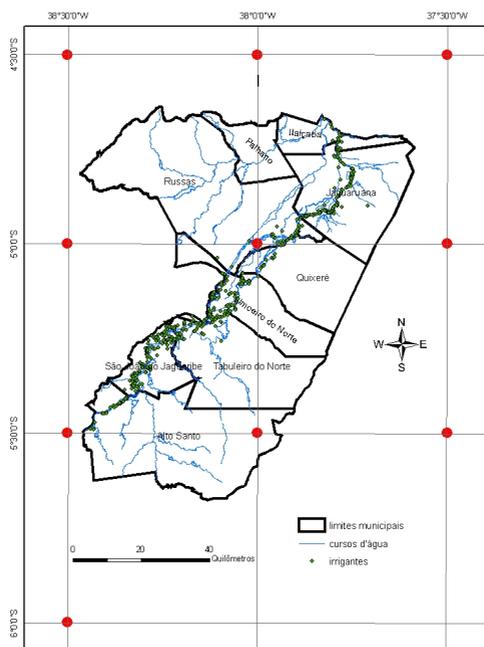


Sensibilidade da Demanda de Água para Irrigação a Mudanças Climáticas e Fatores Operacionais dos Sistemas de Produção



ISSN 1516 - 4675

Dezembro, 2016

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio Ambiente
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 70

Sensibilidade da Demanda de Água para Irrigação a Mudanças Climáticas e Fatores Operacionais dos Sistemas de Produção

Aline de Holanda Nunes Maia
Rubens Sonsol Gondim
Marco Aurélio Holanda de Castro

Embrapa Meio Ambiente
Jaguariúna, SP
2016

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Meio Ambiente

Rodovia SP-340, Km 127,5, Tanquinho Velho
Caixa Postal 69, CEP: 13820-000, Jaguariúna, SP
Fone: + 55 (19) 3311-2700
Fax: + 55 (19) 3311-2640
<https://www.embrapa.br/meio-ambiente/>
SAC: <https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac>

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Maria Isabel de Oliveira Penteado*
Secretária-Executiva: *Cristina Tiemi Shoyama*
Bibliotecário: *Victor Paulo Marques Simão*
Membros: *Rodrigo Mendes, Ricardo A. A. Pazianotto, Maria Cristina Tordin, Nilce Chaves Gattaz, Victor Paulo Marques Simão, Daniel Terao (suplente), Lauro Charlet Pereira (suplente) e Marco Antônio Gomes (suplente)*
Normalização bibliográfica: *Victor Paulo Marques Simão*
Editoração eletrônica: *Silvana Cristina Teixeira*
Tratamento de ilustrações: *Silvana Cristina Teixeira*
Imagem da capa: *Rubens Sonsol Gondim*

1ª edição eletrônica (2016)

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 Meio Ambiente

Maia, Aline de Holanda Nunes

Sensibilidade da demanda de água para irrigação a mudanças climáticas e fatores operacionais dos sistemas de produção / Aline de Holanda Nunes Maia, Rubens Sonsol Gondim, Marco Aurélio Holanda de Castro – Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016.

25 p. il. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Meio Ambiente, ISSN 1516-5675; 70).

1. Irrigação. 2. Agricultura. 3. Mudanças climáticas. 4. Modelo matemático. I. Gondim, Rubens Sonsol. II. Castro, Marco Aurélio Holanda de. III. Título. IV. Série.

CDD 631.587

© Embrapa 2016

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	7
Introdução.....	8
Material e Métodos.....	9
Resultados e Discussão.....	17
Conclusão	23
Referências	24

Sensibilidade da Demanda de Água para Irrigação a Mudanças Climáticas e Fatores Operacionais dos Sistemas de Produção

Aline de Holanda Nunes Maia¹, Rubens Sonsol Gondim² e Marco Aurélio Holanda de Castro³

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a sensibilidade da demanda de água para irrigação numa sub-região da bacia do Rio Jaguaribe, no Estado do Ceará, a variáveis climáticas e fatores operacionais dos sistemas de cultivo. A necessidade hídrica bruta de culturas (NHB) é estimada usando um modelo simplificado baseado num balanço hídrico, a partir de dados de evapotranspiração mensal das culturas (ETP), que depende da temperatura e da composição de culturas, total mensal de chuva (PPT) e eficiência de aplicação de água dos sistemas de irrigação (EA). Foi realizada uma análise de sensibilidade algébrica, para quantificar o efeito de alterações relativas nas seguintes variáveis de entrada do modelo sobre a NHB: temperatura média mensal (T), usada para estimar ETP, PPT, porcentagem de área ocupada com arroz (AA) e EA. Os intervalos de variação para T e PPT foram estabelecidos com base em projeções de um modelo climático regional (2025 – 2055). A amplitude dos fatores operacionais eficiência de irrigação e composição relativa das culturas de arroz e banana foi definida com base num levantamento de campo e

¹ Engenheira Agrônoma, Doutora em Fitotecnia, Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

² Engenheiro Agrônomo, Doutor em Recursos Hídricos, Pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE.

³ Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia, Professor da Universidade do Ceará, Fortaleza, CE.

de cenários hipotéticos, respectivamente. A variável com maior impacto relativo na NHB durante a estação seca (julho a dezembro) é a eficiência de irrigação, principalmente nos sistemas de baixa eficiência. No mês de agosto, um aumento de 15 para 25% na EA corresponde a uma redução de cerca de 180mm na NHB mensal. Essa sensibilidade indica que esse fator operacional tem importante papel nas estratégias para uso sustentável da água e mitigação dos impactos de mudanças climáticas na agricultura irrigada.

Palavras-chave: agricultura irrigada, vulnerabilidade, semiárido, eficiência de aplicação, sensibilidade algébrica.

Sensitivity of Irrigation Water Need to Climate Change and Crop System Operation Factors

Abstract

The aim of this study was to evaluate the sensitivity of the irrigation water need in a sub region in the Jaguaribe basin, Ceará State, to climate variables and operational factors of the crop systems. The crop water requirement (CWR) is estimated by a simplified model based a water balance using monthly evapotranspiration (ETP) which depends upon temperature and crop composition, total rainfall amount (PPT) and irrigation efficiency (IE). Algebraic sensitivity analysis was performed to quantify the influence of relative change in the following water balance input variables on CWR: monthly mean temperature, used for ETP estimation, PPT, percent of area used by rice (RA) and IE. The range of the climate variables was established based on average monthly temperature and rainfall projections of a regional climate model (2025 – 2055). The range of operational factors IE and RA was defined based on a field survey and hypothetical crop composition scenarios, respectively. The variable that has higher impact on NHB during the dry station (July – November), is irrigation efficiency, especially for the low efficiency systems. In August, an increase from 15 to 25% in ISE leads to a reduction of 180mm in the monthly CWR. This high sensitivity points out that this operational factor has an important role in the strategies for sustainable water use and mitigation of climate change impacts in irrigated agriculture.

Key words: irrigated agriculture, vulnerability, semiarid region, irrigation efficiency, algebraic sensitivity

Introdução

Avaliar o impacto de mudanças do clima sobre a demanda de recursos hídricos para irrigação, especialmente em regiões semiáridas, é essencial para nortear a definição de políticas públicas para mitigação e adaptação desses impactos potenciais e redução da vulnerabilidade das populações atingidas. Diversos autores exploraram o referido tema no mundo, entre eles Schlenker et al. (2007) para a Califórnia; Elgaali et al. (2007) para o Arkansas; Silva et al. (2007) para o Sri Lanka e Díaz et al. (2007) para a Espanha. Para o Nordeste do Brasil, citam-se Döll (2002); Döll e Hauschild (2002); Medeiros (2003); Krol et al. (2006); Krol e Bronstert (2007) e Gondim et al. (2008). No entanto, a demanda hídrica das culturas depende não apenas de fatores influenciados por variáveis meteorológicas, como chuva e temperatura, mas também por variáveis operacionais dos sistemas de produção, relacionadas à composição de culturas e nível tecnológico adotado. Uma avaliação objetiva da influência das referidas variáveis sobre a demanda de água permite identificar fatores-chave a serem priorizados em estratégias de adaptação ou no planejamento de ações mitigadoras de mudanças climáticas.

A análise de sensibilidade visa quantificar a contribuição relativa de alterações em cada uma das variáveis independentes sobre uma resposta de interesse (variável prognóstica), nesse caso específico, a necessidade hídrica bruta (Saltelli et al., 2004). Exemplos de análise de sensibilidade relacionados à área de recursos hídricos são descritos em Gates e Ahmed (1995), Dixon (2005) e Izquierdo et al. (2008). Para modelos simples, incluindo pequeno número de variáveis e relações matemáticas utilizando operações elementares, como é o caso de um balanço hídrico, a análise de sensibilidade pode ser feita utilizando métodos algébricos (Norton, 2008). Nesse tipo de análise, denominada análise de sensibilidade algébrica, os coeficientes que expressam a sensibilidade do modelo às variáveis preditoras são obtidos via dedução algébrica a partir do modelo

matemático utilizado. Para modelos mais complexos, a análise de sensibilidade requer o uso de métodos computacionalmente intensivos baseados em re-amostragem (Métodos Monte Carlo). Nessa abordagem, um grande número de valores de cada variável independente é amostrado de um intervalo pré-determinado e o modelo é 'rodado' para cada um deles, produzindo um conjunto de saídas da variável de interesse. São então, utilizadas técnicas de regressão linear ou não linear, para estimar coeficientes de regressão padronizados (Saltelli et al., 2004).

Deve-se, no entanto, diferenciar a análise de sensibilidade baseada em procedimentos Monte Carlo, da análise de incertezas: na análise de sensibilidade, probabilidades de ocorrência não são associadas aos valores dos intervalos especificados para cada variável preditora, enquanto na análise de incertezas, distribuições de probabilidade (ex. normal, uniforme, triangular) são usadas para caracterizar a incerteza de parâmetros do modelo.

O objetivo deste trabalho foi analisar a sensibilidade da demanda de água para irrigação numa região do Baixo-médio Jaguaribe, a alterações na composição de culturas na bacia, na eficiência de aplicação dos sistemas de irrigação dos sistemas adotados, e nas variáveis temperatura e precipitação mensais, considerando projeções de mudanças climáticas.

Material e Métodos

A análise de sensibilidade foi realizada, considerando-se a necessidade hídrica bruta estimada para uma área na bacia do Jaguaribe inserida no quadrante limitado pelas seguintes coordenadas: 4°39'30" e 5°40'00" S e 37°35'30" e 38°27'00" W, totalizando 6.415,10 km² de superfície. Essa área abrange oito municípios do Estado do Ceará: Alto Santo, São João do Jaguaribe, Tabuleiro do Norte, Limoeiro do Norte, Russas, Quixeré, Palhano, e Jaguaruana pertencentes à microrregião do Baixo

Jaguaribe e Itaiçaba, na microrregião Litoral de Aracati (Figura 1). Foram consideradas áreas irrigadas individuais e projetos de irrigação que bombeiam água diretamente do Rio Jaguaribe, conforme Gondim et al. (2008).

A necessidade hídrica bruta (NHB) para cada mês, foi estimada via balanço hídrico simplificado, de acordo com a seguinte expressão:

$$NHB_i = \frac{NHL_i}{EaPond_i} = \frac{(ETP_i - PPT_i)}{EaPond_i} = \frac{(ETo_i \times KcPond_i \times FC) - PPT_i}{EaPond_i} \quad (1)$$

em que: NHB_i é a necessidade hídrica bruta (mm) do conjunto de culturas da área objeto de estudo, no mês i ($i = 1, 2, \dots, 12$), obtida corrigindo-se a necessidade hídrica líquida (mm, NHL_i) pela a eficiência de aplicação média dos sistemas de irrigação utilizados na área (% , $EaPond_i$). ETP_i é a evapotranspiração média (mm) dos conjuntos de culturas; PPT_i , a precipitação pluviométrica média (mm); ETo_i , a evapotranspiração de referência (mm); $KcPond_i$, o coeficiente de cultura ponderado pela área ocupada por cada cultura e FC , o fator médio de cobertura do solo pelas culturas.

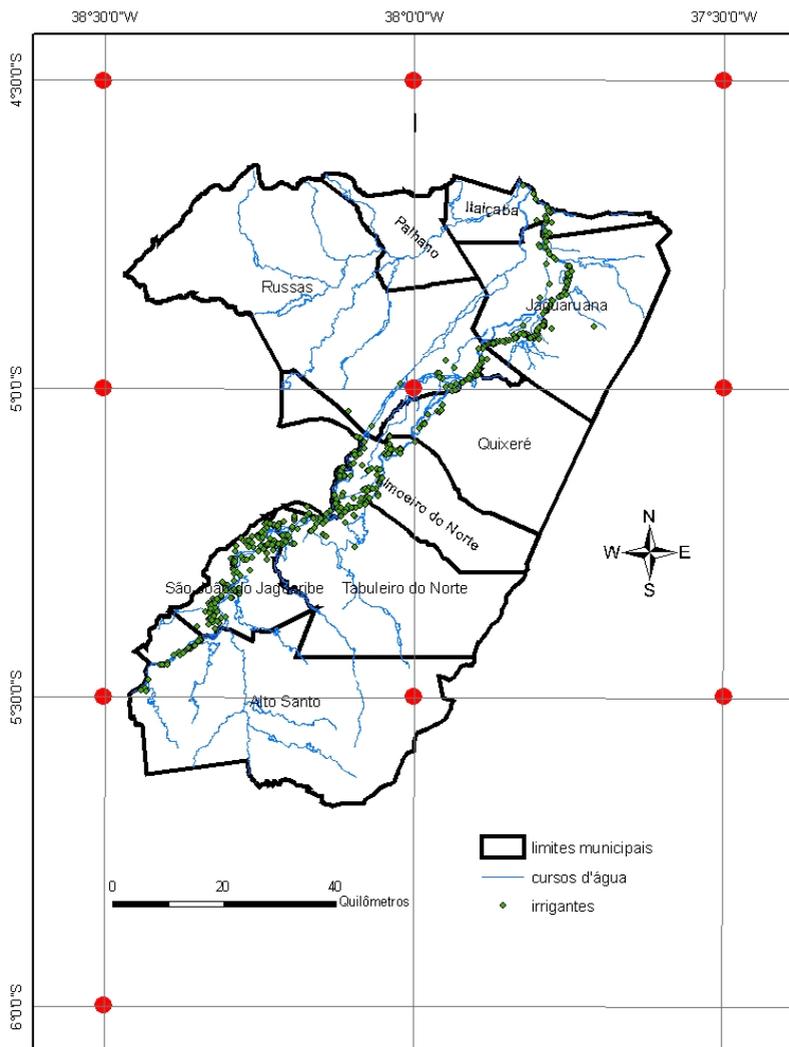


Figura 1. Região de estudo abrangendo oito municípios nas microrregiões do Baixo Jaguaribe e Litoral de Aracati, Estado do Ceará, com localização dos irrigantes.

Neste trabalho, considerou-se para o cálculo da necessidade hídrica bruta a cada mês, a precipitação mensal média (PPT). Assume-se que no início das irrigações, não haja déficit de umidade no solo, conforme preconizado por Díaz et al. (2007) e que as áreas irrigadas possuem terreno plano (sistematizadas ou niveladas) não havendo perdas significativas por escoamento superficial após precipitação ou irrigação.

O método recomendado pelo painel de especialistas da FAO para estimação de evapotranspiração de referência, conhecido como FAO Penman-Monteith é válido globalmente como padrão para cálculo das necessidades hídricas das culturas (ALLEN et al., 1998). No entanto, em regiões onde se dispõe apenas de temperatura do ar, pode-se aplicar a equação de Blaney-Cridde (Doorenbos; Pruitt, 1977), que apesar de ser reconhecida por subestimar a evapotranspiração, resulta em estimativas com satisfatória correlação com os resultados obtidos via FAO Penman-Monteith: 0,83 para região semiárida, segundo Mohan (1991). Neste trabalho, a evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Blaney-Cridde que utiliza apenas dados de temperatura e porcentagem de horas diurnas:

$$ET_{o_i} = phd.(0,46.T_i + 8,13) \quad (2)$$

em que, T_i é a temperatura média mensal (°C) e phd é a porcentagem de horas diurnas no mês em relação ao total anual.

Foram utilizados coeficientes de cultivo mensais (K_c) (ALLEN et al., 1998) para o cálculo dos K_c ponderados, que correspondem às médias ponderadas dos K_c das culturas efetivamente irrigadas em cada mês, utilizando como peso a área ocupada por cada cultura. Essa ponderação, equivale à soma da evapotranspiração das culturas estimada individualmente multiplicada pelos respectivos coeficientes de cultivos de cada área irrigada.

A eficiência de aplicação é um indicador das perdas de água e, conseqüentemente, da porcentagem de água efetivamente disponibilizada para as plantas; não indica o grau de uniformidade na distribuição da água, outro aspecto importante é que mensurado pelo coeficiente de uniformidade de aplicação de água. A exemplo do coeficiente de cultivo ponderado, a eficiência ponderada (EAPond) corresponde a uma média ponderada das eficiências médias de cada sistema de irrigação utilizado na área, a cada mês, utilizando como pesos, as áreas de cada cultura irrigadas por meio de um determinado sistema.

A fração da superfície do solo que é coberta pela vegetação é denominada coeficiente de cobertura da cultura (FC). Este depende do estágio de desenvolvimento da cultura e do espaçamento adotado no plantio. A fração (1-FC) representa a fração do solo que é exposta à luz do sol e ventilação, a qual serve como superfície de evaporação de um solo úmido. Valores típicos de fator de cobertura são apresentados por Allen et al. (1998): estágio inicial: 0,0 – 0,1; estágio de desenvolvimento da cultura: 0,1 – 0,8; estágio intermediário: 0,8 – 1,0; e estágio final: 0,8 – 0,2. Neste trabalho, para simplificação dos cálculos, foi considerado um FC intermediário constante ao longo do ano (0,80).

Para avaliar a sensibilidade da necessidade hídrica bruta das culturas a variáveis climáticas e operacionais do sistema de produção, foram consideradas as seguintes variáveis independentes: temperatura média mensal (T_i), precipitação mensal (PPT_i), eficiência de aplicação (EAPond_i) e composição de culturas na área de estudo, expressa pela porcentagem de área ocupada com arroz (AA_i). Para a análise de composição de culturas, foram escolhidas as culturas do arroz e banana, que ocupam as maiores áreas entre os grãos e frutíferas, respectivamente. Os intervalos de variação para EAPond foram escolhidos considerando cenários hipotético de expansão da cultura do arroz. Para a eficiência de aplicação, as amplitudes basearam-se em dados de levantamento de campo na região do estudo, conforme Costa e Souza (2006) e Nunes (2006).

As amplitudes para as médias mensais das variáveis climáticas foram definidas com base nas médias históricas mensais (1961-90) e projeções médias do modelo regional HadRM3P (2025-2055) para a região de estudo, apresentadas em Gondim et al. (2012). As projeções foram obtidas via sistema PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*), usando condições de contorno do modelo climático global HadRM3P, para os cenários de emissões de gases A2 e B2 (Nakicenovic; SWART, 2000).

Optou-se pela análise de sensibilidade algébrica, pois as equações envolvidas no balanço hídrico são relativamente simples (NORTON, 2008) o que permite a derivação de expressões algébricas para os coeficientes de sensibilidade de cada variável explicativa, sem a necessidade do uso de métodos iterativos como o Monte Carlo.

Assumiu-se que alterações na temperatura e precipitação decorrentes das mudanças climáticas são variáveis independentes, conforme preconizado por Jones (2000).

Foi realizada uma análise de sensibilidade univariada multidimensional, onde se varia um fator (variável explicativa ou independente) a cada vez, mantendo as demais constantes, conforme definido em Saltelli et al. (2004). O cenário original a partir do qual foram feitas as alterações em cada variável utilizou as seguintes informações: porcentagem de horas diurnas no mês em relação ao total anual, temperaturas médias e totais de chuva mensais do período de 1961-1990, coeficientes de cultura e eficiências de irrigação mensais ponderados utilizando os dados reais do mosaico de culturas e sistemas de irrigação adotados (Tabela 1). Para análise de sensibilidade, foram desenvolvidos programas em ambiente SAS® (*Statistical Analysis System*).

Tabela 1. Cenário original das variáveis independentes usadas no cálculo da necessidade hídrica bruta das culturas e projeções de temperatura (T) e chuva (PPT) mensais para os cenários A2 e B2, respectivamente.

Mês	phd*	T	PPT	KcPond**	EAPond***	T-A2	T-B2	PPT-A2	PPT-B2
1	8.660	27.5	72	0.940	0.656	28.8	28.4	87	45
2	7.765	26.8	110	0.940	0.656	28.8	28.6	91	67
3	8.505	26.2	186	1.024	0.682	28.0	27.6	138	153
4	8.150	25.9	188	1.095	0.683	28.3	27.1	124	120
5	8.350	26.2	127	0.940	0.656	28.0	27.8	63	67
6	8.020	26.6	54	0.940	0.656	28.4	28.1	24	22
7	8.310	26.9	23	0.981	0.614	28.5	27.9	11	10
8	8.390	27.5	6	0.982	0.622	28.5	28.2	3	3
9	8.200	28.1	5	0.945	0.622	28.7	28.3	4	3
10	8.565	28.6	4	0.870	0.623	28.7	30.0	2	2
11	8.385	28.8	13	0.905	0.616	29.4	29.0	6	7
12	8.700	28.3	32	0.918	0.658	29.0	28.7	14	15

* Porcentagem de horas diurnas em relação ao total anual; ** Coeficiente de cultura ponderado; *** Eficiência de aplicação de água ponderada.

Os resultados da análise de sensibilidade absoluta (CS-NHB_j) e relativa (CSR-NHB_j) da necessidade hídrica bruta, derivados algebricamente a partir da Equação 1. Nos modelos lineares para as variáveis explicativas (X_j) temperatura, precipitação e porcentagem da área irrigada ocupada com arroz, onde a função de sensibilidade é da forma $NHB_j = \alpha_j + \beta_j \cdot X_j$, os CS-NHB_j, para cada variável j, correspondem aos respectivos coeficientes angulares β_j dos modelos lineares para cada mês.

Para a X_j = EAPond cuja expressão algébrica da NHB é um modelo não linear em X_j, a sensibilidade decresce com os valores de EAPond. Nesse caso, foram calculados coeficientes de sensibilidade médios para dois intervalos de variação de EAPond (15 a 50% e 50 a 95%) para que a variação do coeficiente de sensibilidade absoluta ao longo dos valores de EAPond fosse considerada.

Como os CS-NHB_i têm unidades de mensuração distintas (mm.°C⁻¹; mm.mm⁻¹ ou mm.pp⁻¹) e não são comparáveis, foram derivados coeficientes de sensibilidade relativa de cada mês *i* (CSR-NHB_i), para cada uma das variáveis climáticas e operacionais (*x*) que influenciam o modelo (Equação 1). Eles expressam a variação na NHB das culturas irrigadas, no mês *i*, em consequência de variações de um ponto percentual (pp) do intervalo transformado de variação de *x*, obtido expressando-se os limites e cada intervalo (*x*_{inf}, *x*_{sup}) como porcentagem do seu ponto médio *x*_{med}. Para as variáveis com função de sensibilidade é linear os CSR-NHB_i são dados pela expressão (Equação 3):

$$\text{CSR - NHB}_i = \frac{\Delta\text{NHB}_i}{\Delta\text{PCT}_x} = \frac{\Delta\text{NHB}_i}{100 \cdot (x_{\text{sup}} - x_{\text{inf}}) \cdot (x_{\text{med}})^{-1}} \quad (3)$$

Na qual, ΔNHB_i é a variação entre as NHB correspondentes aos extremos superior e inferior do intervalo de variação de *x*, respectivamente para cada mês (*i* = 1, 2, ..., 12), expressa em mm; ΔPCT_x é a amplitude de variação em *x* expressa como porcentagem do ponto médio do intervalo. Para temperatura média (*T*), por exemplo o CSR-NHB é expresso em mm.(pp)⁻¹, onde pp corresponde a 1 pp da amplitude do intervalo entre $100T_{\text{inf}} \cdot (T_{\text{med}})^{-1}$ e $100T_{\text{sup}} \cdot (T_{\text{med}})^{-1}$.

Para eficiência de aplicação, a CSR-NHB foi calculada para dois intervalos de variação definidos para EAPond (15 a 50% e 50 a 95%) usando a mesma expressão definida em (3).

Resultados e Discussão

As expressões algébricas dos coeficientes de sensibilidade da necessidade hídrica bruta das culturas (CS-NHB_i) na área de estudo, para cada mês, são apresentadas na Tabela 2. Seus correspondentes valores numéricos e os respectivos valores dos coeficientes de sensibilidade relativa (CS-NHB_i) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Intervalos de variação adotados e expressões algébricas dos parâmetros β dos modelos que representam a necessidade hídrica bruta (NHB) em função das variáveis independente do modelo simplificado usado para estimação da NHB das culturas irrigadas na área de estudo, escolhidas para análise de sensibilidade.

Variável*	Intervalo de variação	Função de sensibilidade	Expressão algébrica ** dos coeficientes de sensibilidade (β)
Temperatura média mensal (T, °C)	25 - 30	$NHB = \alpha + \beta \cdot T$	$0,368 \cdot phd \cdot KcPond \cdot (EAPond)^{-1}$
Precipitação média mensal (PPT, mm)	0 - 200	$NHB = \alpha + \beta \cdot PPT$	$(EAPond)^{-1}$
Porcentagem da área ocupada com arroz (AA, pp)	15 - 85	$NHB = \alpha + \beta \cdot AA$	$phd \cdot (KcA - KcB) \cdot (0,368 \cdot T + 6,504) \cdot (EAPond)^{-1}$
Eficiência de aplicação ponderada (EAPond, pp)	15 - 95	$NHB = \beta \cdot (EAPond)^{-1}$	$phd \cdot (0,368 \cdot T + 6,504) \cdot (KcPond)$

* Para as variáveis T, PPT e EAPond, com funções de sensibilidade lineares, os coeficientes β correspondem aos coeficientes de sensibilidade absoluta da NHB (CS-NHB). Para EAPond os CS-NHB são derivados indiretamente da função de sensibilidade.

** Nas expressões algébricas, KcPond é o coeficiente de cultura ponderado; EAPond, a eficiência de aplicação de água ponderada; phd é a porcentagem de horas diurnas no mês em relação ao total de horas anual; KcA e KcB são os coeficientes de cultura para arroz e banana, respectivamente.

Tabela 3. Coeficientes de sensibilidade absolutos (CS-NHB) e relativos (CSR-NHB) da necessidade hídrica bruta mensal (NHB) das culturas irrigadas na área de estudo, para cada uma das variáveis climáticas e fatores operacionais considerados na análise de sensibilidade: temperatura média mensal (T), precipitação pluviométrica média mensal (PPT), eficiência de aplicação ponderada (EAPond) e fração da área irrigada ocupada pela cultura do arroz (AA).

Mês	Coeficientes de sensibilidade (CS) da necessidade hídrica brutas (NHB)									
	T (°C)**		PPT (mm)		AA*		EAPond **			
	CS-NHB (mm.°C ⁻¹)	CSR-NHB (mm.pp ⁻¹)	CS-NHB (mm.mm ⁻¹)	CSR-NHB (mm.pp ⁻¹)	CS-NHB (mm.pp ⁻¹)	CSR-NHB (mm.pp ⁻¹)	15-50%		50-95%	
						CS-NHB (mm.pp ⁻¹)	CSR-NHB (mm.pp ⁻¹)	CS-NHB (mm.pp ⁻¹)	CSR-NHB (mm.pp ⁻¹)	CS-NHB (mm.pp ⁻¹)
1	4.56	1.25	-1.52	-1.52	.	.	-8.95	-2.91	-1.41	-1.03
2	4.09	1.12	-1.52	-1.52	.	.	-1.97	-0.64	-0.31	-0.23
3	.	.	-1.47	-1.47	.	.	.	.	.	.
4	.	.	-1.46	-1.46	.	.	.	.	.	.
5	4.40	1.21	-1.52	-1.52	.	.	-0.65	-0.21	-0.10	-0.07
6	4.22	1.16	-1.52	-1.52	.	.	-9.83	-3.20	-1.55	-1.13
7	4.89	1.34	-1.63	-1.63	-0.12	-0.06	-15.41	-5.01	-2.43	-1.76
8	4.87	1.34	-1.61	-1.61	0.24	0.12	-17.88	-5.81	-2.82	-2.05
9	4.58	1.26	-1.61	-1.61	-0.48	-0.24	-16.97	-5.51	-2.68	-1.94
10	4.40	1.21	-1.61	-1.61	-0.50	-0.25	-16.42	-5.34	-2.59	-1.88
11	4.53	1.25	-1.62	-1.62	-1.24	-0.62	-15.79	-5.13	-2.49	-1.81
12	4.46	1.23	-1.52	-1.52	.	.	-14.02	-4.56	-2.21	-1.61

* Nos meses de dezembro a junho a cultura do arroz não é plantada na região de estudo.

** Nos meses de março e abril, quando são considerados os valores atuais das demais variáveis a precipitação excede a evapotranspiração real, assim as necessidades hídricas líquida e bruta são nulas para esses meses.

Conforme relata Dixon (2005), a análise de sensibilidade identifica aquelas entradas do modelo cujas variações relativas mais influenciam a variável prognóstica. Neste estudo, essa informação é útil para escolha de fatores operacionais importantes a serem alterados em possíveis estratégias de mitigação de impactos de mudanças climáticas na agricultura irrigada. Do ponto de vista metodológico, esse tipo de análise é também útil para indicar as principais variáveis ou parâmetros a serem considerados em análises de incertezas de modelos de análise quantitativa de risco.

Para todas as variáveis, em todos os meses, a sensibilidade da NHB, mostra padrões lineares (Figura 2, A-C), exceto para eficiência de aplicação ponderada, onde a sensibilidade decresce de forma não linear com o aumento da eficiência (Figura 2(D); Figura 3), indicando que incrementos unitários nesse fator, para irrigantes com menor eficiência, implicam numa maior redução de demanda hídrica quando comparada à redução para irrigantes com maior nível de eficiência.

A sensibilidade da NHB à temperatura (T) mostrou-se uniforme ao longo do ano, variando entre $4,09 \text{ mm.}(\text{°C})^{-1}$, em fevereiro a $4,89 \text{ mm.}(\text{°C})^{-1}$, em julho. Os coeficientes de sensibilidade foram positivos para todos os meses: incrementos na temperatura média mensal implicam em aumentos na NHB mensal (Figura 2(A)), derivados de aumentos na evapotranspiração das culturas. O CS-NHB médio para temperatura foi $4,54 \text{ mm.}(\text{°C})^{-1}$ indicando que cada acréscimo de um grau na temperatura corresponde um acréscimo de cerca de 4,5 mm, em média, para a NHB mensal. A sensibilidade relativa variou de 1,12 a $1,34 \text{ mm.}(\text{pp})^{-1}$ (Tabela 3).

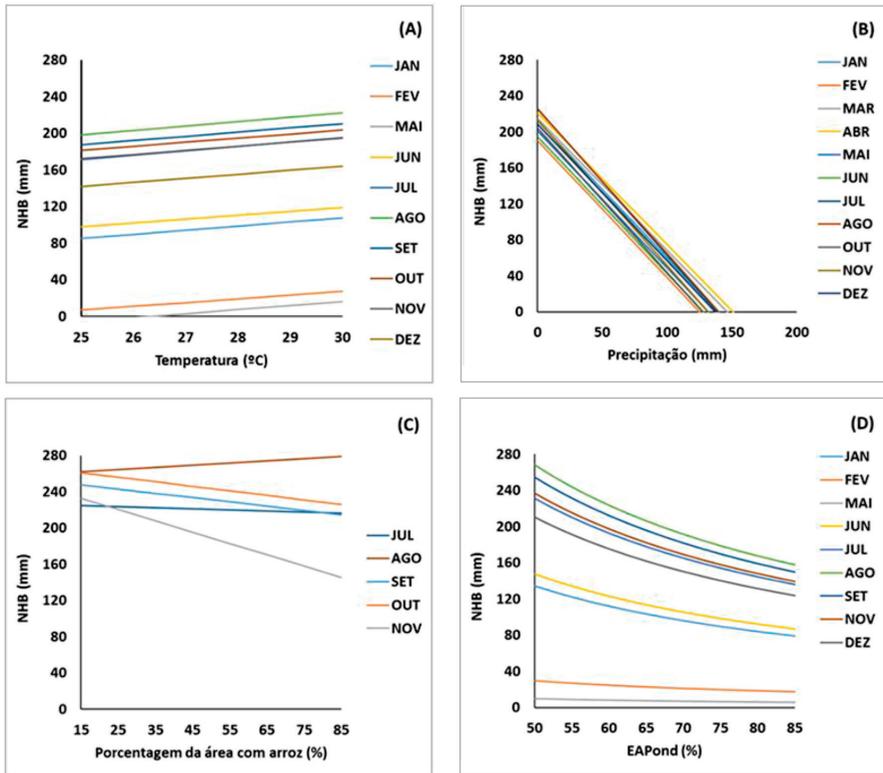


Figura 2. Sensibilidade da necessidade hídrica bruta (NHB) das culturas a variações nas variáveis independentes, na sub-região da bacia do Jaguaribe objeto de estudo, abrangendo oito municípios nas microrregiões do Baixo Jaguaribe e Litoral de Aracati, Estado do Ceará: (A) temperatura média mensal (T) com localização dos irrigantes; (B) precipitação mensal média (PPT); (C) porcentagem da área total irrigada (AA), a cada mês, ocupada pela cultura do arroz e (D) eficiência ponderada de aplicação de água (EAPond) dos sistemas de irrigação na faixa de 50 - 85%. Nos meses de março e abril, para EAPond e T, quando são considerados os valores atuais das demais variáveis a precipitação excede a evapotranspiração real, assim a NHB não está definida. Para AA, foram considerados apenas os meses em que o arroz é cultivado na região.

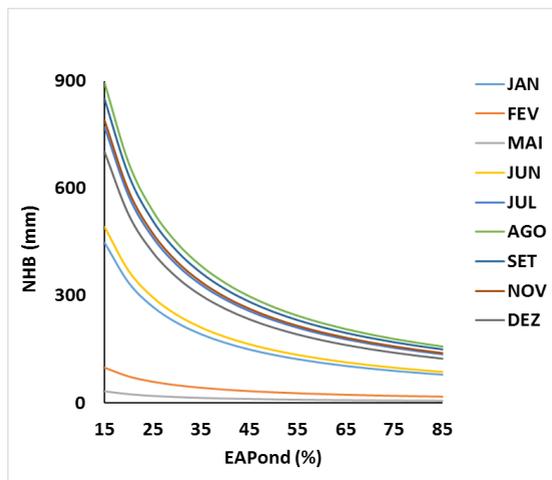


Figura 3. Sensibilidade da necessidade hídrica bruta (NHB) das culturas a variações eficiência ponderada de aplicação de água (EAPond) dos sistemas de irrigação adotados, a cada mês, na sub-região da bacia do Jaguaribe objeto de estudo, abrangendo oito municípios nas microrregiões do Baixo Jaguaribe e Litoral de Aracati, Estado do Ceará. Foi considerada apenas a faixa de alta eficiência (50 – 85%). Nos meses de março e abril, para EAPond e T, quando são considerados os valores atuais das demais variáveis a precipitação excede a evapotranspiração real, assim a NHB não está definida.

Incrementos na precipitação correspondem a reduções na NHB, decorrentes de redução no déficit hídrico – essa relação é caracterizada por coeficientes de sensibilidade negativos em todos os meses (Figura 2(B)). A sensibilidade relativa à precipitação (PPT) também apresentou baixa variabilidade interanual e magnitudes similares à sensibilidade à temperatura. Os coeficientes CS-NHB, em valores absolutos, variaram entre 1,47 (abril) e 1,63 $\text{mm} \cdot (\text{mm})^{-1}$, (julho), com média de 1,55 $\text{mm} \cdot (\text{mm})^{-1}$ (Tabela 3); assim, um acréscimo de 10mm na precipitação mensal corresponde a uma redução de 15,5 mm ($10 \times 1,55$) na NHB. No caso específico da PPT, os CS-NHB ($\text{mm} \cdot (\text{mm})^{-1}$) tem valores numéricos iguais aos CSR-NHB ($\text{mm} \cdot (\text{pp})^{-1}$) porque 1 mm corresponde a 1% do ponto médio (100mm) do intervalo de variação da precipitação (0-200 mm).

Nos meses de dezembro a junho, o arroz não é cultivado na região, assim, o CS-NHB não foi calculado para a porcentagem de área ocupada com arroz (AA) nesse período. Nos períodos em que o arroz é cultivado, que corresponde à estação seca, a resposta da NHB a incrementos em AA é linear e positiva para todos os meses, exceto para agosto, mês em que o coeficiente de cultivo para o arroz é máximo e superior ao da cultura da banana (Figura 2(C)). A sensibilidade da NHB à AA é de pequena magnitude (0,06 a 0,62; Tabela 3), isto é, a substituição de áreas com a cultura de banana por áreas com arroz implica em pequenas alterações na NHB ($NHB < 8$ mm mensais) (Tabela 2). Isso ocorre porque os coeficientes de cultura (K_c) para as duas espécies são similares (banana: 1,1 em todos os meses; arroz: 0,9 a 1,2) durante os meses em que o arroz é cultivado (julho a novembro).

A resposta relativa da NHB (CSR-NHB) a incrementos na eficiência de aplicação, na faixa de baixa eficiência, foi superior à das demais variáveis em todos os meses em que há déficit hídrico, exceto nos meses de fevereiro e maio nos quais esse déficit é reduzido (< 60 mm) em decorrência de maiores totais mensais de chuva nesse período que corresponde aos extremos da quadra chuvosa na região (fevereiro a maio). Mesmo na faixa de sistemas com eficiência mais alta (50 a 95%), os CSR-NHB para ES são superiores aos coeficientes para as demais variáveis nos meses de julho a dezembro, quando o déficit hídrico é maior. Nos meses de março e abril, não foi calculada a sensibilidade da NHB à EAPond; nesses meses não há déficit hídrico, quando são consideradas as médias mensais históricas de chuva e temperatura, pois a precipitação excede a evapotranspiração (Tabela 3). Os resultados de Gates e Ahmed (1995) indicaram também que a eficiência de irrigação deve ser considerada como importante fator em planos de mitigação de impactos de mudanças climáticas na agricultura irrigada.

Conclusões

A substituição de áreas irrigadas com a cultura da banana pela cultura do arroz implica em alterações de pequena magnitude na necessidade hídrica bruta mensal da região uma vez que a evapotranspiração dessas culturas é similar para a maioria dos meses.

A sensibilidade da necessidade hídrica bruta (NHB) a variações na eficiência de aplicação (EA), para sistemas com baixa eficiência, é superior à resposta às mudanças na composição de culturas irrigadas arroz/banana ou às alterações climáticas projetadas para chuva e temperatura em todos os meses. Esse tipo de resposta indica que a EA dos sistemas é um importante fator operacional a ser considerado em estratégias de mitigação dos efeitos de mudanças climáticas na agricultura irrigada.

Para um mesmo incremento na eficiência de irrigação, os irrigantes com baixo nível de eficiência contribuem para maior redução da necessidade hídrica das culturas que os irrigantes com alto nível de eficiência.

A capacitação dos irrigantes e adequação dos sistemas de irrigação, principalmente os com baixa eficiência, tem importante papel em políticas de uso racional da água na agricultura irrigada, contribuindo para as estratégias de mitigação e adaptação do setor às mudanças climáticas.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- COSTA, R. N. T.; SOUZA, F. de. Irrigação por superfície In: ROSA, M. de F.; GONDIM, R.S.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. (Ed.). **Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2006. p.261-288.
- 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.
- 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.
- DÖLL, P. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. **Climatic Change**. v. 54, n. 3, p. 269-293, 2002.
- DÖLL, P.; HAUSCHILD, M. Model-based regional assessment of water use: an example for semi-arid Northeastern Brazil. **Water International**, v. 27, n. 3, p. 310-320, 2002.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
- ELGAALI, E.; GARCIA, L. A.; OJIMA, D. S. High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand. **Climatic Change**, v. 84, n. 3, p. 441-461, 2007.
- GATES, T. K.; AHMED, S. Sensitivity of predicted irrigation-delivery performance to hydraulic and hydrologic uncertainty. **Agricultural Water Management**, v. 27, n. 3-4, p. 267-282, 1995.
- GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de; EVANGELISTA, S. R. de M.; TEIXEIRA, A. dos S.; JÚNIOR, S. C. de F. F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v. 43, n. 12, p.1657-1664, 2008.
- GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de; MAIA, A. de H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK JUNIOR, S. C. de F. Climate change impacts on irrigation water needs in the Jaguaribe River Basin. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, p. 355-365, 2012.
- IZQUIERDO, J.; MONTALVO, I.; PÉREZ, R.; HERRERA, M. Sensitivity analysis to assess the relative importance of pipes in water distribution networks. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 48, n. 1-2, p. 268-278, 2008.
- JONES, R. N. Analysing the risk of climate change using an irrigation demand model. **Climate Research**, v.14, n. 2, p. 89-100, 2000.
- KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modeling of climate change impacts on natural resources and resources usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 2, p. 259-268, 2007.

KROL, M. S.; JAEGER, A.; BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A. Integrated modeling of climate change, water, soil, agricultural and social-economic processes: A general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid Northeast of Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 328, n. 3-4, p. 417-431, 2006.

MEDEIROS, Y. D. P. Análise dos impactos das mudanças climáticas em região semi-árida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 127-136, 2003.

MOHAN, S. Intercomparison of evapotranspiration estimates. **Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 36, n. 5, p. 447-460, 1991.

NORTON, J. P. Algebraic sensitivity analysis of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 8, p. 963-972, 2008.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (Ed.). **IPCC: emission scenarios**. Cambridge: Cambridge University, 2000. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>> Acesso em 3. Jan. 2007.

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) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

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

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.

SCHLENKER, W.; HANEMANN, W. M.; FISHER, A. C. Water availability, degree-days and the potential impact of climate change on irrigated agriculture in California. **Climatic Change**, v. 81, n. 1, p. 19-38, 2007.

Embrapa

Meio Ambiente

MINISTÉRIO DA
**AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO**

