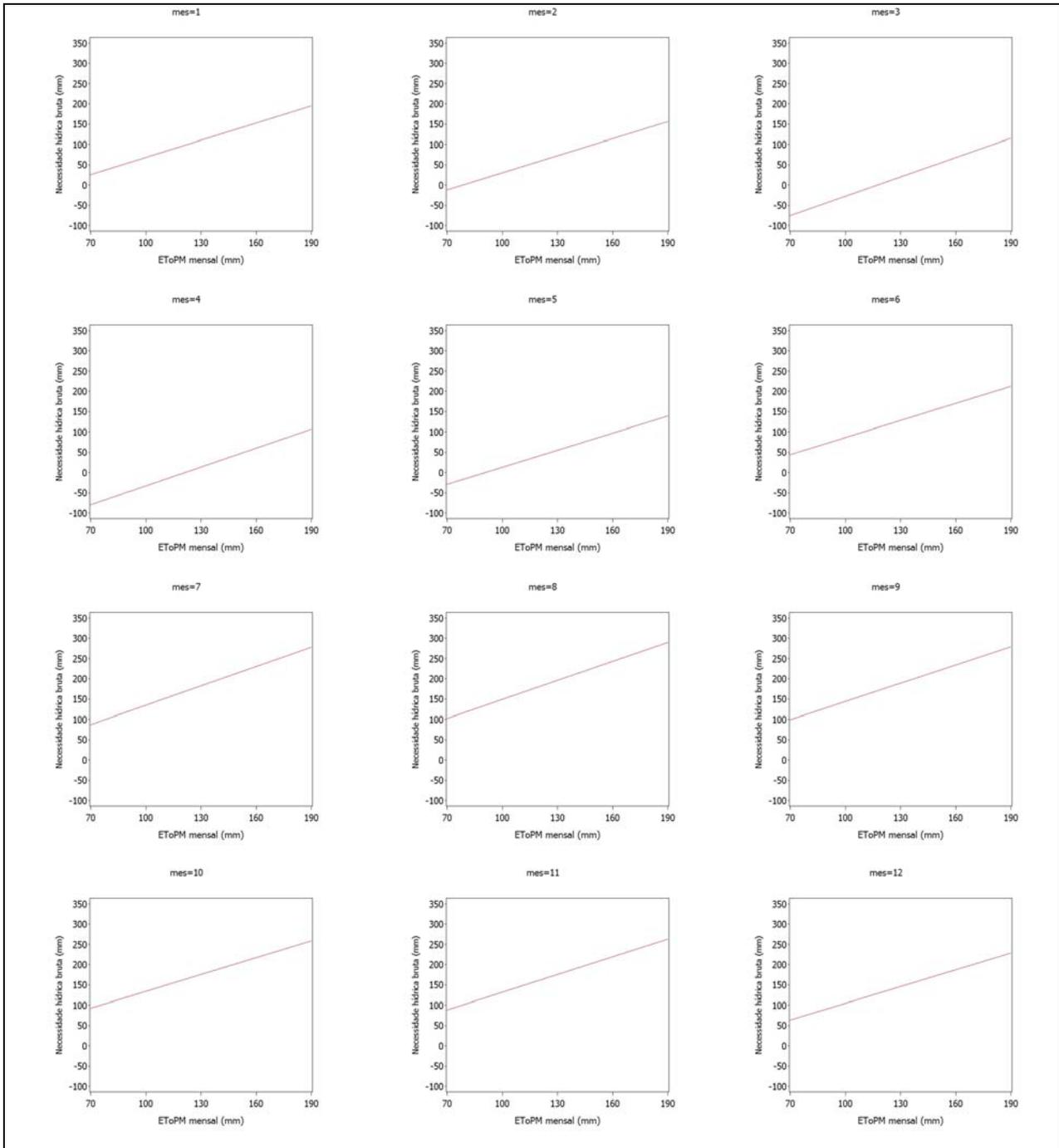


Figura 8. Sensibilidade da necessidade hídrica das plantas ao aumento da evapotranspiração de referência.

A Figura 9 apresenta a análise de sensibilidade da necessidade hídrica bruta à precipitação mensal. A resposta é linear e negativa (reduz-se à medida que a precipitação aumenta).

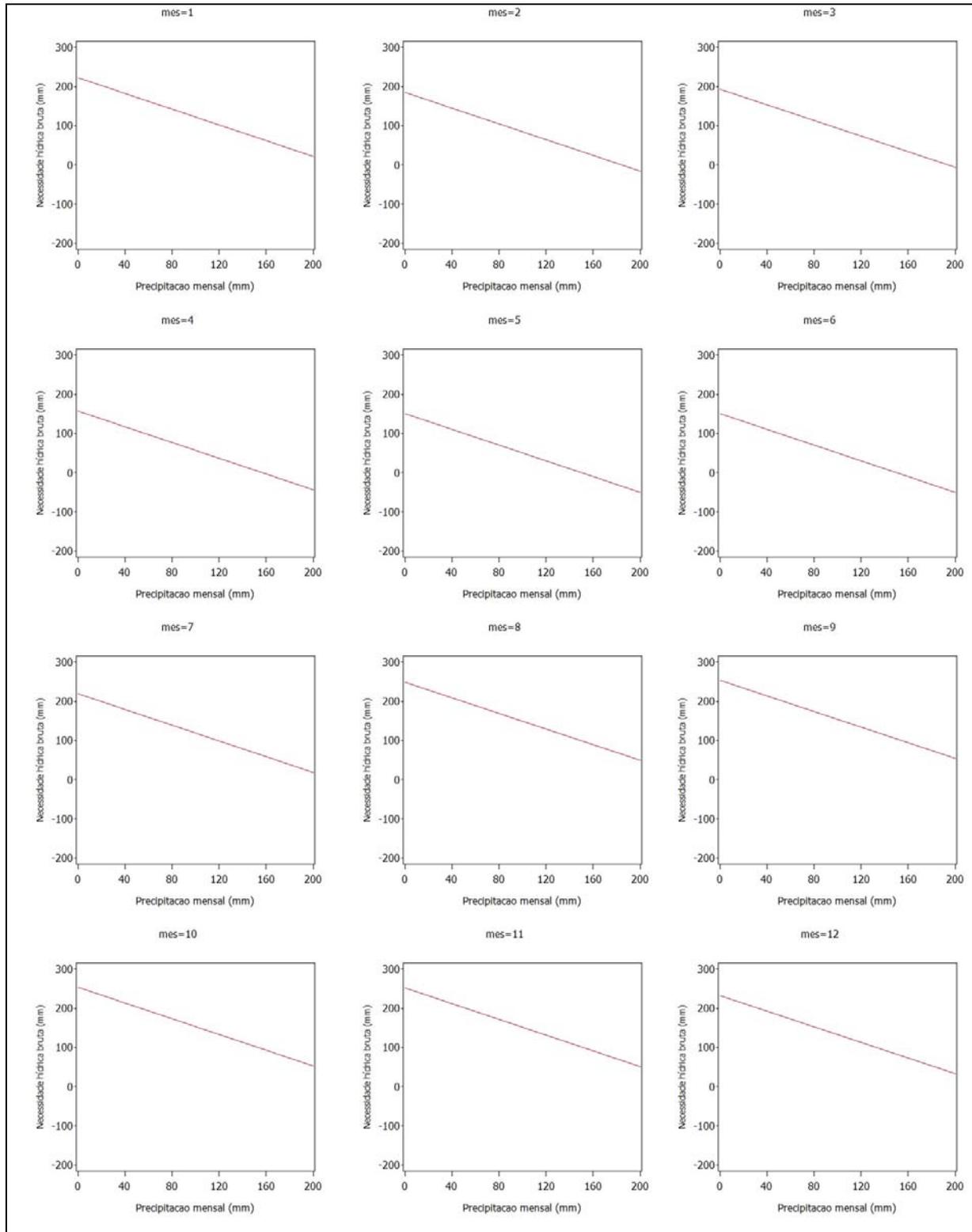


Figura 9. Sensibilidade da necessidade hídrica das plantas à precipitação.

Já a resposta da necessidade de água para irrigação à ocupação das áreas irrigadas com arroz, em vez de banana (simulando apenas alternativas de decisão para alocação de água por serem culturas mais intensas em demanda hídrica), como é esperado, apresenta-se inalterada nos meses em que não se observa cultivo de arroz (janeiro a junho e dezembro).

A resposta é linear para os demais meses, sendo positiva para o mês de agosto (coeficiente de cultivo máximo de 1,20 para arroz) e negativa para os meses de julho, em função do estágio de cultivo inicial e coeficiente de cultivo (ALLEN et al., 1998) mais baixos para arroz (1,05), setembro e outubro (0,90), e novembro (0,60), quando comparado ao da banana (1,20) (Figura 10).

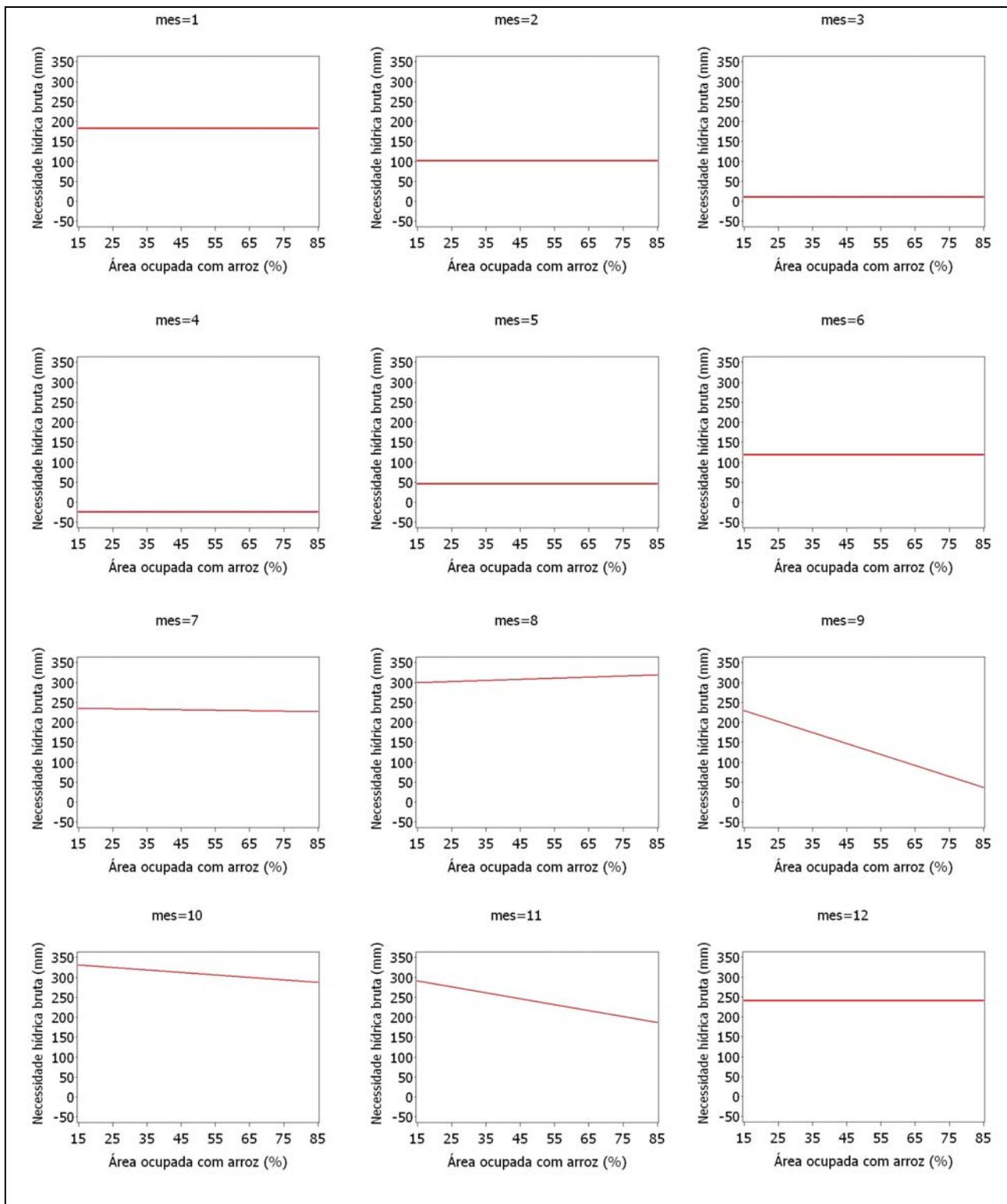


Figura 10. Sensibilidade da necessidade hídrica das plantas à proporção da área irrigada com arroz.

Os resultados da análise de sensibilidade são apresentados na forma de coeficientes dos modelos lineares (temperaturas máxima e mínima, evapotranspiração de referência de Penman-Monteith FAO, precipitação e percentagem da área cultivada com arroz) e não lineares (eficiência de aplicação final ponderada - Ea_{pond}). Esses coeficientes de sensibilidade da necessidade hídrica bruta (CS-NHB) são derivados algebricamente a partir da equação utilizada para cálculo da NHB.

A sensibilidade da NHB à temperatura máxima, mantendo-se à temperatura mínima num valor hipotético de 23 °C (Tabela 6), variou entre 12,32 mm °C⁻¹ (junho) a 15,24 mm °C⁻¹ (abril). Já a sensibilidade da NHB à elevação da temperatura mínima, mantendo-se à temperatura máxima num valor hipotético de 33,5 °C variou entre 0-8,20 mm °C⁻¹ (junho) a -10,25 mm °C⁻¹ (abril). Uma vez que o modelo de mudanças climáticas prevê aumento das temperaturas máximas e mínimas, analisou-se também a sensibilidade da NHB à elevação da ET_o , variando de 1,37 mm mm⁻¹ (dezembro) a 1,59 mm mm⁻¹ (março). Para precipitação, a sensibilidade apresentou-se uniforme ao longo do ano, -1,00 mm mm⁻¹ (ou seja, a NHB reduz-se de 1 mm para cada milímetro adicional de chuva).

Analisando-se o mês de outubro (mês de maior demanda de água para irrigação), por exemplo, pela Tabela 6, pode-se interpretar, pelos coeficientes de sensibilidade (CS), que, ao se elevar um grau centígrado na temperatura máxima, a NHB aumenta 13,93 mm. Já se elevando um grau centígrado na temperatura mínima, a NHB reduz 9,41 mm. Se a ET_o sofrer uma elevação de 1 mm, isso reflete numa elevação de 1,38 mm de NHB. Ao se reduzir um milímetro na precipitação a NHB, aumentaria 1,00 mm. A cada percentual reduzido na área ocupada com arroz, a NHB cai 0,63 mm. Para a eficiência de aplicação, o modelo é exponencial, com taxas de sensibilidade variáveis, ao longo da curva (Figura 5), com média de 159,21. A eficiência de aplicação é, de fato, o fator de maior impacto, dentre os que influenciam a NHB. Já ao se aumentar a área de arroz, há elevação na NHB apenas no mês de agosto (0,27 mm por ponto percentual de área plantada) e maior redução na NHB em setembro (-2,75 mm por ponto percentual de área plantada).

Tabela 6. Coeficientes de sensibilidade da necessidade hídrica bruta (CS-NHB) a cada uma das variáveis analisadas.

Mês	Temperatura máxima (mm °C ⁻¹)	Temperatura mínima (mm °C ⁻¹)	ET_o PM (mm mm ⁻¹)	Precipitação (mm mm ⁻¹)	Eficiência de aplicação (Parâmetro β) ⁽¹⁾	Fração ocupada pelo arroz (mm % ⁻¹)
1	14,25	-9,62	1,40	-1,00	148,52	0,00
2	14,40	-9,74	1,40	-1,00	123,14	0,00
3	14,95	-10,10	1,59	-1,00	135,42	0,00
4	15,24	-10,25	1,55	-1,00	111,10	0,00
5	12,81	-8,56	1,40	-1,00	100,58	0,00
6	12,32	-8,20	1,40	-1,00	100,58	0,00
7	13,93	-9,28	1,58	-1,00	135,24	-0,12
8	14,52	-9,73	1,56	-1,00	156,80	0,27
9	14,16	-9,54	1,49	-1,00	159,80	-2,75
10	13,93	-9,41	1,38	-1,00	159,21	-0,63
11	14,59	-9,86	1,45	-1,00	155,70	-1,48
12	13,78	-9,30	1,37	-1,00	155,48	0,00

⁽¹⁾ Parâmetro do modelo exponencial.

Fonte: Dados do autor.

Considerações Finais

A demanda de água para irrigação apresenta potencial de ser impactada pelo aquecimento global. Dessa forma, a metodologia proposta visa quantificar os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para a agricultura irrigada, considerando a variedade das culturas irrigadas, a eficiência dos sistemas de irrigação adotados e as projeções de um modelo regional de mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica.

A utilização de modelo de mudanças climáticas submetido à redução de escala dinâmica, integrado a um sistema de informação geográfica, funciona como uma ferramenta adequada para avaliação de impactos em escala menor que global ou continental, ou seja, em nível de bacia hidrográfica, permitindo concluir:

- Apesar das mudanças climáticas impactarem no aumento de demanda de água para irrigação, a análise de sensibilidade indica que a mesma é mais sensível à eficiência de aplicação final de irrigação que aos efeitos das mudanças climáticas, revelando-se como uma importante medida adaptativa a ser considerada.
- A capacitação dos irrigantes e adequação dos sistemas de irrigação poderão, dessa forma, desempenhar importante papel na prevenção de escassez de água na região, em função de impactos de mudanças climáticas, podendo constituir importante fator de mitigação e adaptação.
- Nos trabalhos futuros de avaliação de impacto que utilizam projeções de modelos climáticos, é recomendável uma avaliação da destreza dos modelos comparando-se as séries das projeções retrospectivas (*hindcasts*) das variáveis de interesse para a área de estudo no período de referência (1961-1990) com as respectivas séries de dados observados. Na ausência de uma rede densa de estações de monitoramento, geralmente se utilizam dados de bases globais oriundos da base de dados do CRU (*Climate Research Unit*), geradas por meio de métodos de interpolação, a partir de séries observadas em todo o mundo. A qualidade dessas séries interpoladas é, portanto, de fundamental importância na avaliação de destreza para proposição de ajustes das projeções originais. Assim, os dados da base CRU são comparados com as séries observadas disponíveis para uma avaliação de consistência e adequação no uso e possível correção de viés dos modelos climáticos.

Referências

- AERTS, J. C. J. H.; DROOGERS, P. Adaptation for regional water management In: AERTS, J. C. J. H.; DROOGERS, P. (Ed.). **Climate Change in Contrasting River Basins: adaptation strategies for water, food and environment**. Cambridge: CABI Publishing., 2004. p. 1-24
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ATTORRE, F.; ALFO, M.; DE SANCTIS, M.; FRANCESCONI, F.; BRUNO, F. Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 13, p.1825-1843, 2007.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 611 p.
- BINDER, L.C.W. Climate change and watershed planning in Washington state. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 4, p. 915-926, 2006.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Princípios básicos em geoprocessamento In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2. ed. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI : EMBRAPA-CPAC, 1998. 434 p.
- CARTER, T. R.; ALFSEN, K.; BARROW, E.; BASS, B.; DAI, X. DESANKER, P.; GAFFIN, S. R.; GIORGI, F.; HULME, M.; LAL, M.; MATA, L. J.; MEARNS, L. O.; MITCHEL, J. F. B.; MORITA, T.; MOSS, R.; MURDIYARSO, D.; PABON-CAICEDO, J. D.; PALUTIKOF, J. PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; SEGUIN, B.; SCHOLES, R.J.; WHETTON, P.H. **General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment**. Intergovernmental Panel on Climate Change – Task group on data and scenario support for impact and climate assesement (TGICA) – . [S.l.], 2007. 66 p.
- CHRISTENSEN, J. H.; HEWITSON, B.; BUSUIOC, A.; CHEN, A.; GAO, X.; HELD, I.; JONES, R.; KOLLI, R.K.; KWON,W.-T.; LAPRISE, R.; MAGAÑA RUEDA, V.; MEARNS, L.; MENÉNDEZ, C.G.; RÄISÄNEN, J.; RINKE, A.; SARR A.; WHETTON, P. 2007: Regional Climate Projections. In: **CLIMATE CHANGE 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 849-926.
- COGERH. **Cadastro de Outorga**: 2008. Fortaleza, 2008. 1 CD-ROM.
- COSTA, R. N. T; SOUZA, F. de. Irrigação por superfície In: **Gestão Sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará**. ROSA, M. de F.; GONDIM, R. S.; FIGUEIRÉDO, M. C. B. (eds.). Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, p. 261–288, 2006.
- CUENCA, R. H. Crop water requirements In: **Irrigation System Design: an engineering approach**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., p.173, 1989.
- DÍAZ, J.A.R.; WEATHERHEAD, E.K.; KNOX, J.W.; CAMACHO, E. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. **Regional Environmental Change**, v. 7, n. 3, p. 149-159, 2007.
- DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Downscaling climate model outputs to study the hydrologic impact of climate change – Part I – calibration and validation of downscaling models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS, 6., 2004, Singapore. Conference... Singapore: World Scientific Publishing, 2004a.
- DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Downscaling climate model outputs to study the hydrologic impact of climate change – Part II – Scenario Simulation and Hydrologic Modeling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS, 6., 2004, Singapore. Conference... Singapore: World Scientific Publishing, 2004b.
- DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 145-163, 2005.
- DIXON, B. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis. **Journal of Hydrology**, v. 309, n. 1-4, p. 17-38, 2005.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

- EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL. **Base de dados sobre coeficientes de cultivo**. Disponível em: <<http://www.cnpat.embrapa.br/publicacoes/kc/index.php>>. Acesso em: 11 dez. 2006.
- FISCHER, G.; TUBIELLO, F. N.; VELTHUIZEN, H. V.; WIBERG, D. A. Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990-2008. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 74, n. 7, p. 1083-1107, 2007.
- FORTES, P. S.; PLATONOV, A. E.; PEREIRA, L. S. GISAREG – A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. **Agricultural Water Management**, v. 77, n. 1, p. 159-179, 2005.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall, 1979. 604 p.
- GEORGE, B. A.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Development and testing of a GIS integrated irrigation scheduling model. **Agricultural Water Management**, v. 66, n. 3, p. 159-179, 2004.
- HEGERL, G. C.; ZWIERS, F. W.; BRACONNOT, P.; GILLETT, N. P.; LUO, Y.; MARENGO ORSINI, J. A.; NICHOLLS, N.; PENNER, J. E.; STOTT, P. A. 2007: Understanding and Attributing Climate Change. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007. **Climate change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 663-745, 2007.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001. **Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 217 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007. **Climate change 2007: the physical science basis – summary for policymakers**. Switzerland: WMO/UNEP, 2007. 21 p.
- JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008.
- JESSEL, B.; JACOBS, J. Land use scenario development and stakeholder involvement as tools for watershed management within the Havel River Basin. **Limnologia**, v. 35, n. 1-2, p. 220-233, 2005.
- JONES, R. N. Analysing the risk of climate change using an irrigation demand model. **Climate Research**, v. 14, n. 2, p. 89-100, 2000.
- JONES, R. G.; NOGUER, M.; HASSELL, D. C.; HUDSON, D.; WILSON, S. S.; JENKINS, G. J.; MITCHELL, J. F. B. **Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS**. Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. 39 p.
- JØRGESEN, S. E.; BENDORICCHIO, G. **Fundamentals of ecological modeling**. Oxford: Elsevier, 2001. 530 p.
- KNOX, J. W.; WEATHERHEAD, E. K.; BRADLEY, R. I. Mapping the total volumetric irrigation water requirements in England and Wales. **Agricultural Water Management**, v. 33, n.1, p. 1-18, 1997.
- MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A. T.; GREGORY, J. M.; KITO, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J.; ZHAO, Z. C. 2007: Global Climate Projections. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007. **Climate change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 747-940.
- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GR, A.; JUNG, T. Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E. L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RIAHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H. H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. Special Report on Emission Scenarios. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>>. Acesso em: 03 jan. 2007.
- NORTON, J. P. Algebraic sensitivity analysis of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 8, p. 963-972, 2008.
- NOTTEN, P. W. F. van; ROTMANS, J.; van ASSELT, M. B. A.; ROTHMAN, D. S. An updated scenario typology. **Futures – The Journal of Policy, Planning and Future Studies**, v. 35, n. 5, p. 423-442, 2003.
- NUNES, A. B. de A. **Avaliação ex-post da sustentabilidade hídrica e da conservação ambiental de perímetros irrigados implantados: o caso do perímetro irrigado Jaguaribe-Apodi (DIJA)**. 2006. 176 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.
- POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ET_0 with limited data. Application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, v. 55, n. 2, p. 201-215, 2006.
- RANDALL, D. A.; WOOD, R. A.; BONY, S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T.; FYFE, J.; KATSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R. J.; SUMI, A.; TAYLOR, K. E. Climate models and their evaluation In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007. **Climate change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 589-622.
- SILVA, C. S. de; WEATHERHEAD, E. K.; KNOX, J. W.; RODRIGUEZ-DIAZ, J. A. Predicting the impacts of climate change – A case study of

paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. **Agricultural Water Management**, v. 93, n. 1-2, p. 19-29, 2007.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M. **Sensitivity analysis in practice** – a guide to assessing scientific models. Sussex: Willey, 2004. 219 p

TSANIS, I. K.; NAOUM, S. The effect of spatially distributed meteorological parameters on irrigation water demand assessment. **Advances in Water Resources**, v. 26, n.3, p. 311-324, 2003.

VICTORIA, F. B.; VIEGAS FILHO, J. S.; PEREIRA, L. S.; TEIXEIRA, J. L.; LANA, A. E. Multi-scale modeling for water resources planning and management in rural basins. **Agricultural Water Management**, v. 77, n. 1, p. 4-20, 2005.

WESTHOEK, H.J.; van den BERG, M.; BAKKES, J. A. Scenario development to explore the future of Europe's rural areas. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 114, n. 1, p. 7-20, 2006.

WILBY, R. L.; DAWSON, C. W.; BARROW, E. M. SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, n. 2, p. 147-159, 2002.



Agroindústria Tropical