

Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas em Região Semi-árida

Yvonilde Dantas Pinto Medeiros

Escola Politécnica - UFBA - Rua Aristides Novis, 02 - Federação
40210-630 Salvador, BA - yvonild@ufba.br

Recebido: 01/02 - revisão: 09/02 - aceito: 04/03

RESUMO

Mudanças climáticas globais estão ocorrendo e muito provavelmente continuarão a ocorrer nas próximas décadas. Esta hipótese está baseada em possíveis acréscimos, na atmosfera, da concentração de CO₂ e outros gases responsáveis pelo efeito estufa. Estes acréscimos causariam, provavelmente, diferentes graus de impactos nos recursos hídricos nas diferentes regiões da Terra.

Este artigo focaliza a sensibilidade do escoamento superficial e da umidade do solo às mudanças climáticas na região semi-árida do Nordeste do Brasil (NEB). Cenários climáticos, baseados em resultados gerados por Modelos de Circulação Geral (MCG), são usados para traduzir as mudanças na temperatura e na precipitação do NEB às estimativas de escoamento superficial e umidade do solo.

Simulações das mudanças climáticas são executadas usando os parâmetros do modelo hidrológico. A presente e a futura condição do clima são obtidas a partir das simulações dos MCG a duas respectivas condições de concentração na atmosfera relativas a 1xCO₂ e 2xCO₂.

A avaliação dos impactos das mudanças climáticas, na bacia de estudo, indica que reduções na precipitação e acréscimos na evapotranspiração potencial podem causar significativo impacto no balanço hídrico, os quais podem provocar enorme repercussão sócio-econômica na região (e.g. falhas no suprimento de água para uso doméstico, industrial e agrícola).

Palavras-chave: mudanças climáticas; modelos hidrológicos; semi-árido.

INTRODUÇÃO

Em 1990, o Painel Internacional de Mudanças Climáticas (International Panel on Climate Change - IPCC), composto por mais de 300 cientistas oriundos de mais que vinte países, afirmava - "Nós estamos certos (...) emissões resultantes de atividades humanas estão aumentando substancialmente as concentrações de gases na atmosfera. Este aumento irá intensificar o efeito estufa, resultando em média em um adicional aquecimento da superfície da Terra (Houghton et al., 1990)".

O efeito estufa é um fenômeno físico pelo qual os gases ativos na atmosfera mantêm a superfície da Terra mais aquecida do que estaria na ausência destes gases. A Terra absorve radiação solar e, por sua vez, emite radiação térmica para o espaço.

Qualquer perturbação que altere esse balanço radiativo afeta o clima. Um acréscimo na concentração desses gases tende ao aumento do aquecimento das camadas mais baixas da atmosfera e da superfície terrestre. Esse acréscimo provoca alterações na circulação atmosférica e no comportamento do clima, embora o clima incorpore uma natural variabilidade, devido a fatores internos e externos.

É possível então distinguir as alterações causadas pelo homem daquelas associadas com a variabilidade natural?

De acordo com IPCC, em 1990, uma distinção inequívoca do aumento do efeito estufa como consequência da variabilidade climática era improvável, pelo menos por mais

uma década (Houghton et al., 1990). Em 2001, o IPCC confirma que mudanças climáticas de origem antropogênica estão ocorrendo e, muito provavelmente, de modo ascendente (MacCarthy et al., 2001).

Este artigo descreve uma metodologia adotada para avaliação dos impactos das mudanças climáticas em região semi-árida, através da utilização de um modelo estocástico de precipitação para transferir as alterações na precipitação gerada por um modelo de circulação global da atmosfera (Global Circulation Model - MCG) para um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão que simula a resposta de uma bacia semiárida a estas mudanças. O desenvolvimento desta metodologia tem por finalidade sua aplicação em bacias hidrográficas típicas do semi-árido da região nordeste do Brasil.

METODOLOGIA

A metodologia para a avaliação das respostas da bacia às mudanças climáticas pode ser dividida em três passos:

1. escolha dos modelos de geração de chuva e de transformação de chuva em vazão com capacidade de descrever o regime hidrológico de uma bacia semi-árida;
2. construção de cenários hipotéticos das alterações na evapotranspiração potencial e precipitação, através da combinação das previsões globais de longo perí-

odo com as locais flutuações do regime hidrológico regional;

3. análise da sensibilidade do balanço hídrico às possíveis mudanças climáticas.

CASO DE ESTUDO

A bacia do rio Paraguaçu está situada entre os paralelos 11°11'S e 13°42'S e meridianos 38°48'W e 42°01'W, totalmente inserida no estado da Bahia, na região nordeste do Brasil (Figura 1). Em contraste com outras regiões nessa mesma faixa latitudinal, essa região possui clima semi-árido. Embora algumas áreas na região costeiras recebam 1600 mm ou mais de chuva, anualmente, algumas regiões, no interior da bacia, tem precipitação anual média inferior a 400 mm.

Como é típico em outras regiões de clima semi-árido, a variabilidade temporal e espacial das precipitações é bastante elevada. As causas desta grande variabilidade não estão de todo compreendidas. Contudo, uma análise da distribuição das chuvas na região sugere que a aridez relativa pode ser causada primariamente por mecanismos na circulação geral da atmosfera e, portanto induzida por fatores externos.

Os rios que formam a bacia do rio Paraguaçu originam-se na região úmida das montanhas localizadas ao oeste, de onde o rio Paraguaçu atravessa uma consideravelmente larga faixa semi-árida antes de atingir a estreita faixa montanhosa e úmida, da costa atlântica.

Usando a classificação de Köppen, dois tipos de clima foram identificados na área - savana, na parte central, enquanto na região da borda oeste o clima é quente e úmido. A temperatura média é alta combinada com uma estação intensamente seca no inverno (junho, julho e agosto).

A geologia da área é dominada por rochas do período pré-cambriano (granito, granulitos e biotita-gnais), que são gradualmente reduzidas devido à erosão, aparecendo em formas descontínuas, os solos são rasos ou de profundidade média, imperfeitamente drenados, arenosos, no horizonte A e argilosos no horizonte B; o relevo varia do plano ao montanhoso com restrições para agricultura. As formações naturais da vegetação observada são a caatinga e as pastagens. Os usos predominantes da terra são para pastagens e lavoura de subsistência.

MODELOS HIDROLÓGICOS

Os fenômenos hidrológicos são constituídos de muitas interações em escala global, regional e local. Embora esses fenômenos possam ser nunca completamente compreendidos, podem ser representados de forma mais simplificada através de um sistema conceitual. Nesse sen-

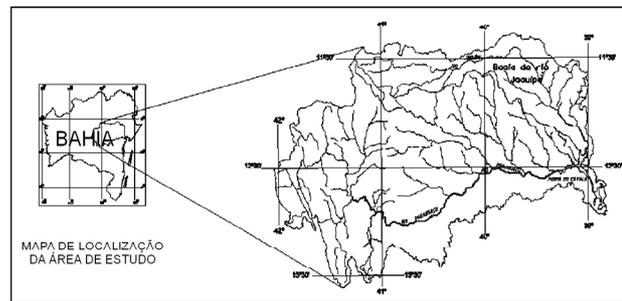


Figura 1. Bacia do rio Paraguaçu.

tido, o modelo de um sistema hidrológico é definido como uma representação simplificada de um sistema real.

De forma ideal, modelos hidrológicos realistas para fins dos estudos de mudanças climáticas deveriam ser capazes de representar fenômenos que ocorrem desde a escala da molécula e água à escala das malhas dos MCG. Este modelo deve envolver uma dinâmica interação entre a atmosfera com o escoamento superficial e subterrâneo, a umidade do solo e sua cobertura vegetal (Turner et al., 1995). Todavia, modelos de subprocessos hidrológicos têm sido largamente desenvolvidos, há mais de um século (Tucci, 1998).

Kavvas e Delleur (1975) introduziram o processo de agregação de Neyman-Scott (N-S) para modelação de eventos chuvosos. A estrutura deste processo pode ser compreendida com base em observações que indicam como possível a ocorrência dos eventos de chuva em grupos, originados por algum mecanismo gerador, como por exemplo, uma tempestade sobre a área. Sendo a ocorrência do mecanismo gerador representado por um processo de Poisson. Cada mecanismo gerador origina um número aleatório de eventos de chuva com densidade p_k , $k = 1, 2, \dots$, e função de probabilidade (f_p),

Nesse modelo considera-se que o intervalo de tempo de ocorrência desses eventos com relação ao mecanismo gerador, tempo de espera, seja governado por uma seqüência de variáveis aleatórias com uma função densidade (Medeiros, 1994).

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Ainda não é possível prever com algum grau de precisão, o clima nos meados de século 21, a despeito dos esforços dos modeladores do clima. Existem grandes incertezas, não somente na modelação do aumento dos gases responsáveis pelo efeito estufa, como na estimativa das taxas com que estes gases são emitidos pelas atividades humanas e que quantidades são absorvidos pelas plantas e oceano.

Estudos dos impactos das possíveis mudanças climáticas, portanto não podem ser previstos e devem ser baseados na simulação de cenários. Cenários de mudanças climá-

ticas são descrições do clima factível de existir no futuro próximo. A presente inabilidade de se prever com garantia o clima cinquenta ou cem anos no futuro significa que vários cenários alternativos podem ser imaginados como igualmente factíveis, embora eles sejam totalmente diferentes entre si.

Várias técnicas têm sido empregadas na definição dos cenários das mudanças climáticas em diferentes partes do mundo. Diferentes técnicas funcionam com diferentes escalas espaciais e temporais e alguns métodos podem fornecer somente informações qualitativas com relação à direção das possíveis mudanças.

Os modelos de circulação geral (MCG) ou modelos globais têm sido a mais popular base para a construção de cenários quantitativos das mudanças climáticas. Os MCG são modelos matemáticos de três dimensões que representam os processos físicos e dinâmicos responsáveis pelas condições do clima. Usando estes modelos, o efeito de uma alteração na concentração dos gases, constituintes da atmosfera, pode ser calculada pela comparação entre a simulação do clima atual com a simulação do clima futuro, com alteração da composição da atmosfera. Primeiramente, os modelos executam simulações para fornecer estimativas das condições (de controle), atuais do ou do período pré-industrial. Depois, eles são usados para simular as respostas a duas diferentes experiências do clima futuro: um em estado de equilíbrio (o dobro de CO₂, por exemplo) e outro em estados transientes. Na primeira situação, são avaliadas as respostas dos modelos aos instantâneos acréscimos da concentração de CO₂ na atmosfera, em separado da modelação do oceano. Os experimentos de estados transientes são conduzidos através da associação dinâmica dos modelos da atmosfera e do oceano. Os mais recentes estudos dos impactos utilizam cenários baseados nos resultados dos modelos transientes, que embora mais prováveis, incorporam ainda muitas incertezas. Por esta razão os antigos modelos do estado de equilíbrio permanecem em uso (MacCarthy et al., 2001).

Os MCG têm sido muito úteis na simulação do aquecimento global da atmosfera e diferentes MCG tendem a produzir estimativas médias similares. Entretanto, quando climas regionais estão sendo simulados, os MCG produzem estimativas menos consistentes das conseqüências regionais das mudanças. Isto está relacionado, principalmente, com o fato que os MCG não foram desenvolvidos com a finalidade de estimar alterações em climas regionais. Embora, em geral, as temperaturas regionais sejam simuladas com precisão aceitável, as precipitações são simuladas pobremente. Outros fatores importantes que afetam a simulação do clima regional incluem a resolução espacial, a representação da topografia e do processo de formação de nuvens, a simulação das interações terra-atmosfera e oceano-atmosfera. Atualmente, simulações regionais do clima, em curta escala de espaço e tempo, são tão imprecisas que os seus indicadores para mudanças regionais do clima são inválidos (Kattenberg et al., 1996). A despeito dessas limitações, os MCG podem

ser aplicados na construção de cenários representativos das alterações médias de um número de variáveis em longo período de tempo, e.g. mensal (Gates, 1985).

DADOS DA SIMULAÇÃO DOS MODELOS DE CIRCULAÇÃO GERAL

Este estudo utiliza os resultados de dois modelos de circulação geral (MCG). Um deles foi executado pelo Serviço Meteorológico da Inglaterra (UKHI), modelo da atmosfera de alta resolução baseado em um sistema de malhas cartesianas de 2,5 graus de latitude e 3,75 de longitude. O outro foi executado com o modelo de segunda geração do Centro de Clima Canadense (CCCII) de alta resolução, baseado em um sistema de malhas quadradas de 3,75 graus. O UKHI modela a atmosfera em nove camadas e o CCCII em dez camadas, ambos consideram uma camada mista para o oceano fixa a 50 m de profundidade. Os resultados do UKHI e CCCII representam as médias dos períodos de 10 anos de simulação: o período de controle, com concentração de gases na atmosfera igual a 323 ppm, ou 1xCO₂, e o período perturbado com a concentração igual a 646 ppm, ou 2xCO₂.

Os valores médios das malhas de pontos dos respectivos modelos UKHI e CCCII, mais próximos da bacia do rio Paraguaçu, foram usados para derivar as séries de chuvas diárias e as séries de evapotranspiração potencial mensais, para as duas situações climáticas, que serviram como dados de entrada do modelo chuva-vazão da bacia.

Antes de se utilizar os dados gerados pelos modelos MCG, convém fazer uma breve comparação com os respectivos dados da série histórica da bacia. A comparação das atuais temperaturas médias mensais com aquelas geradas pelos dois MCG para as condições atuais (Figura 2) indica que os valores do UKHI são mais próximos com os valores medidos nos meses de verão e outono; e maiores durante os meses de inverno e primavera. Os valores do CCCII são menores que os históricos em aproximadamente 5°C durante todos os meses do ano. Uma possível justificativa para a existência dessas diferenças entre os MCG, está na formulação dos fenômenos de convecção, que podem acontecer em escalas inferiores às malhas dos modelos ou na escolha dos parâmetros que representam a radiação das nuvens (Mitchell et al., 1990).

A comparação das precipitações médias mensais com os valores gerados pelos dois MCG (Figura 3) revela não somente uma grande disparidade entre as estimativas dos MCG, como também uma grande distância dos valores históricos em ambas situações. Mitchell et al. (1990) apresentaram duas prováveis razões para as divergências entre os MCG, com relação à precipitação. Primeiro, a precipitação é indiretamente alterada por uma grande variedade de processos que ainda sem solução para a atual escala das malhas dos modelos. Segundo, as modificações na precipitação são re-

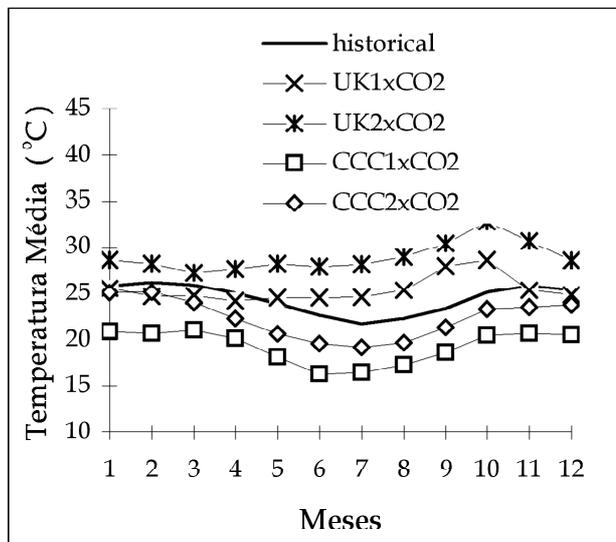


Figura 2. Temperatura média mensal histórica e simulada pelos modelos UKHI e CCCII.

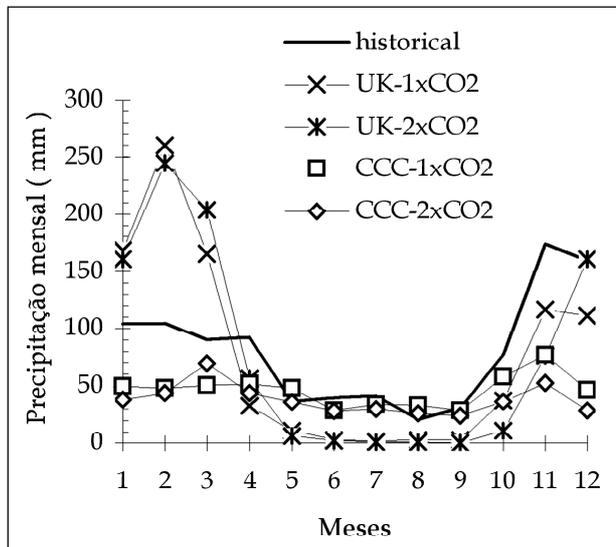


Figura 3. Precipitação total media mensal histórica e simulada pelos modelos UKHI e CCCII.

lativamente pequenas comparadas com a sua natural variabilidade e assim são difíceis de detectar.

Estas comparações demonstram que os MCG não podem reproduzir com precisão os atuais valores da temperatura e precipitação da bacia, contudo sua consistência interna e forte fundamentação física fornecem maior precisão às estimativas das mudanças, em termos relativos, destas variáveis (Gates, 1985). Visando reduzir as imprecisões das simulações dos MCG e os erros resultantes da utilização direta dos dados dos MCG, adotou-se as diferenças entre as simulações relativas ao atual nível de CO₂, nos cálculos subsequentes. As diferenças na temperatura média são maiores que zero para todos os meses do ano, causando consequentemente acréscimos na evapotranspiração potencial.

CENÁRIOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Cenários da evapotranspiração potencial

Vários estudos têm examinado a sensibilidade da evapotranspiração potencial às mudanças na temperatura, taxa de radiação, umidade, velocidade do vento e características das plantas (Rosenberg et al., 1990; Luedeke et al., 1994). A sensibilidade tem mostrado ser altamente dependente dos valores desses parâmetros de controle, variando consideravelmente no espaço e tempo, ao longo do ano. Com exceção da temperatura, as mudanças nesses parâmetros associadas com as mudanças climáticas são de difícil acesso, até o presente.

A maioria dos estudos tem construído cenários de evapotranspiração potencial definindo a alteração da temperatura como a única variável que tem influência na determinação da mudança na evapotranspiração. Gleick (1986) usou a fórmula de Thornthwaite, Bathurst et al. (1994) preferiu Blaney-Criddle. Luedeke et al. (1994), porém preferiram a fórmula de Penman e Monteith, que envolve outros parâmetros, como radiação, velocidade de vento e umidade.

As diferenças de temperatura, obtidas das simulações dos modelos MCG, foram aplicadas aos dados históricos médios mensais para construir os cenários 2xCO₂ de temperatura. As taxas de evapotranspiração potencial foram obtidas pela relação com a temperatura expressa pela equação de Blaney-Criddle. Os cenários 2xCO₂-UKHI e 2xCO₂-CCCII foram construídos com base nas diferenças das temperaturas mensais dos modelos UKHI e CCCII, respectivamente. No cenário 1xCO₂ considerou-se a evapotranspiração potencial atual, ou de controle.

Cenários da precipitação

Os MCG são modelos com fundamentação física do clima global com consistência teórica interna. Porém, indicações mais realistas do comportamento da precipitação regional devem ser obtidas usando o conhecimento das variáveis físicas de controle local e suas relações com os resultados dos MCG.

Métodos estatísticos têm sido utilizados para melhorar a resolução temporal e espacial das simulações dos MCG (Bathurst et al., 1994). O método de geração estocástica das chuvas tem sido dos mais utilizados para a construção de cenários (Viner e Hulme, 1993). Este método utiliza as estatísticas da chuva observada para produzir uma série de dados sintéticos. Perturbando os parâmetros estatísticos do modelo estocástico de acordo com os resultados dos modelos MCG, é possível considerar essas séries como cenários de mudanças climáticas.

De forma ideal, os resultados dos MCG poderiam fornecer informações sobre as mudanças capturadas pelos

modelos, tanto na média quanto na variabilidade das chuvas, em curta escala temporal, a diária, por exemplo. Infelizmente, as distribuições estatísticas da chuva caracterizam-se como de baixa confiabilidade e para escalas temporais menores que a mensal, os resultados dos MCG tornam-se irreais (Viner e Hulme, 1993). Por esta razão, foi considerado que as previsões futuras das chuvas médias seriam distribuídas de acordo com as estatísticas diárias atuais em lugar das estatísticas das previsões dos modelos MCG para a condição de futuro.

O modelo Neyman-Scott de Pulsos Retangulares - NSRP (Rodríguez-Iturbe et al., 1987) foi adotado para gerar séries de chuvas horárias. Diferentes abordagens podem ser utilizadas para gerar a séries de chuvas alteradas. Um deles consiste na aplicação taxas mensais de variações nos dados históricos de chuvas diárias (assumindo que os outros parâmetros permanecem inalterados), seguida da re-calibração do modelo NSRP. Entretanto, essa re-calibração causa alterações em muitos outros parâmetros além da média diária da chuva. Este inconveniente devido à re-calibração do modelo NSRP pode ser evitado aplicando-se a taxa de variação ao parâmetro da intensidade média da célula de chuva, mantendo-se constante os outros quatro parâmetros do modelo. Na prática, esta metodologia produz o mesmo resultado que a aplicação direta das taxas médias de variação às séries sintéticas de chuva.

Para este estudo, simulações de séries de 100 anos de chuvas diárias foram executadas para os cenários $1xCO_2$ e $2xCO_2$ usando a média de 10 anos de registros históricos de chuva diária sobre a bacia de estudo. A série de 100 anos do cenário $1xCO_2$ foi gerada com base nos parâmetros obtidos pelo processo de calibração do modelo NSRP, enquanto as séries $2xCO_2$ foram obtidas pela aplicação das taxas médias de variação da chuva referentes aos modelos UKHI e CCCII, respectivamente, a toda a série de 100 anos do cenário $1xCO_2$.

ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Procedimentos simples podem fornecer uma estimativa dos impactos das mudanças climáticas no escoamento anual médio, porém análises mais detalhadas devem ser baseadas em modelos hidrológicos. Tais modelos possibilitam a investigação dos efeitos de diferentes distribuições sazonais das mudanças e seus impactos sobre características importantes da bacia. O modelo MODHAC (Lanna e Schwarzbach, 1989) foi utilizado para o cálculo dos escoamentos superficiais. Cenários das possíveis condições climáticas futuras foram obtidos pela alteração dos dados de entrada do modelo. Os impactos das possíveis mudanças climáticas, incorporadas nos dados de saída do modelo foram analisados através da comparação com os dados de saída do modelo simulando as condições atuais. Simulações

denominadas $1xCO_2$ e $2xCO_2$ representando a situações atual e futura, foram realizadas na avaliação dos impactos das mudanças climáticas de acordo com as previsões dos modelos UKHI e CCCII, respectivamente.

Análise da resposta hidrológica da bacia

Para simplificar a análise dos resultados, as seguintes variáveis foram selecionadas para representar a resposta hidrológica da bacia sob os cenários alternativos: (a) escoamento superficial mensal, (b) ocorrência de vazões mínimas, (c) evapotranspiração mensal e (d) armazenamento mensal da umidade do solo. Estas análises foram realizadas com base nas médias mensais de 100 anos de simulação.

Escoamento superficial

A Figura 4 mostra as mudanças simuladas na distribuição sazonal do escoamento superficial para a bacia de estudo. O efeito das mudanças no comportamento das chuvas, aumentado pelas mudanças na evapotranspiração, é aparente na forma do hidrograma anual; ambos os cenários $2xCO_2$ apresentam uma elevação abrupta no outono e um prolongado período seco até o meio da primavera. O escoamento superficial decresce substancialmente nos dois casos durante os meses de inverno e primavera. No cenário CCCII, os decréscimos são observados ao longo do ano (exceto em março), na faixa de aproximadamente 25% durante o outono até 50% durante o verão. Isto causa a uma significativa redução no escoamento anual de aproximadamente 40%. No cenário UKHI, por outro lado, o escoamento aumenta durante o outono e em compensação diminui durante o res-

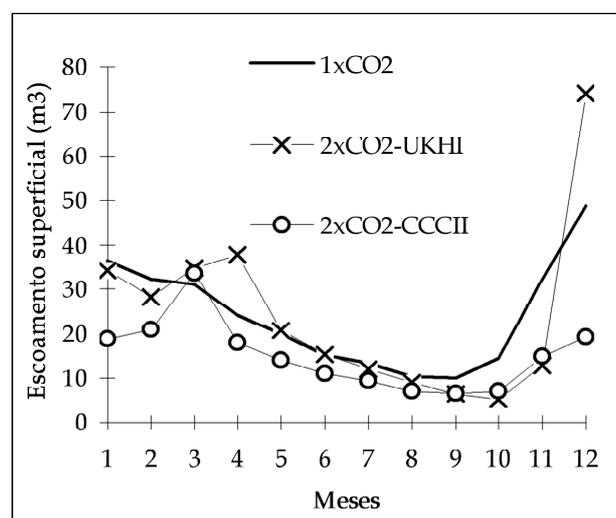


Figura 4. Escoamento superficial médio dos cenários atual ($1xCO_2$) e futuros ($2xCO_2$) baseados nos modelos UKHI e CCCII, respectivamente.

to do ano. Por esta razão, o escoamento anual permanece quase que inalterado para o cenário $1xCO_2$. Pode-se observar que as alterações na distribuição sazonal do escoamento podem ser mais críticas para o manejo dos recursos hídricos que as alterações no escoamento anual. Os mais importantes eventos climáticos que afetam os recursos hídricos, em região semi-árida, referem-se à intensidade e a duração das secas. Sistemas físicos são projetados para o suprimento de água durante os períodos secos, e as regras de operação são baseadas na expectativa dos eventos extremos. Alterações na distribuição sazonal do escoamento aumenta o risco de falha no sistema de abastecimento de água.

Ocorrência de vazões mínimas

A frequência de ocorrência das vazões mínimas tem importantes implicações para o gerenciamento dos recursos hídricos. A vazão excedente em 95% do tempo (Q95), por exemplo, é frequentemente usada como indicador do limite de descarga efluente de esgotos e de concessão de outorga do direito de uso de água. Um decréscimo na frequência do valor correspondente à atual Q95 significaria uma redução deste limite. Os métodos adotados neste trabalho, contudo, são mais adequados às avaliações das alterações nas vazões médias que nas vazões extremas, visto que a Q95 refere-se a dados mensais. As curvas de permanência, plotadas na Figura 5, mostram o simulado impacto das mudanças climáticas na intensidade e frequência de ocorrência da atual Q95. Ambos os cenários $2xCO_2$ indicam similar percentagem de decréscimos na intensidade da atual Q95 de aproximadamente 40%, como resultado, principalmente, do decréscimo das chuvas durante o período da primavera. Estes cenários também prevêem reduções similares à aproximadamente 80% na frequência da atual Q95. Isto sugere que os impactos das mudanças climáticas na qualidade da água podem ser de grande magnitude, na bacia de estudo.

Evapotranspiração real

A evapotranspiração real (ET), como simulada pelo modelo de chuva-vazão, depende basicamente da umidade do solo e da evapotranspiração potencial (EP). Em bacias semi-áridas existe um excesso na capacidade evaporativa da atmosfera (com relação à umidade real do solo), em conseqüência, a ET é extremamente sensível a alterações da precipitação (Eagleson, 1978) e assim sendo, a ET diminui à medida que o solo torna-se seco. Por esta razão, embora a evapotranspiração potencial aumente para ambos os cenários devido ao possível aumento da temperatura (Figura 6), a direção das mudanças na ET varia de acordo com as alterações na precipitação. No cenário UKHI, a ET aumenta durante o período úmido de dezembro a abril e diminui durante o período seco de abril a novembro com rela-

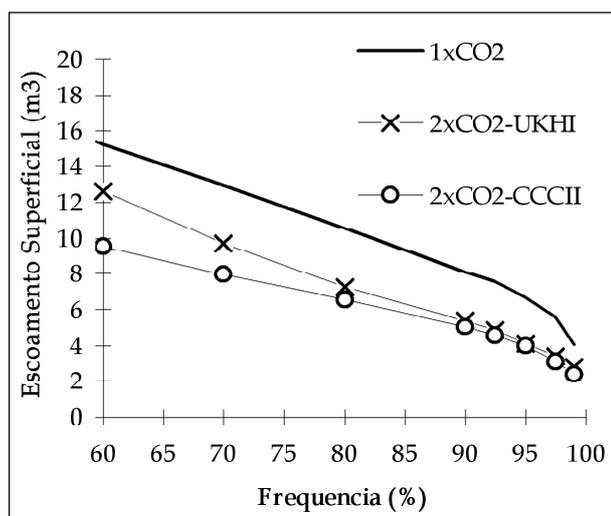


Figura 5. Percentual do tempo em que a Q905 atual ($1xCO_2$) é excedida nos cenários ($2xCO_2$) nos modelos UKHI e CCCII respectivamente.

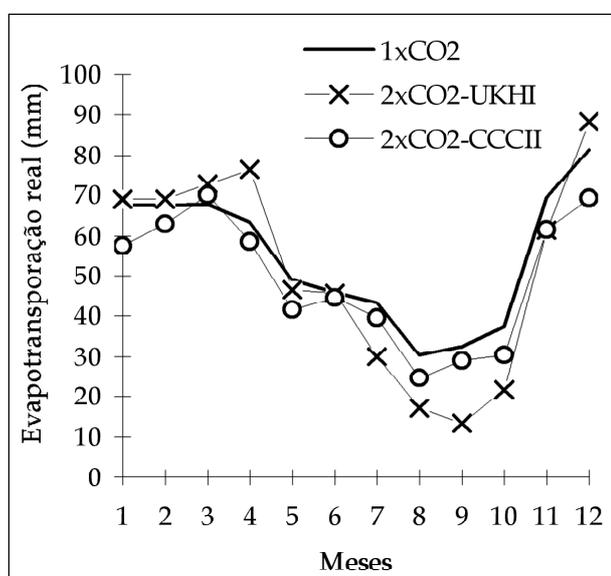


Figura 6. Evapotranspiração real mensal para os cenários ($2xCO_2$) UKHI e CCCII, respectivamente, comparado com o atual ($1xCO_2$).

ção a atual evapotranspiração real. No cenário CCCII, a ET decresce ao longo do ano, exceto em março, do mesmo modo que as chuvas. O resultado efetivo, a despeito das alterações sazonais, foi uma mudança relativamente pequena na evapotranspiração anual, no cenário CCCII.

Armazenamento da umidade do solo

Em geral, o solo responde às variações na precipitação e evapotranspiração, aceitando ou recusando mais ou menos umidade durante períodos secos e chuvosos, res-

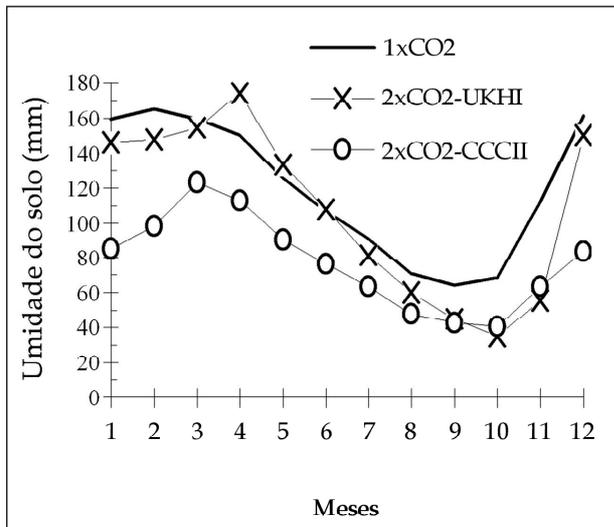


Figura 7. Umidade do solo para os cenários (2xCO₂) UKHI e CCCII, respectivamente, comparados com o atual (1xCO₂).

pectivamente. A Figura 7 mostra a simulação de longo período do armazenamento mensal da umidade no solo, para os cenários em análise. Comparado com o cenário atual, o cenário 2xCO₂ do modelo canadense CCCII de temperaturas mais elevadas e geralmente de clima mais seco provocou severa escassez de umidade no solo, variando de 25% a 50%, ao longo do ano. O cenário 2xCO₂ do modelo UKHI resultou num ligeiro acréscimo na umidade do solo disponível durante o período de outono e um significativo decréscimo no resto do ano, variando de aproximadamente 10% a 50%. Reduções no armazenamento de umidade do solo podem diminuir a possibilidade de muitas espécies de plantas extrair água do solo, embora algumas pesquisas apontem uma capacidade de adequação das plantas, no modo de conservação da água, quando presentes em atmosfera contendo o dobro da atual quantidade de dióxido de carbono.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As análises de sensibilidade foram executadas para determinar em que extensão as mudanças na precipitação (em oposição à temperatura) foi responsável pelos impactos hidrológicos associados com os cenários alternativos do clima. Esta questão foi enfocada através do uso de dois cenários climáticos básicos: (1) O cenário da evapotranspiração potencial CCCII e (2) o cenário CCCII da precipitação. Cada um deles foi considerado isoladamente a fim de facilitar a avaliação da sensibilidade do escoamento superficial, da evapotranspiração real e da umidade do solo, da série de 100 anos de simulação. As Figuras 8 a 13 sintetizam os resultados dos cenários de sensibilidade que serão discutidos nas seções seguintes.

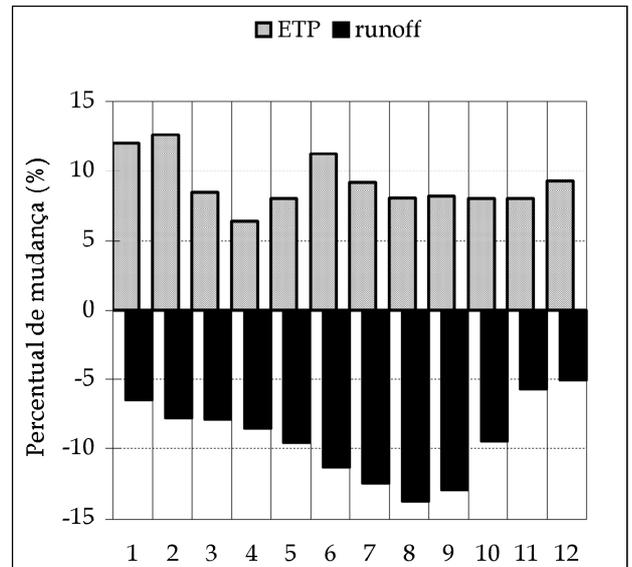


Figura 8. Percentual da mudança no escoamento superficial de acordo com as percentuais mudanças na evapotranspiração potencial do cenário CCCII, com a precipitação constante.

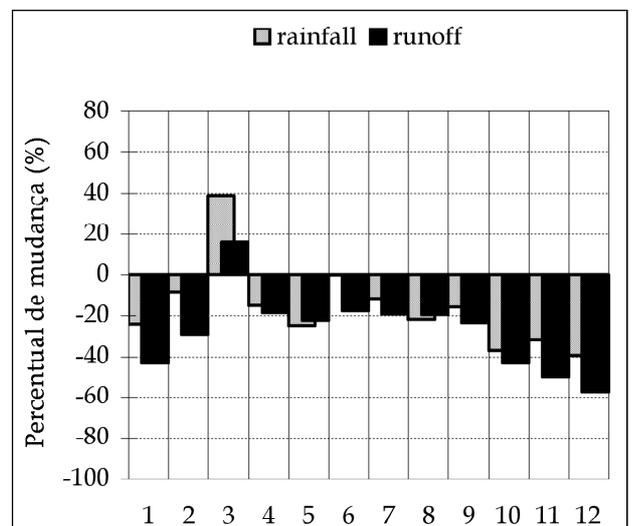


Figura 9. Percentual da mudança no escoamento superficial de acordo com as percentuais mudanças na precipitação do cenário CCCII, com a evapotranspiração potencial constante.

Escoamento superficial

Para o cenário de sensibilidade da evapotranspiração, a Figura 8 mostra que o escoamento superficial teve maior redução durante os meses secos que durante os meses úmidos, devido ao aumento na evapotranspiração potencial (ETP). Um acréscimo de 10% na ETP causou aproximadamente 5% de redução no escoamento superficial durante o verão e quase 15% durante o inverno. Para o cenário, de sensibilidade da precipitação, a Figura 9 mostra que as mudanças na precipitação causaram maior im-

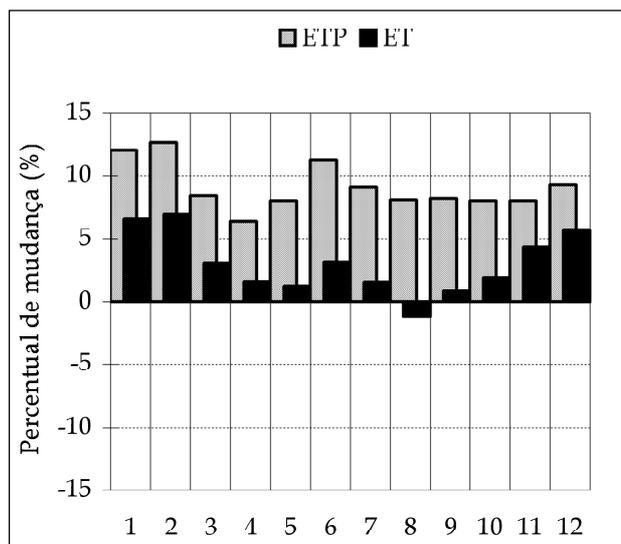


Figura 10. Percentual da mudança na evapotranspiração real de acordo com as percentuais mudanças na evapotranspiração potencial do cenário CCCII, com a precipitação constante.

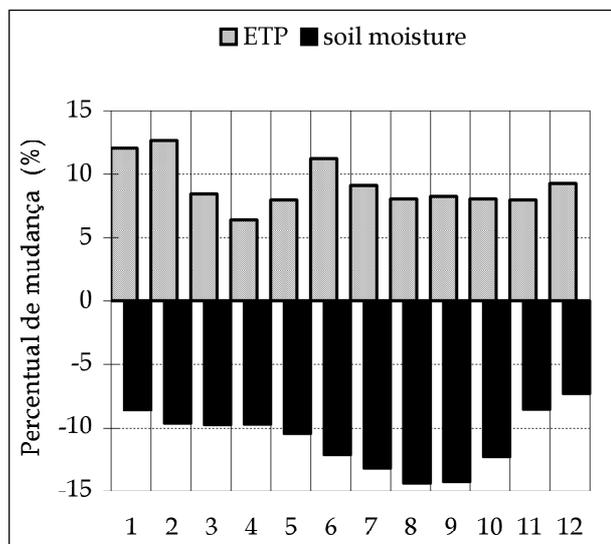


Figura 12. Percentual da mudança na umidade do solo de acordo com as percentuais mudanças na evapotranspiração potencial do cenário CCCII, com a precipitação constante.

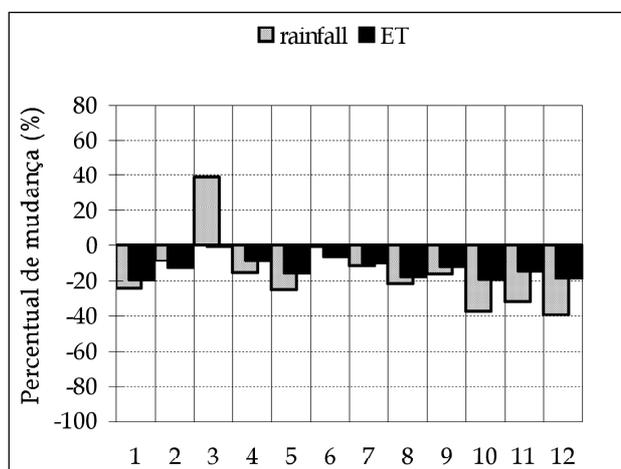


Figura 11. Percentual da mudança na evapotranspiração real de acordo com as percentuais mudanças na precipitação do cenário CCCII, com a evapotranspiração potencial constante.

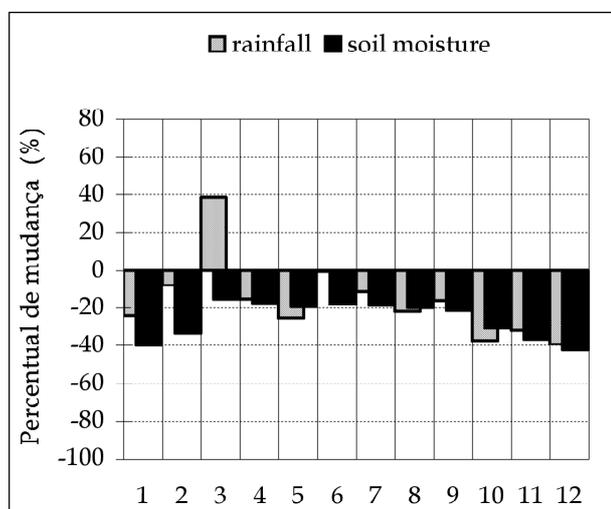


Figura 13. Percentual da mudança na umidade do solo de acordo com as percentuais mudanças na precipitação do cenário CCCII, com a evapotranspiração potencial constante.

pacto no escoamento superficial no verão que durante o inverno.

O decréscimo na precipitação variou de 0% a quase 40% enquanto o decréscimo no escoamento superficial variou de aproximadamente 10% a 60%. A simulação apresentou um impacto mais intenso devido à redução na precipitação que devido ao aumento na evapotranspiração potencial.

Evapotranspiração real

Para o cenário de evapotranspiração, a Figura 10 mostra que o acréscimo na ETP causou maior impacto na evapotranspiração real, no verão comparado com o impacto

na ET, no inverno. Em média, A ETP aumenta 10% mensalmente, enquanto a precipitação diminui. A ET foi mais sensível à redução na precipitação que ao aumento enquanto as mudanças na ET variam de 7%, em janeiro, à -2%, em julho. Para o cenário da ETP constante, a Figura 11 mostra que a ET diminui na ETP. Observa-se que um decréscimo na precipitação tem maior efeito sobre a ET que um aumento.

Armazenamento da umidade do solo

A umidade do solo respondeu ao acréscimo na evapotranspiração potencial mensal de modo similar ao de-

créscimo na precipitação mensal, porém com diferente intensidade e duração. Para o cenário da evapotranspiração, a Figura 12 mostra que um acréscimo mensal de aproximadamente 10% na ETP causa um decréscimo na umidade do solo, variando de 10 a 15% dos meses mais úmidos aos mais secos. Para o cenário da precipitação, a Figura 13 mostra que uma redução na umidade do solo varia de aproximadamente 15 a 40%, dos meses mais secos aos mais úmidos, enquanto decresce a precipitação, aproximadamente na mesma proporção. Observa-se que a umidade do solo responde muito lentamente ao aumento na precipitação.

SÍNTESE E CONCLUSÃO

Antes de concluir, é necessário ter atenção a algumas palavras de cautela. A análise fez uso de um modelo conceitual de balanço hídrico - o MODHAC - para simular a resposta de uma bacia semi-árida às mudanças climáticas e assumiu que os parâmetros deste modelo permaneceriam constantes enquanto o clima modificasse. Os procedimentos de ajuste resultam localização dos parâmetros específicos capazes de capturar a representação da relação entre a evapotranspiração real e a umidade do solo, que por sua vez é dependente do tipo de vegetação. O modelo não pode incorporar as modificações nas características do solo e vegetação que podem vir a ocorrer na hipótese de uma modificação climática.

Os cenários das mudanças climáticas foram definidos pela combinação dos dados de saída dos modelos MCG (alterações na temperatura e na precipitação) com dados históricos das temperaturas e precipitações locais. As temperaturas foram aumentadas por um incremento igual à diferença entre o resultados das simulações para a condição de $2xCO_2$ e a temperaturas médias mensais correspondentes à simulação dos modelos MCG para a condição atual de $1xCO_2$ e a precipitação foi ajustada por um fator igual à taxa da média precipitação mensal simulada pelo MCG para a condição $2xCO_2$, pela precipitação mensal correspondente simulada pelo MCG na condição atual de $1xCO_2$. A limitação de uso das previsões do MCG para desenvolver cenários regionais tem sido discutida em literatura, especialmente com relação à distribuição sazonal da precipitação.

O modelo estocástico de processo pontual - NSRP - forneceu um razoável caminho para a incorporação das tendências indicadas pelo modelo MCG como estimativas das quantidades das variabilidades em curta-escala. Nesta análise, o modelo NSRP foi usado para gerar séries de 100 de chuvas diárias para os dois cenários climáticos $1xCO_2$ e $2xCO_2$. Considerou-se, nesta análise, que todos os parâmetros do modelo, exceto a intensidade média da célula

geradora da precipitação, permaneceriam constantes para os dois cenários de precipitação.

Os resultados para a sub-bacia de Andaraí mostraram que uma redução na precipitação, associada com o aumento da temperatura poderia ter um impacto significativo no balanço hídrico. O impacto nos componentes do balanço hídrico anual poderia ser minimizado ou ampliado, dependendo da distribuição sazonal das mudanças previstas. Nos dois cenários baseados nos modelos MCG as reduções no escoamento superficial e na umidade do solo foram observadas especialmente nos períodos de inverno e primavera. O cenário UKHI não indicou alterações no total anual do escoamento superficial, enquanto o CCCII indicou uma grande redução nesse total de aproximadamente 40%. O cenário UKHI indicou o maior decréscimo (mais que 60%) na evapotranspiração real, na primavera e o CCCII mostrou uma redução distribuição uniformemente na evapotranspiração ao longo do ano (variando de 3 a 18%), exceto no mês de março.

De acordo com os cenários baseados nos dois modelos MCG, o escoamento da bacia que atualmente é excedido em 95% dos meses, seria excedido com frequência menor, no futuro cenário de mudanças climáticas. Em 10 anos, o escoamento superficial é menor que o atual valor com percentual de 95 de frequência, em mais que seis meses; no cenário MCG com o dobro de CO_2 , o escoamento superficial mensal seria menor que o atual Q95, em vinte e quatro meses.

Uma análise de sensibilidade foi executada para examinar em que extensão as alterações da precipitação (em oposição à temperatura) seria responsável pelos impactos hidrológicos associados aos cenários climáticos. Esta análise revelou que os impactos hidrológicos na bacia do estudo eram mais fortemente controlados pelas reduções na precipitação que pelos acréscimos da temperatura.

As mudanças na temperatura isoladamente poderiam gerar impactos estatisticamente insignificantes, no balanço hídrico anual. Quando a precipitação foi mantida inalterada, o escoamento superficial anual decresceu em aproximadamente 9% e a evapotranspiração aumentou em menos de 4%, para um aquecimento médio de $4^{\circ}C$. Na ausência de modificações na evapotranspiração potencial, o escoamento seria muito mais sensível à redução na precipitação e menos sensível ao aumento da mesma. A evapotranspiração atual reduziria uma vez que menos umidade estaria disponível no solo em consequência da redução da precipitação. Deve ser lembrado, entretanto, que estes resultados são questionáveis, visto que despreza a forte influência da cobertura vegetal no controle da refletividade, resistência dos estômatos e a interceptação de umidade pela vegetação que afetam diretamente a evapotranspiração real e conseqüentemente o balanço hídrico.

REFERÊNCIAS

- BATHURST, J. C.; KILSBY, C. & WHITE, S. (1994). Modeling the Impacts Of Climate and Land Change on Basin Hydrology and Soil Erosion in Mediterranean Europe. In: *Mediterranean Desertification and Land Use*, eds. J. B. Thornes and J. Brand. John Willey and Sons.
- EAGLESON, P. (1978). Climate, soil and vegetation, 2. The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences, *Water Resour. Res.*, vol. 14(5), p. 713-721.
- GATES, W. L. (1985). The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem impacts of climatic change. *Climatic Change*, 7, p. 267-151.
- GLEICK, P. H. (1986). *Regional water availability and global climatic change: The hydrologic consequences of increase in atmospheric CO₂ and other trace gases*. Energy and Resources Group. PhD Thesis, ERG-DS-86-1, University of California, Berkley. 688 p.
- HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J. & EPHRAUMS, J. J. (1990). Climate Change: The IPCC Assessment. *The Policymakers' Summary of the Report of the IPCC Working Group I*. Cambridge University Press. 26 p.
- KATTENBERG, A. et al. (1996). Climate models - projections of future climate. In: *Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, p. 285-357.
- KAVVAS, M. L. & DELLEUR, J. W. (1975). *The stochastic and chronological structure of rainfall sequence: Application to Indiana*, water Resources Research Center. Technical Report, n. 57, Purdue Univ., West Lafayette, Indiana.
- LANNA, A. E. & SCHWARZBACH, M. (1989). *MODHAC - Modelo Hidrológico Auto-Calibrável*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Bramiu. 55 p.
- LUEDEKE, M. K. B. et al. (1994). The Frankfurt biosphere model: a global process-oriented model for the seasonal and longterm SCO_2 exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Part I: model description and il. *Climate Research* 4, p. 143-166.
- MACCARTHY, J. M.; CANZIANI, O. F.; LEARY, N. A.; DOLDEEN, D. J. & WHITE, K. S. (2001). Climate Change: The Third IPCC Assessment. *Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II*. Cambridge University Press. 1000 p.
- MEDEIROS, Y. D. P. (1994). *Modeling the hydrological impacts of climatic change on a semi-arid region*. PhD Thesis, Newcastle University. 169 p.
- MITCHELL, J. F. B.; MANABE, S.; MELESHKO, V. & TOKIOKA, T. (1990). Equilibrium climate change - and its implications for future. in *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, p. 131-172.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I.; FEBRES DE POWER, B. & VALDES, J. B. (1987). Rectangular pulses point process model for rainfall: Analysis of empirical data. *Journal of Geophysical Research*, vol. 92(D8), p. 9645-9656.
- ROSENBERG, N. J.; KIMBALL, B. A.; MARTIN, P. & COOPER, C. F. (1990). From Climate and CO₂ Enrichment to Evapotranspiration, in *Climate Change and US. Water Resources*. Ed. P. E. Waggoner, Report of the American Association for the Advancement of Science Panel on Climatic Variability, p. 151-175.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Ed. UFRGS/ABRH. Rio Grande do Sul.
- TURNER, B. L. et al. (1995). *Land-use and Land-cover Changer. Science/ Research Plan*. IGPB Report n. 35. Stockolm. 132 p.
- VINNER, D. & HULME, M. (1993). *Climate Change Scenarios for Impact Studies in the UK: General Circulation Models, Scenario Construction Methods and Applications for Impact Assessment*, Norwich. 70 p.

Hydrological Impact Analysis of Climate Change in a Semi-arid Region

ABSTRACT

Global climate change is expected to occur within the next few decades. This hypothesis is based on the increase in atmospheric CO₂ and other greenhouse gases. These increases will probably affect water resources to different degrees in different places.

This paper focuses on the sensitivity of runoff and soil moisture to the climate change in the semi-arid region of Northeastern Brazil (NEB). Climatic scenarios based on the results yielded by the General Circulation Models (MCG), were used to translate the potential changes in temperature and precipitation for the NEB into runoff and soil moisture predictions.

Hydrological modelling and climate modelling approaches were combined in the impact assessment of climate change on water resources.

Climate change simulations were performed using the model parameters validated for the present conditions. The present and future conditions were derived from the MCG data under both the stable - 1xCO₂ and 2xCO₂ concentrations in the atmosphere. Reasonable predictions of the changes in catchment runoff and soil moisture were obtained.

Key words: climate change; hydrological model; semi-arid.