

Impacto das mudanças climáticas e do uso agrícola do solo no processo hidrológico no bioma Mata Atlântica

Impact of climate change and agricultural land use on the hydrological process in the Atlantic Forest biome

Adilson Pinheiro

Vander Kaufmann

Edson Torres

Haline Depiné Anesi

Submetido: 22/10/2015

Revisão: 15/11/2015

Aprovado: 17/11/2015

RESUMO: As mudanças climáticas globais têm sido relacionadas com alterações nos fenômenos climáticos, os quais refletem nos regimes de precipitação e nos processos hidrológicos. Associado às estas mudanças, o uso agrícola do solo pode afetar a distribuição dos fenômenos do ciclo hidrológico. Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar os impactos do uso agrícola do solo e das mudanças climáticas nos componentes do ciclo hidrológico no bioma Mata Atlântica. O modelo SWAP de transferência solo-planta-água foi calibrado, tendo por base medições efetuadas em lisímetro de drenagem e, efetuadas simulações para os cenários de clima atual (período de 1960 a 1990) e, futuros (período de 2071 a 2100) A2 e B2, conforme definido no quarto relatório do IPCC. Foram empregados dados diários obtidos do Sistema PRECIS (Providing REgional Climates for Impact Studies), gerados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com grades de $0,5 \times 0,5^\circ$. Partindo-se da calibração do modelo SWAP para a cultura de milho, foi realizada a simulação para as culturas de aveia, cebola, feijão, milho, soja, trigo, pastagem, floresta e reflorestamento. Para cada cultura, foram adotados os parâmetros fenótipos, baseado nos dados disponíveis na literatura. Nota-se que as anomalias e variações foram diferentes para as culturas temporárias e perenes. As mudanças climáticas promoveram redução do escoamento de drenagem, que alimenta os cursos de água em períodos de estiagem e aumento do escoamento superficial, geradores de enchentes.

PALAVRAS-CHAVE: Mudanças climáticas globais, uso do solo, ciclo hidrológico.

ABSTRACT: Global climate changes have been related to changes in climatic phenomena, which are reflected by precipitation regimes and hydrological processes. Associated with these changes, agricultural land use may affect the distribution of the hydrological cycle phenomena. This work aimed to evaluate the impacts of the agricultural use of soil and climate change on the hydrological cycle components in the Atlantic Forest biome. The SWAP model was calibrated based on measurements made in a drainage lysimeter and simulations performed for the current climate scenarios (from 1960 to 1990) and future (period 2071-2100) A2 and B2 as defined in the fourth report of IPCC. Daily data obtained from the PRECIS System (Providing Regional Climates for Impact Studies), generated by the National Institute for Space Research (INPE) with $0.5 \times 0.5^\circ$ grids were employed. Starting with the calibration of the SWAT model for the maize crop, the simulations were performed for oats, onions, beans, corn, soybeans, wheat, pasture, forest and reforestation crops. For each crop, phenotypic parameters were adopted, based on data available in the literature. It is noted that anomalies and variations were different for the temporary and perennial crops. Climate change promotes reduction of internal drainage that supplies streams during drought periods and increases surface runoff generating floods.

KEY-WORDES: Global climate change, land use, hydrological cycle.

INTRODUÇÃO

O processo hidrológico é um importante elemento para o desenvolvimento das plantas e para o uso múltiplo da água na bacia hidrográfica. Excessos hídricos ocorrem quando a precipitação produz aumento do volume de água armazenada no sistema

ambiental, de modo a atender as demandas de água sem restrição. Em situação contrária ocorre o déficit hídrico, o qual provoca impacto negativo no crescimento e desenvolvimento das plantas (BOLLIG et al., 2014; FAROOQ et al., 2009; ASCH et al., 2005). O déficit hídrico produz alterações no comportamento vegetal cuja irreversibilidade vai depender

do genótipo, da duração, da severidade e do estádio de desenvolvimento da planta. O armazenamento de água no solo varia em razão da quantidade de água que infiltra e dos fatores que contribuem para que esta permaneça armazenada ao alcance do sistema radicular. Isto é influenciado pelas propriedades físicas, mecânicas e hídricas do solo e por fatores locais, como a percentagem de cobertura da vegetação do solo (SILVA et al., 2014).

O abastecimento de água para as diversas atividades humanas dependem da produção hídrica nas bacias hidrográficas. Fatores naturais e antrópicos, como mudanças climáticas e de mudança de uso do solo (YANG et al., 2015; PRICE, 2011), podem influenciar na magnitude da quantidade de água disponível para atendimento dos usos múltiplos dos recursos hídricos (LÓPEZ-MORENO et al., 2014). Em período de baixa precipitação, os sistemas hídricos superficiais são alimentados pelo escoamento de base, resultantes da drenagem de água no perfil do solo. Em períodos de precipitação elevada, os escoamentos superficiais e subsuperficiais formam as ondas de cheias geradoras de danos econômicos, sociais e ambientais (GAÁL et al., 2012). Neste contexto, é necessário fornecer informações aos gestores de recursos hídricos sobre as mudanças potenciais no ciclo hidrológico visando o desenvolvimento de estratégias de mitigação ou de adaptação aos impactos produzidos pelas mudanças do uso do solo ou de mudanças climáticas (BURNEY et al., 2014; MAWDSLEY et al., 2009).

Mudanças climáticas correspondem a todas as formas de alteração do clima médio de uma determinada região, independentemente da sua natureza estatística, escala temporal ou causas físicas. Em escalas continental e regional, numerosas mudanças ao longo do tempo foram observadas no clima. De acordo com o IPCC (2014), as mudanças climáticas têm sido associadas ao aumento das emissões dos gases de efeito estufa para a atmosfera, principalmente devido às ações antrópicas. Segundo IPCC (2014), desde o início do período industrial houve um incremento de 40% na concentração do dióxido de carbono na atmosfera, sendo que atualmente está em torno de 400 ppm (partes por milhão), a maior concentração em 800 mil anos. No Brasil, diferentemente dos países classificados como Anexo 1 pelo Protocolo de Quioto, o setor de uso da terra, as mudanças do uso da terra e as florestas representam 77% das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, e a queima de combustíveis fósseis apenas 18% (MIGUEZ; OLIVEIRA, 2010). A mudança no uso do solo é o segundo maior

emissor de gases estufa, principalmente o dióxido de carbono, evidenciado nas áreas tropicais, devido ao desmatamento e as queimadas (PAIVA; FARIA, 2007). As mudanças climáticas possuem implicações para o sistema humano (econômico e social) e também para o sistema natural (flora, fauna, solo e água) e poderá desencadear mudanças significativas na utilização de recursos naturais, na produção agropecuária e em diferentes atividades econômicas (IPCC, 2014).

Diferentes cenários das principais forças motrizes de emissão dos gases de efeito estufa têm sido propostos, baseados na demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudança na tecnologia. As projeções mostram que a região sul do Brasil deve ter aumento da temperatura do ar e da precipitação (MARENGO et al., 2009), podendo gerar eventos de chuva mais intensos e frequentes. Isto poderá afetar a disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas.

Mudanças na cobertura do solo podem alterar o índice de área foliar, a evapotranspiração, o conteúdo de água no solo, a capacidade de infiltração de água no solo, geração de escoamentos superficiais, os regimes de escoamento, a recarga dos aquíferos, a rugosidade das vertentes e dos canais, assim como erosão do solo por meio das complexas relações entre vegetação, solo, relevo e processos climáticos. Estudos tem mostrado a magnitude dos impactos associados às mudanças do uso do solo em diferentes bacias e condições climáticas (TU, 2009; MAO; CHERKAUER, 2009; ZHOU et al., 2011; JARSJÖ et al., 2012; MONTENEGRO; RAGAB, 2012; CUO et al., 2013; LÓPEZ-MORENO et al., 2014). Arroio Junior e Mauad (2015) determinaram o impacto das mudanças climáticas no regime de vazões na bacia do ribeirão do Feijão, localizado no Estado de São Paulo. Schardong et al. (2014) avaliaram o efeito das mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluentes em sistemas Cantareira, usado para abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo. Estes estudos avaliaram os regimes de vazões.

Poucos estudos foram desenvolvidos para as condições climáticas e de uso do solo do bioma Mata Atlântica no Brasil (PINHEIRO et al., 2012; PERAZZOLI et al., 2013). Estes estudos apresentaram o impacto dos cenários climáticos A2 e B2 sobre os processos hidrológicos e o regime hídrico em uma bacia agrícola.

Neste contexto, este artigo tem por objetivo apresentar um estudo do impacto do uso agrícola do solo e das mudanças climáticas nos componentes do ciclo hidrológico. Um modelo de transferência

solo-planta-água foi ajustado, tendo por base medições efetuadas em lisímetro de drenagem e, efetuadas simulações para os cenários de clima atual e, futuros A2 e B2 (NAKICENOVIC; SWART, 2000).

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho compreendeu a calibração do modelo SWAP com as séries de dados hidrológicos coletados em um lisímetro volumétrico de drenagem, instalado na bacia do ribeirão Concórdia, no município de Lontras, SC. A partir da verificação da performance do modelo, fez-se a aplicação dos dados climáticos do período 1961 a 1990, considerado a condição de baseline, que representa o cenário do clima atual. Foram efetuadas as simulações para os cenários climáticos futuros B2 e A2, desenvolvidos pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) para o período de 2071 a 2100. Os cenários climáticos se baseiam em diferentes projeções das principais forças motrizes das emissões dos gases de efeito estufa para o futuro. Desta forma, com base no desenvolvimento demográfico, tecnológico e econômico, o cenário A2, é considerado pessimista, ou seja, um cenário de alta emissão dos gases de efeito estufa e o cenário B2 com baixa emissão é considerado otimista.

Modelo SWAP

O modelo SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) tem por base a equação de Richards, que resulta da combinação das equações de continuidade e de Darcy (VAN DAM, 2000). Esta equação garante o balanço de massa e a continuidade da solução em meios heterogêneos. O modelo SWAP integra fluxo de água e calor, transporte de solutos, crescimento detalhado de culturas em diferentes perfis de solo, vários níveis de drenagem regional e gestão de água de superfície. Para simular o movimento vertical de água, o modelo utiliza a equação de Richards, expressa por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h) \quad (1)$$

onde h é o potencial de pressão no solo (cm); $K(h)$ é a condutividade hidráulica (cm dia^{-1}); θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); t é o tempo (d); z é a posição vertical (cm) e $S(h)$ é a taxa de extração do solo pelas raízes ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$).

A equação de Richards requer o conhecimento das características hidrodinâmicas do solo e dos elementos da relação entre o potencial matricial e teor de água no solo, como a curva de retenção de água e a condutividade hidráulica. A disponibilidade de água é determinada pelas características físicas do solo, que determinam a quantidade máxima de água que o solo pode armazenar e suprir a cultura. O balanço de água na zona radicular é dado pela diferença entre as entradas (precipitação e irrigação) e saídas (intercepção, transpiração, evaporação, infiltração, drenagem interna no perfil do solo e escoamento superficial) de água no solo (BARROS, 2010).

O SWAP simula o balanço hídrico, admitindo que um perfil vertical de solo cultivado armazena uma quantidade de água (W) em certo instante de tempo, cuja variação de armazenamento pode ser expressa por:

$$\Delta W = P - R - P_i - T_a - E_a - P_e \quad (2)$$

onde, ΔW é a variação do armazenamento de água no solo (mm), P é a precipitação pluviométrica (mm), R é o escoamento superficial (mm), P_i é a interceptação de água pela vegetação (mm), T_a é a transpiração (mm), E_a é a evaporação do solo (mm) e P_e é o escoamento de drenagem (mm).

A evapotranspiração potencial de solo nu e com vegetação foi estimada pela equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965). Este valor é utilizado na determinação da evaporação e da transpiração real. A evaporação real depende do conteúdo de água no solo e da capacidade de transporte de vapor de água para a superfície do solo e a transpiração real depende da umidade do solo, da salinidade e da densidade de raízes (KROES et al., 2008), que varia para as diferentes culturas.

Dispositivo experimental

A área de aplicação do modelo é o solo da bacia do ribeirão Concórdia, localizada no município de Lontras-SC, onde foi instalado um lisímetro volumétrico de drenagem. O lisímetro é constituído por uma amostra indeformada de solo, de $1,0 \text{ m}^3$. O solo predominante na bacia é classificado como Cambissolo. O lisímetro foi construído com placas de acrílico com 8 mm de espessura e preenchido com uma coluna de solo indeformada com $1,00 \text{ m}^2$ de base e $1,00 \text{ m}$ de altura. O lisímetro foi confeccionado com o uso de duas caixas de acrílico, a primeira vazada, que foi

utilizada na coleta da amostra do solo indeformado e a segunda para a confecção da base do lisímetro, conforme é descrito por Oliveira et al. (2010). Próximo à superfície e a base do solo, foram instaladas tubulações para coleta do escoamento superficial e da drenagem. O escoamento de drenagem representa a recarga do aquífero subterrâneo.

O monitoramento do escoamento superficial e de drenagem no lisímetro foi realizado por meio de pluviógrafos de báscula manufaturados, de acordo com Braga et al. (2009). Foram estabelecidas curvas de calibração para cada pluviôgrafo, permitindo efetuar a compensação do volume de coleta, em função da intensidade da precipitação. Cada ciclo é registrado no *datalogger* e, pela curva de calibração, transformado em altura de lâmina de água escoada. Os registros são armazenados em intervalos de tempo de 15 min. Além do uso de sistemas automatizados foram utilizados galões de 5 e 50 L, para a coleta do escoamento superficial e de drenagem, respectivamente, conectados ao lisímetro por meio de tubulação de PVC. Após a ocorrência de eventos de chuva, é efetuada a retirada dos volumes de água armazenada nos galões.

O lisímetro é equipado com tensiómetros de pressão para medição da tensão no solo. São três sensores de pressão UMS T4, instalados nas profundidades de 10, 30 e 70 cm, com medida contínua e armazenamento em *datalogger*. A tensão de água no solo é registrada em hPa, em intervalos de 15 minutos.

Anualmente é realizada a semeadura do milho no lisímetro, sem a presença de cobertura morta e com revolvimento do solo em 30 cm de profundidade. A semeadura do milho foi efetivada sempre na primeira quinzena de novembro dos anos de 2008, 2009 e 2010, com ciclo com duração de 159, 128 e 132 dias, respectivamente. As produtividades dos cultivos foram de 30, 131 e 95 sacos por hectare.

Dados climatológicos

Os dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e radiação solar utilizados na fase de calibração e verificação do modelo SWAP foram obtidos na estação meteorológica automática instalada na bacia do ribeirão Concórdia. A precipitação é medida com um pluviôgrafo de báscula da Davis[®], com *datalogger* registrador Novus[®], que registra dados em intervalo de tempo de 5 min. O período de calibração foi de 03/2008 a 12/2010. A verificação foi feita no período de 01/2011 a 05/2011.

Foram empregados dados diários de radiação, temperatura mínima e máxima, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação do período *baseline* (1961-1990) e simulado (2071-2100), para as condições de máxima (A2) e mínima (B2) emissão de dióxido de carbono, obtidos do Sistema PRECIS (Providing REgional Climates for Impact Studies), gerado pelo Hadley Centre na Inglaterra, contendo condições de contorno do modelo climático regional HadRM3P com grades de 0,5 x 0,5°, cuja implementação no Brasil foi realizada pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Culturas

Partindo-se da calibração do modelo SWAP para a cultura de milho, foi realizada a simulação para as culturas aveia, cebola, feijão, milho, soja, trigo, pastagem, floresta e reflorestamento. Para cada cultura, foram adotados os parâmetros fenótipos, baseado nos dados disponíveis na literatura, conforme apresentado nas Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5. Para os parâmetros de entrada do modelo SWAP não encontrados na literatura nacional, foram adotados os valores recomendados por Kroes et al. (2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As séries das variáveis simuladas para o período de 2071 a 2100, para os cenários A2 e B2, foram transformadas em valores médios anuais, e determinadas às variações, tomando-se por base o cenário atual (1961-1990). Estas variações, denominadas anomalias, são apresentadas na Tabela 6.

Nota-se que as séries de precipitação apresentaram redução de 4,2% para o cenário A2 e 6,2% para o cenário B2. A precipitação é um dos principais componentes do ciclo hidrológico e sua redução impacta de forma negativa no escoamento superficial e de drenagem, ocasionando deficiência hídrica na agricultura. Por exemplo, o feijão é mais suscetível à deficiência hídrica durante a floração e o estágio inicial de formação das vagens, necessitando de 150 a 200 mm de água em 30 dias. Se faltar água neste período, há perdas de produtividade (ASSAD; PINTO, 2008).

As séries de temperatura e de precipitação utilizadas como dados de entrada no modelo SWAP geraram anomalias na evapotranspiração real. Neste caso, a evapotranspiração compreendeu a perda da água interceptada pela cobertura vegetal, evaporação do

TABELA 1
Características fenotípicas da aveia

Fase fenológica	Duração (dias)	IAF ($m^2 m^{-2}$)	Kc	Ky*	z (cm)
Germinação	0 - 14	0,05	0,50	0,20	1
Desenvolvimento vegetativo I	14 - 50	0,47	0,77	0,50	5
Desenvolvimento vegetativo II	50 - 75	1,48	0,87	0,60	15
Floração	75 - 113	4,10	1,13	0,75	30
Frutificação	113 - 135	1,10	0,83	0,50	45
Maturação	135 - 150	0,89	0,81	0,30	60

Fase fenológica, índices de área foliar (IAF), coeficientes de cultivo (Kc) (SCHUCH et al., 2000), coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) e profundidade efetiva do sistema radicular (z).

TABELA 2
Características fenotípicas da soja

Fase fenológica	Duração (dias)	IAF ($m^2 m^{-2}$)	Kc	Ky	z (cm)
S/V1-V2	0 - 14	0,04	0,56	0,20	15
V2-R1	14 - 45	4,10	1,21	0,50	30
R4	45 - 75	6,60	1,40	0,80	35
R5-R7	75 - 110	6,20	1,50	1,00	40
R7-R9	110 - 140	1,60	0,90	0,50	40

Fase fenológica, duração, coeficientes de cultivo (Kc), profundidade efetiva do sistema radicular (z) (COSTA, 1996), índices de área foliar (IAF) (HEIFFIG et al., 2006) e coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

TABELA 3
Características fenotípicas da cebola

Fase fenológica	Duração (dias)	DAT	IAF ($m^2 m^{-2}$)	Kc	Ky*	z (cm)
Inicial	0 - 60		0,05	0,55	0,20	1
Vegetativo	60 - 96	0- 40	0,32	0,85	0,50	5
Bulbificação	96 - 113	40 - 75	0,65	1,05	0,85	15
Maturação	75 - 113	75 - 100	0,55	0,75	0,70	20

Fase fenológica, duração, índices de área foliar (IAF) (BETTONI, 2011), coeficientes de cultivo (Kc) (MAROUELLI et al., 2005), coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) (adaptado de Vilas-Boas et al., 2011), profundidade efetiva do sistema radicular (z).

TABELA 4
Características fenotípicas da mandioca

Duração (dias)	IAF ($m^2 m^{-2}$)	Kc	Ky	z (cm)
0 - 14	0,04	0,56	0,20	15
14 - 45	4,10	1,21	0,50	30
45 - 75	6,60	1,40	0,80	35
75 - 110	6,20	1,50	1,00	40
110 - 140	1,60	0,90	0,50	40

Índices de área foliar (IAF) (adaptado de Lopes et al., 2010), coeficientes de cultivo (kc), coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) e profundidade efetiva do sistema radicular (z).

TABELA 5
Características fenotípicas da pastagem

IAF ($m^2 m^{-2}$)	Kc	Ky	z (cm)
0,04	0,56	0,20	15
4,10	1,21	0,50	30
6,60	1,40	0,80	35
6,20	1,50	1,00	40
1,60	0,90	0,50	40

Índices de área foliar (IAF), coeficientes de cultivo (kc), coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) e profundidade efetiva do sistema radicular (z).

TABELA 6
Anomalia dos cenários A2 e B2 para o período de 2071 a 2100 em relação ao cenário atual (1961-1990)

Uso do solo	P (%)	P _i (%)	R (%)	T _a (%)	E _a (%)	P _e (%)	ET (%)
Cenário A2							
Aveia	-4,2	33,8	256,0	5,6	-2,2	-12,1	0,3
Cebola	-4,2	47,1	259,6	19,4	-3,1	-10,2	-2,2
Feijão	-4,2	85,7	262,5	7,0	-4,4	-11,5	-0,7
Milho	-4,2	48,8	247,3	-11,0	1,0	-14,9	1,6
Soja	-4,2	34,3	261,7	-12,9	-3,1	-10,1	-4,5
Trigo	-4,2	30,0	260,6	13,3	-3,4	-12,0	0,5
Pastagem	-4,2	32,4	247,0	-4,0	2,9	-19,9	1,8
Floresta	-4,2	20,3	281,7	-2,9	6,8	-27,1	0,9
Reflorestamento	-4,2	21,5	268,4	-1,1	7,0	-27,3	4,2
Cenário B2							
Aveia	-6,2	40,8	114,5	0,7	-1,4	-12,7	0,1
Cebola	-6,2	52,9	117,1	10,9	-2,3	-11,1	-1,7
Feijão	-6,2	90,5	117,2	4,0	-4,1	-11,9	-1,0
Milho	-6,2	75,0	96,7	-5,0	-4,9	-17,8	4,0
Soja	-6,2	43,1	106,3	-12,1	-4,5	-11,4	-4,1
Trigo	-6,2	27,6	117,6	11,8	-2,8	-12,7	0,6
Pastagem	-6,2	36,8	102,2	-5,9	0,8	-19,4	0,6
Floresta	-6,2	21,4	112,7	-4,0	3,0	-27,0	0,0
Reflorestamento	-6,2	22,6	100,0	-3,2	1,8	-26,6	2,7

P é a precipitação pluviométrica, R é o escoamento superficial, P_i é a interceptação de água pela vegetação, T_a é a transpiração, E_a é a evaporação do solo, P_e é o escoamento de drenagem, ET é a evapotranspiração real (P_i + T_a + E_a).

solo e a transpiração vegetal. Segundo PBMC (2014) é esperado que o aumento da temperatura média da atmosfera aumente a evapotranspiração tendo como consequência a deficiência hídrica, representando risco climático para a agricultura. Pode-se observar que as culturas aveia, milho, trigo, pastagem e reflorestamento apresentaram anomalias positivas em relação a componente evapotranspiração, corroborando com esta afirmação. Os valores variaram entre -4,5 (cultivo de soja) e 4,2 % (no reflorestamento) para o cenário A2 e, entre -4,1 (cultivo de soja) e 4,0 (cultivo de milho) para o cenário B2. Constatata-se assim, que as anomalias para os diferentes usos agrícolas do solo não foram uniformes, apresentando respostas dispersas. As amplitudes das anomalias de cada componente da evapotranspiração foram variáveis em cada cenário, para cada tipo de uso agrícola do solo. As culturas pastagem, floresta e reflorestamento, que são perenes, apresentaram anomalias similares. No entanto, para as culturas temporárias, as anomalias não apresentaram similaridade nas componentes da evapotranspiração nem entre os cenários. Os impactos das culturas temporárias são variáveis com a sazonalidade e com os estádios de desenvolvimento.

A componente transpiração apresentou anomalias negativas, ou seja, redução do percentual de transpiração para as culturas temporárias milho e soja e para as culturas perenes pastagem, floresta e reflorestamento tanto no cenário A2 como o B2. Quando a transpiração das plantas é reduzida, a perda de calor pelas folhas acontece de forma mais lenta, consequentemente aumentando a temperatura. Este fato aumenta o estresse hídrico das plantas devido à baixa umidade, pelas altas temperaturas, ventos fortes e alta intensidade luminosa (GONDIM et al.; 2008).

As anomalias do escoamento de drenagem foram negativas, indicando que para os cenários A2 e B2, para todos os cultivos agrícolas haverá redução da recarga dos aquíferos freáticos. Esta redução da recarga poderá afetar os escoamentos dos cursos de águas nas condições de estiagem. A redução do escoamento de drenagem somada a redução da precipitação e ao aumento da evapotranspiração aumentam a necessidade de água para irrigação (GONDIM et al.; 2008). Redução das vazões mínimas em bacias hidrográficas foi obtida por Silveira et al. (2014), que simularam o impacto das mudanças climáticas em 24 bacias hidrográficas do setor elétrico brasileiro.

As anomalias mais elevadas foram obtidas para o escoamento superficial. Estas anomalias variaram entre 247,0 (pastagem) e 281,7% (floresta) no cenário

A2 e entre 96,7 (cultivo de milho) e 117,6 % (cultivo de trigo) no cenário B2. As anomalias obtidas foram similares para as culturas perenes e as temporárias, não evidenciando a ocorrência em relação ao cultivo agrícola analisado. O escoamento superficial contribui com a vazão máxima do hidrograma de cheia e com a erosão de solos e transporte de sedimentos, os quais aumentam os riscos de geração de danos sociais, econômicos e ambientais. Resultados similares foram obtidos por Perazzoli et al. (2013) que simularam o impacto das mudanças climáticas nas curvas de permanência e na produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica com uso essencialmente agrícola, localizada no sul do Brasil.

É importante analisar a magnitude de cada componente do ciclo hidrológico simulado em cada cultivo. As distribuições são apresentadas na Figura 1A para o cenário A2 e 1B para o cenário B2. As distribuições são variáveis, sendo o escoamento de drenagem e a evaporação do solo, mais elevados nos cultivos de culturas temporárias e a transpiração mais elevada nos usos agrícola do solo com cultivos perenes. Como os cultivos perenes possuem maior índice de área foliar há maior transpiração e, consequente maior consumo de água. Como os cenários apresentaram redução de precipitação, poderá haver problemas com o crescimento das culturas perenes, principalmente as lenhosas devido à escassez hídrica.

O escoamento de drenagem, nas culturas temporárias, variou entre 45 (cultivo de soja) e 62 % (cultivo de cebola). Nas culturas perenes, a variação da transpiração variou entre 38 (pastagem) e 60 % (floresta). A interceptação foi uma componente importante nos cultivos perenes, com variação entre 10 e 10% e, no cultivo do milho (cerca de 9%) e soja (cerca de 6%).

O escoamento superficial apresentou pequena variação em cada cenário. O coeficiente de escoamento superficial médio variou, no cenário B2, entre 1,8 (reflorestamento) e 2,8 % (nos cultivos de aveia, cebola, feijão e trigo) e, no cenário A2, entre 3,3 (reflorestamento) e 4,6% (nos cultivos de cebola, feijão e trigo). Isto indica que o cenário A2 tende a aumentar a magnitude das vazões de pico das enchentes geradas nas bacias hidrográficas, aumentando o risco de geração de danos sociais, econômicos e ambientais. Um expressivo problema para a agricultura relacionado ao aumento do escoamento superficial é a erosão do solo, associado ao transporte de nutrientes essenciais, provocando perda de áreas cultiváveis. Esse problema corrobora com os estudos de PBMC (2014), onde afirmam que os cenários agrícolas para o Brasil apon-

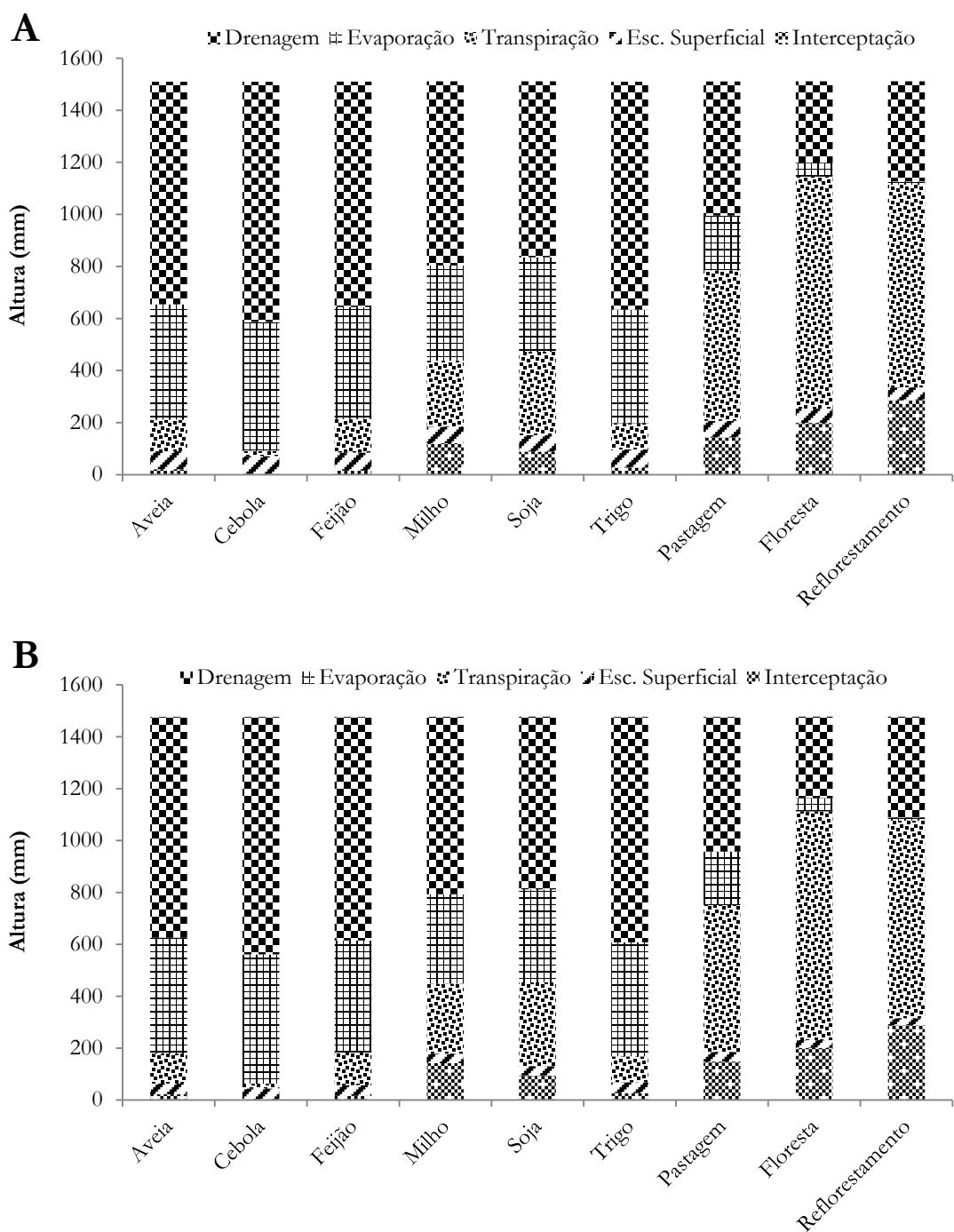


Figura 1 – Balanço hídrico para os cenários A2 (A) e B2 (B).

tam para uma redução de área cultivável, podendo perder cerca de 11 milhões de hectares propícias à agricultura até 2030. Na Região Sul, o milho e a soja poderão ser substituídos por culturas semiperenes como a cana-de-açúcar (ASSAD; PINTO, 2008).

CONCLUSÕES

As mudanças climáticas globais afetam os processos climáticos, que impactam os processos hidrológicos nos solos do bioma Mata Atlântica. Simulações do processo hidrológico em solo agrícola com as culturas temporárias aveia, cebola, feijão, milho, soja e trigo e, cultivos perenes pastagem, floresta e reflorestamento permitiram quantificar as anomalias em relação ao clima atual dos cenários A2 e B2 estabelecidos pelo IPCC.

Constata-se que a anomalia sobre a evapotranspiração é variável entre os cenários e entre os cultivos.

Em ambos os cenários e, para todas as culturas haverá redução do escoamento de drenagem e aumento do escoamento superficial. O escoamento de drenagem constituiu o principal componente no balanço hídrico dos cultivos temporários e a transpiração apresentou os maiores valores nos cultivos perenes. Os coeficientes de escoamento superficial apresentaram pequena variação entre os cultivos, sendo a variação mais expressiva quando comparada em relação aos cenários futuros A2 e B2.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq, processo 403739/2013-6 pelo financiamento da pesquisa e processo 303472/2014-6 pela bolsa de produtividade de pesquisa, a CAPES pela concessão de bolsas de mestrado e PNPD, e ao Dr. José A. Marengo, do INPE, pela disponibilização das séries de dados PRECIS.

Referências

- ARROIO JUNIOR, P. P.; MAUAD, F. F. Simulação dos impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do ribeirão do Feijão – SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 3, p. 741-751, 2015.
- ASCH, F.; DINGKUHN, M.; SOW, A.; AUDEBERT, A. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. *Field Crops Research*, v. 93, n. 2-3, p. 223-236, 2005.
- ASSAD, E.; PINTO, H. S. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. São Paulo: Embaixada Britânica, 2008.
- BARROS, A. H. C. Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico. 2010. 148 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba.
- BETTONI, M.M. Desempenho de cultivares de cebola em sistema orgânico na região metropolitana de Curitiba. 2011. 72 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BOLLIG, C.; FELLER, U. Impacts of drought stress on water relations and carbon assimilation in grassland species at different altitudes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 15, p. 212-220, 2014.
- BRAGA, S.M.; SANTOS, dos I.; FERNANDES, C.V.S.; KOBIYAMA, M. Desenvolvimento de um sistema automático de baixo custo para medição indireta da interceptação. In XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, anais, Campo Grande. 2009.
- BURNET, J.; CESANO, D.; RUSSELL, J.; LA ROVERE, E. L.; CORRAL, T.; COELHO, N. S.; SANTOS, L. Climate change adaptation strategies for smallholder farmers in the Brazilian Sertão. *Climatic Change*, v. 126, p. 45-59, 2014. DOI 10.1007/s10584-014-1186-0
- COSTA, J. A. *Cultura da soja*. Porto Alegre: I. Manica & J. A. Costa, 1996.
- CUO, L.; ZHANG, Y.; GAO, Y.; HAO, H.; CAIRANG, L. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology*, v. 502, p. 37–52, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.003>.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. *Yield response to water*. Rome: FAO, 1979. 306 p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 33).
- FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. *Sustainable Agriculture*, v. 29, p. 153-188, 2009.
- GAÁL, L.; SZOLGAY, J.; KOHNOVÁ, S.; PARAJKA, J.; MERZ, R.; VIGLIONE, A.; BLÖSCHL, G. Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resources Research*, v. 48, W04511, 2012, doi:10.1029/2011WR011509.
- GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H.; EVANGELISTA, S. R. M.; TEIXEIRA, A. S.; FUCK JÚNIOR, S. C. F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. *Pesq. Agropec. Bras.* v. 43, n. 12, p. 1657-1664, 2008.
- HEIFFIG, L.S.; CÂMARA, G.M.S.; MARQUES, L.A.; PEDROSO, D.B.; PIEDADE, S.M.S. Fechamento e índice de área foliar na cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. *Bragantia*, Campinas, v. 65, n. 2, p. 285-295, 2006.

- IPCC: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2007: the physical science basis - contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007.
- JARSJÖ, J.; ASOKAN, S. M.; PRIETO, C.; BRING, A.; DESTOUNI, G. Hydrological responses to climate change conditioned by historic alterations of land-use and water-use. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, p. 1335–1347, 2012. DOI: 10.5194/hess-16-1335-2012.
- KROES, J. C.; VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; JACOBS, C.M.J. SWAP version 3.2. *Theory description and user manual*. Alterra Report1649. Alterra, Wageningen, 2008. 284 p.
- LOPES, A. C.; VIANA, A. E. S.; MATSUMOTO, S. N.; CARDOSO JÚNIOR, N. dos S.; SÃO JOSÉ, A. R. Complementação da irrigação e épocas de colheita de Mandioca da cultivar Coqueiro no Planalto de Vitória da Conquista-BA. *Ciência e Agrotecnologia*. v. 34, n. 3, p. 579-587, 2010.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; ZABALZA, J.; VICENTE-SERRANO, S. M.; REVUELTO, J.; GILABERTE, M.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E.; GARCIA-RUIZ, J.M.; TAGUE, C. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment*. v. 493, p. 1222–1231, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.031>.
- MAO, D.; CHERKAUER, K. A. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region. *Journal of Hydrology*, v. 374, p. 71–82, 2009. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.06.016.
- MARENCO J.A.; JONES R.; ALVES L.; VALVERDE M. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal Climatology*. v. 29, n. 15, p.2241-2255, 2009, DOI: 10.1002/joc.1863.
- MARQUELLI, W.A.; COSTA, E. L.; SILVA, H. R. *Irrigação da cultura da cebola*. Brasília: Embrapa Hortaliças. Circular Técnica 37. 2005. 17 p.
- MAWDSEY, J. R.; O'MALLEY, R.; OJIMA, D. S. A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, v. 23, n. 5, p. 1080–1089, 2009, DOI: 10.1111/j.1523-1739.2009.01264.x
- MIGUEZ, J. D. G.; OLIVEIRA, A. S. (Coord.). *Segunda comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima*. v. 1. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and the Environment. In: G.E. Fogg (ed.), *The state and movement of water in living organisms*. Cambridge University Press, 1965, p. 205-234.
- MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 434–435, p. 55–68, 2012. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.02.036.
- NAKICENOVIC, N.; SWART, R. *IPCC Special Report Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, UK. 2000, 570 p.
- OLIVEIRA, N. T.; CASTRO, N. M. R.; GOLDENFUM, J. A. Influência da palha no balanço hídrico em lísímetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 93-103, 2010.
- PAIVA, A. O.; FARIA, G. E. Estoque de carbono do solo sob cerrado sensu stricto no Distrito Federal, Brasil. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, Chapadinha, v. 1, n. 1, p. 59-65, 2007.
- PBMC 2014: *Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas*. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Assad, E.D., Magalhães, A. R. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 pp.
- PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Assessing the impact of climate change scenarios on water resources in southern Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v. 58, n. 1, p. 77-87, 2013, DOI:10.1080/02626667.2012.742195.
- PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; KAUFMANN, V. Simulating effects of climate scenarios on hydrological processes in southern Brazil using a lysimeter. *International Journal of Climatology*, v. 33, n. 9, p. 2206-2214, 2013, DOI: 10.1002/joc.3591.
- PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Progress in Physical Geography*, v. 35, n. 4, p. 465–492, 2011, DOI: 10.1177/030913311402714.
- ISCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P.; GARCIA, J. I. B. O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluentes em sistemas de recursos hídricos. *Revista de Gestão de Águas da América Latina*, v. 11, n. 2, p. 53-65, 2014.
- SCHUCH, L. O. B.; NEDEL, J. L.; ASSIS, F. N. de; MAIA, M. S. Vigor de sementes e análise de crescimento de aveia preta. *Scientia Agricola*, v. 57, n. 2, p. 305-312, 2000.
- SILVA, B. M.; SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-available soil water capacity: estimation: methods and implications. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 38, p. 464-475, 2014.
- SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; LOPES, J. E. G.; BARBOSA, P. S. F.; TIEZZI, R. O. Análise das projeções de vazões nas bacias do setor elétrico brasileiro usando dados do IPCC-AR4 para o século XXI. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 59-71, 2014.
- TU, J. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. *Journal of Hydrology*, v. 379, p. 268–283, 2009. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.10.009.
- VAN DAM, J. C. *Field-scale water flow and solute transport : SWAP model concepts, parameter estimation and case studies*. 2000. 167 p. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen.

VILAS-BOAS, R. C.; PEREIRA, G. M.; SOUZA, R. J. DE; CONSONI, R. Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 117-124, 2011.

YANG, Q.; TIAN, H.; FRIEDRICH, M. A. M.; LIU, M.; LI, X.; YANG, J. Hydrological Responses to Climate and Land-Use Changes along the North American East Coast: A 110-Year Historical Reconstruction. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, v. 51, n. 1, p. 47-67, 2015. DOI: 10.1111/jawr.12232.

ZHOU, G.; WEI, X.; WU, Y.; LIU, S.; HUANG, Y.; YAN, J.; ZHANG, D.; QIANMEI ZHANG, Q.; LIU, J.; MENG, Z.; WANG, C.; CHU, G.; LIU, S.; TANG, X.; LIU, X. Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China. *Global Change Biology*, v. 17, p. 3736-3746, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02499.x.

Adilson Pinheiro Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil. Email: pinheiro@furb.br

Vander Kaufmann Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil. Email: vanderkaufmann@gmail.com

Edson Torres Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil. Email: ettotorres@gmail.com.

Haline Depiné Anesi Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil. Email: hali_ne@hotmail.com.