

# Revista Brasileira de Geografia Física



ISSN:1984-2295

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

# Efeitos do desmatamento em larga-escala na hidrologia da bacia do Uraim, Amazônia

Rodrigo da Cruz de Araujo<sup>1</sup>, Marcos Ximenes Ponte<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, Av. dos Portugueses, 1966, Bacanga, São Luís – MA. araujo.rodrigo@ufma.br (autor correspondente). <sup>2</sup> Doutorado Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, Universidade Federal do Oeste do Pará, Rua Vera Paz, s/n, Prédio Tapajós 1, sala 102, Bairro do Salé, Santarém – PA. ximenes@ufpa.br.

Artigo recebido em 15/08/2016 e aceito em 27/09/2016

#### RESUMO

A conversão de florestas tropicais é um grande problema ambiental, com impactos no clima e nos regimes hidrológicos. Diversas pesquisas apontam que o desmatamento em larga-escala da Amazônia poderia levar a alterações no clima, se refletindo em redução de chuvas. Assim, o objetivo aqui é analisar o impacto da mudança de cobertura vegetal na precipitação e na vazão de uma bacia de grande-escala na Amazônia, a qual já sofreu desflorestamento extenso. A Bacia do Rio Uraim, localizada no Pará, foi então selecionada porque originalmente era uma área de floresta, mas atualmente já experimentou desflorestamento da ordem de 65% de sua extensão. Usando série histórica de dados, testes estatísticos z-teste e t-teste foram realizados para verificar as diferenças hidrológicas entre dois períodos (representando condições distintas de cobertura vegetal). Os resultados indicam que a precipitação média anual do período desmatado é aproximadamente 25% menor que para os anos com floresta (p=0,04). Como consequência da diminuição de chuvas há uma redução de 22% na vazão do canal (p=0,006). No que diz respeito aos regimes da bacia os resultados também indicam redução de 65% na precipitação durante a estação seca (p=0,0001) e de 36% na vazão durante os meses de estiagem (p=8,9E-8). Esses resultados são particularmente relevantes uma vez que confirmam com dados de campo a ocorrência de decréscimo na chuva como resultado de desmatamento em larga-escala, fenômeno apontado até então apenas como previsão, obtida por meio de simulações, para cenários futuros.

Palavras-chave: mudança de cobertura do solo, hidroclimatologia, precipitação, vazão.

## Effects of large-scale deforestation on hydrology of Uraim basin, Amazonia

## ABSTRACT

Conversion of tropical forests is a major environmental problem, with impacts on climate and on hydrological regimes. Several researches point that Amazon deforestation on a large scale could lead to climate changes, reflecting in reduced rainfall. So, objective here is to analyze the impact of vegetation cover changes in precipitation and streamflow of a large-scale catchment in Amazon which has already undergone extensive deforestation. The Uraim River Basin, located in Pará, was then selected because this was originally a rainforest area, but currently has already experienced deforestation in the order of 65% of its extension. Using long-time series data, classical statistical z-tests and t-tests were performed to verify the hydrological differences between two periods (representing different conditions of land cover vegetation). The results indicate that mean annual precipitation of deforested period is approximately 25% lower than the values for forested years (p=0.04). As consequence of decreasing rainfall there is a 22% reduction in the channel's discharge (p=0.006). Regarding basin's regime the results also indicate a 65% reduction in precipitation during dry season (p = 0.0001) and a 36% reduction in streamflow during low-flow months (p = 8,9E-8). These results are particularly relevant once confirm with field data the occurrence of decrease in rainfall as a result of large-scale deforestation, phenomenon pointed until now only as forecasts obtained by various simulations of future scenarios. Keywords: land cover change, hydroclimatology, precipitation, streamflow.

# Introdução

De acordo com INPE (2015) o total desmatado na Amazônia Brasileira cresceu de 15,2 milhões de hectares em 1978 para 41,5 milhões em 1990, 58,7 milhões em 2000 e 71 milhões de hectares em 2008.

A conversão de florestas tropicais é um grande problema ambiental, com impactos no clima, solo, hidrologia, etc (Hecht et al, 1988; Fearnside, 1990; Sahin & Hall, 1996). Vários estudos já foram realizados para quantificar o impacto das mudanças de cobertura vegetal sobre

2390

o balanço hídrico de bacias de captação (por exemplo, Zhang et al, 1999; Zhang et al, 2001; Costa et al, 2003; Costa et al, 2007; Wang et al, 2009; Petchprayoon, 2010; Van Dijk et al, 2012; Beck et al, 2013).

Zhang et al (2008), Wang et al, 2009, Petchprayoon, 2010, Feng et al (2012), Liang et al (2015a), Liang et al (2015b) and Gao et al (2016) realizaram pesquisas que concluíram que a vazão de um canal aumenta significativamente em áreas desmatadas. Wang et al (2013) destaca que, em geral, acredita-se que mudanças superiores a 20% na área de floresta usualmente resultam em alterações mensuráveis na vazão do canal. Em resumo: a princípio pode ser esperado que a substituição da vegetação original em florestas uma tropicais deve causar redução evapotranspiração (ET) e associada a ela um aumento na vazão média anual do canal.

Bruijnzeel (1990) expõe que diversas pesquisas demonstraram que aumento de desmatamento causa aumento na vazão anual, entretanto quase todos os estudos foram realizados em bacias de captação relativamente pequenas. Vários autores corroboram tal observação (por exemplo, D´Almeida et al, 2007; Feng et al, 2012; Beck et al, 2013; Van Dijk et al; 2012; Zhou et al, 2015) e apontam que estudos em grandes bacias são mais raros e em geral não conseguiram encontrar as mesmas tendências.

Diversos estudos apontam, porém, que o desmatamento em uma maior escala pode ter efeitos diferentes. Observações de campo (Gash e Nobre, 2007) e simulações numéricas (Nobre et al, 1991; Costa e Foley, 2000; Sampaio et al, 2007; Coe et al, 2009) revelam que o desmatamento da Amazônia em grande escala poderia provocar alterações no clima regional. Dentre essas mudanças, destaca-se aqui, em razão do enfoque dessa pesquisa, a tendência de redução da precipitação.

Nobre et al (1991) realizaram simulações de cenários com floresta e desmatado, utilizando um modelo numérico acoplado da atmosfera e da biosfera para avaliar os efeitos do desmatamento da Amazônia sobre o clima regional e global e encontraram que, quando a floresta amazônica era substituída no modelo por pastagem, ocorria um decréscimo de cerca de 30% na evapotranspiração anual, de 25% na precipitação e de 20% no *runoff* na região.

Nobre et al (1991) explicam, de modo mais detalhado, que a absorção de radiação solar é reduzida na situação desmatada em razão do maior albedo da superfície, de modo que a energia radioativa efetiva disponível na superfície para ser

dividida entre fluxos de calor latente e de calor sensível se torna bem menor no caso desmatado.

Adicionalmente, o menor índice de área de folhagem e a menor capacidade de estocagem de umidade do solo na situação desmatada têm como efeito a redução da taxa média de transpiração. Ainda, no caso de desmatamento, ocorre menos interceptação da precipitação e, daí, menor "reevaporação", uma vez que a rugosidade da superfície é menor. A redução na transpiração e as perdas na interceptação na situação desmatada implicam que, comparado à condição de floresta, uma maior proporção da energia radioativa efetiva se converte em calor sensível.

Nobre et al (1991) explicam ainda que seria muito provável que o runoff superficial aumentasse para uma área específica na qual floresta primária seja substituída por uma cobertura vegetal de pequeno porte. Também seria muito provável que o "runoff superficial da bacia Amazônica aumentaria após desmatamento em escala muito grande se alguém pudesse afirmar com confiança que a precipitação permanecesse sem alteração ou aumentasse" (Nobre et al, 1991, p.972). Entretanto, os mesmos esclarecem que resultados de simulações sugerem que a redução nas taxas de precipitação da Bacia Amazônica seriam maiores que a redução evapotranspiração, o que implicaria o runoff deveria de fato decrescer na escala da bacia.

Costa e Foley (2000) colocam que numerosos estudos têm usado modelos gerais de circulação atmosférica para examinar os possíveis efeitos do desmatamento da Amazônia sobre o clima global e regional, com todas as simulações mostrando um decréscimo significativo na evapotranspiração e a maior parte deles indicando um decréscimo significativo da precipitação sobre a bacia Amazônica.

Coe et al Filho (2009) relatam que a princípio o desmatamento reduz a evapotranspiração e aumenta o fluxo do canal, em razão do índice de área de folhagem reduzido, profundidade e densidade das raízes menores e compactação do solo aumentada. Porém, uma vez que o desmatamento na bacia Amazônica ocorra em uma escala muito grande, interações atmosféricas podem reduzir a precipitação regional significativamente.

Na mesma linha, Costa e Foley (2000) expõem que há expectativa de que a bacia Amazônica irá experimentar pelo menos duas mudanças ambientais principais nas próximas décadas e séculos: áreas cada vez maiores de floresta sendo convertidas para pastagem e agricultura e a continuação do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Dessa forma, em seu estudo, os autores usam um modelo de circulação geral atmosférica e um simulador integrado de biosfera para determinar os efeitos combinados do desmatamento de larga-escala com as concentrações maiores de CO<sub>2</sub> sobre o clima Amazônico.

Especificamente sobre o efeito do desmatamento, as simulações realizadas indicaram que o desmatamento provocaria uma redução da precipitação sobre a bacia da ordem de 0,73mm/dia.

Em relação à evapotranspiração, Costa e Foley (2000) também corroboram com as explicações já mencionadas, de que o desmatamento provoca um decréscimo significativo na mesma, por meio de mudanças no albedo (menos energia absorvida), rugosidade reduzida, raízes menos profundas e menor área de folhagem.

Costa et al. (2007) expõem que em micro e meso escala o desmatamento geralmente resulta em ET reduzida e *runoff* e vazão aumentada. Em larga escala, porém, interações atmosféricas podem reduzir significativamente a precipitação regionalmente, e, se tal efeito for superior às mudanças locais na ET, pode resultar em redução na descarga e *runoff*.

Com o objetivo de avaliar se as conversões de floresta para pastagem ou para monocultura de soja teriam o mesmo impacto sobre o clima, os pesquisadores aplicaram dados de reflectividade de cada uma daquelas atividades em um modelo climático, e simularam os efeitos decorrentes da substituição de floresta pelas mesmas. Apesar de encontrarem que ambas as atividades provocariam redução de pluviometria na região, os resultados indicaram que no caso da substituição por soja os efeitos seriam bem mais significativos, com redução de chuvas de 15,7%, enquanto na substituição por pastagens, a queda de precipitação seria de 3,9%.

Costa et al. (2007) também atribuem esta diferença ao maior albedo da plantação de soja, que absorve menos radiação solar do que o pasto ou a floresta, diminuindo a disponibilidade de energia radioativa efetiva. Dessa forma, há uma diminuição das precipitações, pois as chuvas na região dependem principalmente da evapotranspiração, que é função da parcela de calor latente disponível.

Sampaio et al. (2007) corroboram, afirmando que o desmatamento em larga escala na Amazônia poderia alterar o clima regional significativamente. Tal efeito ocorreria porque a substituição de florestas por pastagens e plantações, as quais têm menor albedo e menor demanda de água, levaria a um decréscimo na

radiação efetiva na superfície e menor convergência de umidade sobre a bacia.

Tais conclusões decorrem de trabalho em que Sampaio et al. (2007) usaram um modelo global de circulação atmosférica para avaliar os efeitos que o desmatamento da Amazônia teria sobre o clima regional, utilizando mapas de cobertura do terreno simulados para um cenário de "business as usual" de desmatamento futuro, no qual a floresta seria gradualmente substituída por pastagem ou por agricultura. Em cada caso, foram simulados cenários com percentuais de área desmatada de 20%, 40%, 50%, 60%, 80% e 100%.

O trabalho foca somente na porção oeste da Amazônia em razão da previsibilidade do clima pelo modelo usado ser maior para aquela região. Assim, especificamente para a região oeste da Amazônia (onde se espera mudanças mais intensas) os resultados mostram aumento na temperatura e redução na evapotranspiração e na precipitação, especialmente na estação seca. Destacam, porém, que a redução na precipitação na área é mais evidente quando o desmatamento excede 40% da extensão original da floresta.

Na realidade, pequena escala, descontinuidade e padrão heterogêneo de desmatamento podem a principio governar circulações em meso-escala, o que poderia até mesmo provocar uma elevação na precipitação sobre áreas desmatadas. Entretanto, à medida que o desmatamento afete áreas maiores, com coberturas de solo mais homogêneas, processos terreno-atmosfera de larga escala se tornam dominantes (Sampaio et al., 2007).

Sampaio et al. (2007) explicam que o mecanismo subjacente à mudança na precipitação está ligado à redução da evapotranspiração associada com o o aumento do albedo, o decréscimo no índice de área de folhagem, na profundidade das raízes e a redução na rugosidade do terreno, fatores que levam a um decréscimo no fluxo de calor latente da superfície. Assim, pela redução da evapotranspiração, a eliminação da floresta diminui a quantidade de água "bombeada" para a atmosfera, dessa forma contribuindo para redução na precipitação.

Coe et al (2009) explicam então que aqueles dois processos conduzem a influências que competem entre si no que se refere à vazão do canal, com a evapotranspiração local decrescida sendo consistente com um aumento na descarga, enquanto a precipitação regional reduzida é consistente com uma diminuição no fluxo do canal. A combinação destes processos, então, cria mudanças complexas no fluxo do canal, o qual varia espacialmente em função de condições locais e não locais.

Em seu trabalho, tais autores apresentam e avaliam os resultados de simulações numéricas, cujos resultados ilustram a influência do histórico e do potencial de desmatamento futuro sobre a evapotranspiração local e descarga do sistema do rio Amazonas, com e sem feedbacks atmosféricos e esclarecem alguns pontos importantes sobre o impacto do desmatamento na Amazônia. Na ausência de uma mudança de escala continental de precipitação, o desmatamento em larga escala pode ter um impacto significativo nos sistemas de grandes rios, com poucas mudanças precipitação. entanto, com o extenso No desmatamento feedbacks atmosféricos provocados por diferenças na estrutura física das culturas e pastagens substitutas da vegetação natural, provocam mudanças no balanço hídrico da mesma ordem de grandeza que as mudanças devido a processos locais de superfície da terra, mas de sinal contrário. Além disso, as mudanças no balanço hídrico causadas por feedbacks atmosféricos não limitados àquelas bacias desmatamento ocorre, mas se espalham de forma desigual em toda a Amazônia por meio da circulação atmosférica. Como resultado, mudanças de descarga e dos ambientes aquáticos em razão do desmatamento futuro da Amazônia provavelmente serão significativas e se darão como uma função complexa de quanto a vegetação foi removida de uma bacia hidrográfica específica e quanto foi removido de toda a Bacia Amazônica.

De modo geral, portanto, os estudos concluem que o desmatamento em larga-escala pode, de fato, provocar efeitos sobre o clima, mais especificamente sobre a precipitação, em virtude do surgimento de interações atmosféricas. Os autores explicam essa redução em razão do maior albedo, menor profundidade das raízes, menor rugosidade e menor índice de área de folhagem, fatores que levam à diminuição do calor latente, causando redução significativa evapotranspiração e, daí, decréscimo fornecimento de água para a atmosfera (Nobre et al, 2000; Sampaio et al., 2007).

Deve-se enfatizar, porém, que tais conclusões (conforme descrito acima) advêm fundamentalmente de simulações de cenários futuros, utilizando modelos de circulação atmosférica nos quais condições de mudança de cobertura vegetal hipotéticas são arbitradas, controladas e alteradas pelos autores, ou seja, tais resultados são tidos como "possibilidades/ameaças para o futuro" e não como "realidades do presente".

Nesse contexto, o objetivo aqui é analisar o impacto das mudanças de cobertura vegetal na chuva e na vazão de uma bacia de grande dimensão na Amazônia Brasileira que já sofreu desmatamento extenso, procurando dessa forma ratificar as previsões apresentadas na literatura, segundo as quais um desmatamento extensivo deve provocar redução na precipitação.

#### Material e métodos

Descrição geral da área

Para as análises do presente trabalho, foi definida como área de estudo, geograficamente, uma sub-bacia hidrográfica denominada Bacia do Rio Uraim, situada na micro-região de Paragominas (Figura 1) devido ao avançado desflorestamento que a mesma apresenta.

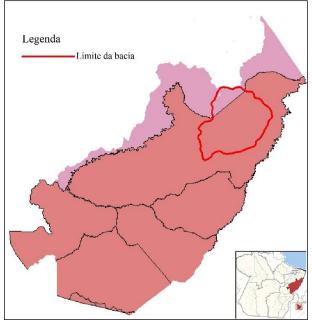


Figura 1. Detalhe da localização da Bacia do Uraim em relação à microrregião Paragominas

Somando-se a área do município de Paragominas (dentro do qual está compreendida praticamente a totalidade da bacia) com as áreas dos municípios do entorno (i.e. Ulianópolis, Dom Eliseu, Nova Esperança do Piriá, Goianésia e Ipixuna do Pará) obtém-se um total próximo de 45.000 km2, dos quais cerca de 23.000km2 já foram desmatados, ou seja, acima de 50% da área (INPE, 2015). Destaca-se ainda que o avanço ocorreu de forma acentuada em um curto período, com aumentos significativos em intervalo de poucos anos.

Especificamente para a área correspondente à bacia em estudo, a totalização de áreas desmatadas alcançou em 2008 2.936,7km² (INPE, 2015) o que corresponde a um nível de desmatamento de 65% dos 4.500km² totais da mesma.

Dados hidrometeorológicos e método de análise

Zhang et al (1999) explica que estudos associando o balanço hídrico com mudanças na vegetação geralmente se baseiam em técnicas de pares de bacias experimentais ou em estudos hidrológicos. Guo et al (2016) diz que os três métodos que costumam ser usados para analisar quantitativamente os efeitos provocados por mudanças climáticas e/ou mudança no uso do solo sobre as características da hidrologia regional são as investigações de bacias experimentais, análises de séries históricas de dados hidrometeorológicos e simulações baseadas em modelos hidrológicos.

Andréassian (2004) considera que pares de bacias experimentais minimizam duas "influências de confusão" que ocorrem em estudos de bacias individuais: i) variabilidade climática e ii) variabilidade interbacia. Peel et al (2010) aponta, por outro lado, que a generalização de resultados de pares de bacia para um domínio mais amplo apresenta restrições, porque as áreas das bacias estudadas geralmente são pequenas e de uma faixa estreita de tipos climáticos. Outras restrições são que a aplicação de tal técnica é cara (Zhang et al, 2011) e geralmente apenas bacias muito pequenas são usadas (Zhang et al, 2011; Liu et al, 2012).

Costa et al (2003) considera que para avaliar os efeitos de mudanças de cobertura vegetal em grandes áreas, a metodologia de pares de bacia não é indicada, mas sim o estudo da mesma bacia em diferentes períodos de tempo, entre os quais tenha ocorrido mudança significativa na cobertura vegetal.

De acordo com Van Dijk (2012) experimentos controlados fornecem evidências fortes de que mudanças na cobertura do solo (como

desflorestamento ou reflorestamento) podem afetar a vazão média da bacia. Entretanto, influências similarmente fortes não foram encontradas em estudos que interpretam a vazão a partir de múltiplas bacias com cobertura mista do terreno (Van Djik et al, 2012). Zhang et al (2011) explicam que análises de tendência temporal têm a vantagem de serem aplicáveis a bacias individuais que tenham sofrido mudança de cobertura vegetal, sem a necessidade de bacias de controle.

Assim, utiliza-se aqui a série histórica de registros diários de vazão para uma estação fluviométrica, agrupados em dados mensais. Tal estação é considerada, portanto, o exutório da bacia, a qual fica delimitada à sua montante.

Para tais estudos, foram utilizadas as séries históricas de vazão (dados de vazão da estação Cafezal) e de precipitação pluviométrica média para a bacia (obtida pelo método de Thiessen, 1911). A estação Cafezal tem como características gerais: latitude 02°46'18"S; longitude 46°48'10" W; área de drenagem de aproximada mente 4.600km².

A disponibilidade de dados abrangendo tanto a vazão quanto a precipitação na área vai de 1985 a 2007. Desta forma, a fim de representar a maior diferença possível para as condições de cobertura vegetal, foram utilizados os anos de 1985 a 1989 como representativos do período de maior preservação florestal na área e de 2003 a 2007, correspondendo à situação de desmatamento avançado. Utilizando-se os levantamentos disponibilizados por INPE (2015), foram geradas figuras das situações da cobertura vegetal da bacia em 1997 e em 2008 (Figuras 2 e 3).

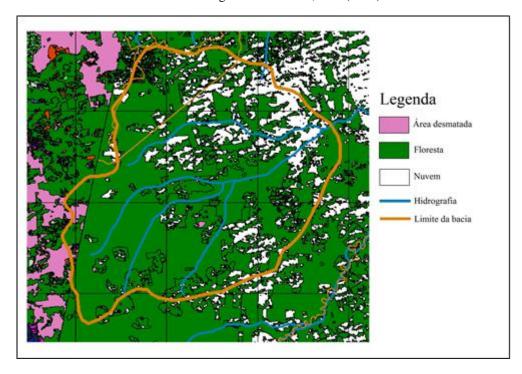


Figura 2. Situação da cobertura vegetal da Bacia do Uraim em 1997. Fonte: Elaborado a partir de INPE (2015).

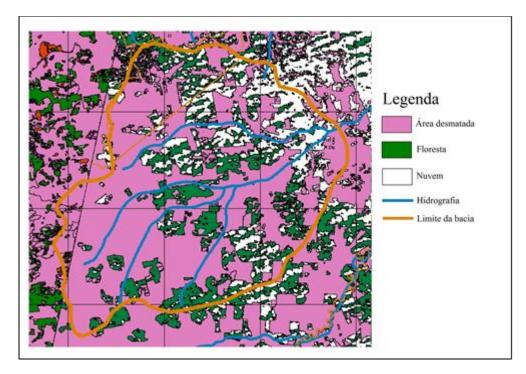


Figura 3. Situação da cobertura vegetal da Bacia do Uraim em 2008. Fonte: Elaborado a partir de INPE (2015).

A partir dos dados de chuva disponíveis, foi determinada a precipitação espacial média na bacia, estabelecida aqui como à montante da estação Cafezal, para todos os meses dos dois períodos em estudo. Em um primeiro passo para essa determinação foi realizado o preenchimento

de falhas para as séries históricas das estações disponíveis pelo método da proporção.

Uma verificação de consistência dos dados foi feita pelo método da dupla-massa. Nesse método, calcula-se a média aritmética dos totais precipitados em cada ano para todas as estações e

acumula-se essa média. Os valores acumulados da média dos pontos são plotados em gráfico contra os totais acumulados de cada um deles, com mudança de tendência no gráfico indicando inconsistência de dados. Os resultados obtidos foram altamente satisfatórios, indicando que os valores de precipitação registrados são consistentes. Sendo assim, utilizando-se as séries históricas, a precipitação média na bacia estudada foi determinada pelo método dos polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911).

Ainda para avaliar a qualidade dos dados de precipitação e vazão, foram feitos outros dois testes: primeiro, calculou-se a ET média anual de longo-prazo, subtraindo a descarga média (Q) do pela pluviometria média (P) do mesmo período. O

resultado, ET = 3,7 é consistente com outras estimativas para a região, tais como Costa e Foley (2000) e Sampaio et al (2007). Outro teste realizado foi a verificação da relação entre evapotranspiração (ET) média anual e precipitação média anual (P) para a área em estudo, obtendo-se o resultado apresentado na Figure 4. A relação linear encontrada está de acordo com o que seria esperado, conforme explica Bruijnzeel (1990), segundo o qual a evapotranspiração (ET) anual para uma dada floresta tende a estar correlacionada com a pluviometria anual.

Logo, estes dois testes simples indicam que os dados de pluviometria utilizados têm qualidade aceitável e podem ser utilizado na pesquisa.

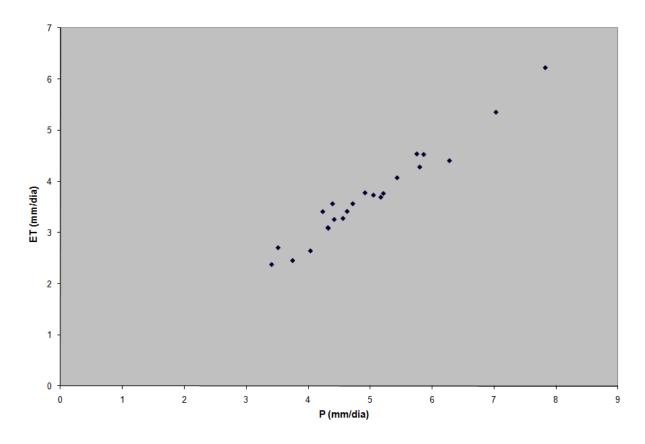


Figura 4. Relação precipitação média anual x evapotranspiração média anual para série histórica (1985 a 2007) da Bacia do Uraim.

A partir das séries históricas de vazão para cada rio e de precipitação pluviométrica média para a bacia (obtida pelo método de Thiessen, com base nas séries históricas das estações das respectivas bacias), as médias de longo-prazo dos principais componentes hidrológico, i.e, P, Q e ET foram determinadas para cada um dos períodos adotados. Em um segundo passo, além das médias anuais foram analisadas as mudanças hidrológicas

ocorridas nos períodos chuvoso e seco (no que se refere à precipitação) e nos períodos de cheia e estiagem (no que se refere à descarga da bacia).

A fim de analisar a significância das diferenças entre as médias encontradas para cada um dos dois períodos, foram realizados os testes estatísticos clássicos z-teste e t-teste. A probabilidade de que se tenha cometido um erro e rejeitado a hipótese nula (que corresponde à

verificação de que as médias comparadas são iguais) quando, na realidade, a mesma seja verdadeira é denominada nível de significância do teste.

No contexto dessa pesquisa, então, tais testes permitem analisar, para cada parâmetro de interesse (precipitação média anual, vazão média anual, etc) se há diferença entre as médias dos dois períodos (considerados como representativos de situações distintas de conservação florestal) e confirmar se tais diferenças são estatisticamente significativas (por exemplo, nível de significância inferior a 5%).

## Resultados

Efeito da Mudança de Cobertura Vegetal Sobre as Médias Anuais da Bacia do Rio Uraim

A partir das séries históricas de vazão para a estação Cafezal e de precipitação pluviométrica média para a bacia (obtida pelo método de Thiessen), foram determinadas as médias de longoprazo da precipitação (P), vazão (Q) e evapotranspiração (ET) para os dois períodos anteriormente definidos: 1985 a 1989 e 2003 a 2007, adotados como representativos das diferentes condições de cobertura vegetal (Tabela 1).

Pela extensão da bacia, podem ser admitidas as seguintes premissas: i) toda descarga, seja superficial ou subsuperficial, passará pelo exutório da bacia, ou seja, pela estação Cafezal e ii) pode-se considerar que não há variação no armazenamento do sistema, uma vez que os períodos considerados são longos (vários anos). Desta forma, a ET de longo-prazo foi calculada pela diferença entre precipitação e descarga. A tabela 1 apresenta os resultados das médias de P, Q e ET para cada período.

Para avaliar a variabilidade da precipitação ao longo do tempo, i.e. para visualizar sua variabilidade anual e decadal a série histórica de precipitação na bacia foi plotada graficamente, obtendo-se o Gráfico 1.

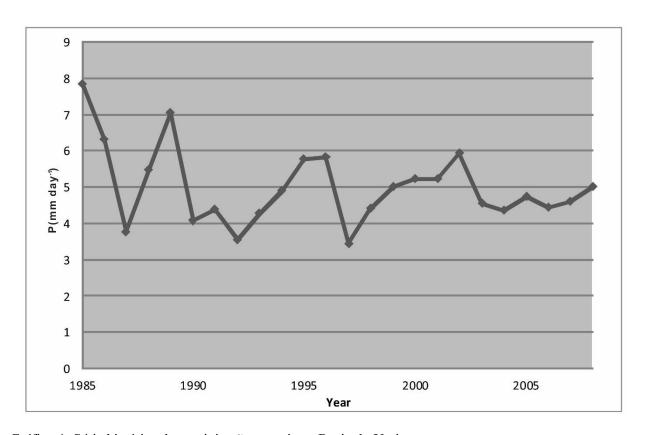


Gráfico 1. Série histórica de precipitações anuais na Bacia do Uraim.

Tabela 1. Médias de longo-prazo de P, Q, ET e C para a Bacia do Uraim

Período	P (mm/dia)	Q(mm/dia)	ET (mm/dia)
1985-1989	6,114044	1,560411	4,553633
2003-2007	4,570834	1,210691	3,360143

Nesse caso, a série histórica permite observar que a variabilidade da precipitação não manteve o mesmo comportamento ao longo do tempo, sendo perceptível uma mudança no padrão nos anos mais recente, especialmente no período posterior ao ano de 2003, ou seja, o padrão de variação ano a ano e década a década no período mais recente mostra-se diferente do que era observado para os anos mais antigos.

Tal constatação reforça a hipótese de que a mudança verificada na precipitação entre os períodos considerados não esteja relacionado simplesmente a uma possível variabilidade decadal na bacia, tampouco a eventos específicos causando precipitações anômalas em anos específicos. Então, deve ter havido um fator externo que provocou essa mudança no padrão, o qual se acredita aqui que tenha sido a acentuada alteração na cobertura vegetal ocorrida na área.

# Efeito na Precipitação Média Anual

A fim de analisar as diferenças entre as médias das precipitações para os dois períodos, o teste estatístico z-teste for realizado, cujos resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Z-Teste para médias de longo-prazo da precipitação na Bacia do Uraim para os períodos 1 (1985-1989) e 2 (2003-2007)

	Período	Período
Precipitação	1	2
Média	6,11404	4,57083
Variância	28,4517	21,0683
Observações	60	60
Hipótese da diferença de		
média	0	
Z	1,69867	
P(Z<=z) uni-caudal	0,04469	
z crítico uni-caudal	1,64485	
P(Z<=z) bi-caudal	0,08938	
z crítico bi-caudal	1,95996	

## Efeito na Vazão Média Anual

De maneira similar, para analisar as diferenças entre as médias de vazão mensais encontradas para cada período foi aplicado novamente o z-teste, com os resultados sendo apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Z-Teste para médias de longo-prazo da vazão na Bacia do Uraim para os períodos 1 (1985-1989) e 2 (2003-2007)

	Período	Período
Vazão	1	2
Média	1,56041	1,2106
Variância	0,680768	0,5229
Observações	60	60
Hipótese da diferença de		
média	0	
Z	2,469068	
P(Z<=z) uni-caudal	0,006773	
z crítico uni-caudal	1,644854	
P(Z<=z) bi-caudal	0,013547	
z crítico bi-caudal	1,959964	

# Efeito no Coeficiente de Runoff Médio Anual

Finalmente, para analisar a diferença entre as médias dos coeficientes de *runoff* (C=Q/P) encontrados em cada período, foi usado o t-teste, com resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. T-Teste para médias de longo-prazo do Coeficiente de *Runoff* na Bacia do Uraim para os períodos 1 (1985-1989) e 2 (2003-2007)

P		<u> </u>
	Período	Período
Coeficiente de Runoff	1	2
Média	0,26660	0,26781
Variância	0,00305	0,00025
Observações	5	5
Hipótese da diferença de		
média	0	
Graus de liberdade	8	
	-	
T estatístico	0,04716	
P(T<=t) uni-caudal	0,48177	
t statistic bi-caudal	1,85954	
P(T<=t) bi-caudal	0,96354	
		•

## Efeito Sobre o Regime da Bacia do Rio Uraim

A fim de verificar de que forma as mudanças na cobertura vegetal da área afetaram a sazonalidade das características hidrológicas da bacia, foram realizados testes comparando as médias das precipitações nos trimestres chuvoso e seco e das vazões nos trimestres de cheia e de estiagem. Para melhor visualização destes trimestres, foram plotadas as curvas de precipitação média mensal e vazão média mensal de cada período (Gráficos 2 e 3).

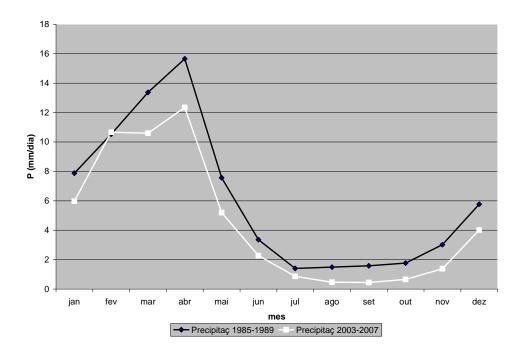


Gráfico 2. Curvas de precipitação média mensal na bacia do Uraim para os períodos de 1985-1989 e 2003-2008.

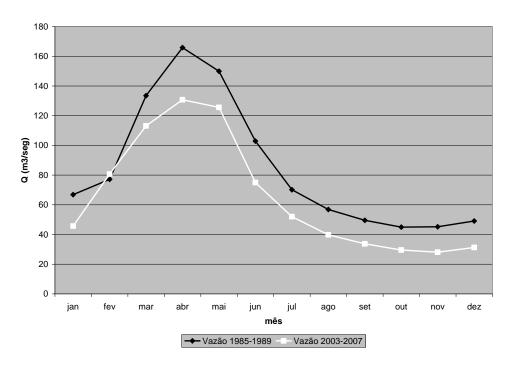


Gráfico 3. Curvas de vazão média mensal na bacia do Uraim para os períodos de 1985-1989 e 2003-2008.

Quanto ao regime de chuvas, uma primeira e importante constatação é que o período menos chuvoso se altera, passando de julho-agosto-setembro nos anos de 1985-1989 para agosto-setembro-outubro nos anos de 2003-2007. O trimestre mais chuvoso, porém, não sofre alteração,

mantendo-se nos meses de fevereiro-março-abril em ambos os períodos.

No que diz respeito à descarga da bacia, não ocorre alteração de sazonalidade, com meses de estiagem em outubro-novembro-dezembro e cheia em março-abril-maio em ambos os períodos (admitidos como "pré" e "pós" desmatamento).

Definidas tais estações, procedeu-se a etapa de testes estatísticos para analisar as diferenças percebidas entre os dois períodos de tempo (1978-1985 e 2003-2008).

Efeito sobre o Regime das Estações Chuvosa e de Cheia

Uma vez identificadas tais estações, t-testes foram executados para analisar se as diferenças entre os períodos verificadas quanto às estações chuvosas e de cheias eram estatisticamente significativas, obtendo-se os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. T-teste para médias de precipitação nas estações chuvosas

estações enavosas	Período	Período
Precipitação	1	2
Média	13,1846	11,1997
Variância	17,6644	6,25392
Observações	15	15
Hipótese da diferença d	le	
média	0	
Gl	28	
Stat t	1,57188	
P(T<=t) uni-caudal	0,06360	
t crítico uni-caudal	1,70113	
P(T<=t) bi-caudal	0,12721	
t crítico bi-caudal	2,04840	

Tabela 6. T-teste para medias de vazão nas estações chuvosas

estações chuvosas		
	Período	Período
Vazão	1	2
		2,2794
Média	2,771713	7
		0,1056
Variância	0,245742	1
Observações	15	15
Hipótese da diferença de		
média	0	
Gl	28	
Stat t	3,216187	
P(T<=t) uni-caudal	0,001634	
t crítico uni-caudal	1,701131	
P(T<=t) bi-caudal	0,003268	
t crítico bi-caudal	2,048407	

Efeitos sobre o Regime das Estações de Seca e de Estiagem

Os testes estatísticos t-testes foram aplicados também para checar as diferenças entre os períodos para precipitações nas estações secas e de vazões nos períodos de estiagem (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7. T-teste para médias de precipitação nas estações secas

	Período	Período
Precipitação	1	2
		0,5196
Média	1,491295	5
		0,1455
Variância	0,69063	9
Observações	15	15
Hipótese da diferença de	e	
média	0	
Gl	28	
Stat t	4,115184	
P(T<=t) uni-caudal	0,000154	
t crítico uni-caudal	1,701131	
P(T<=t) bi-caudal	0,000308	
t crítico bi-caudal	2,04840	

Tabela 8. T-teste para medias de vazão nas estações de estiagem

		Período	Período
Vazão		1	2
Média		0,85859	0,54828
Variância		0,02625	0,00429
Observações		15	15
Hipótese da diferença	de		
média		0	
Gl		28	
Stat t		6,87586	
P(T<=t) uni-caudal		8,9E-08	
t crítico uni-caudal		1,70113	
P(T<=t) bi-caudal		1,8E-07	
t crítico bi-caudal		2,04840	

# Discussão

Quanto às mudanças na Precipitação Média Anual e na Vazão Média Anual

Os resultados dos testes estatísticos realizados indicaram que:

- a) A precipitação média do segundo período é 1,54321 mm/dia menor que a do primeiro, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 25%, com nível de significância 0,04;
- b) Há uma redução na descarga, que passa de 1,5604 mm/dia no primeiro período para 1,21 mm/dia no segundo, o que representa uma diminuição de cerca de 22% (P=0,005);
- c) A diferença entre os coeficientes de *runoff* é negligenciável, não sendo estatisticamente significativa.

De modo geral, podem-se resumir tais resultados da seguinte forma: ocorre uma redução

na precipitação média da área, acarretando uma diminuição na vazão da bacia, sendo ambas estatisticamente significativas. Dentre essas mudanças, destaca-se aqui, em razão do enfoque dessa pesquisa, a tendência de redução da precipitação. Ressalta-se ainda que as reduções na precipitação e na vazão são coerentes, sendo ambas na ordem de 25% dos valores registrados para o primeiro período.

Evidentemente, mudanças na precipitação de uma região podem ser causadas por outros fatores, que não o desmatamento, como por exemplo fenômenos como El-Nino, La-Nina. Faz-se necessário, então, avaliar a possibilidade de que os resultados aqui encontrados estejam relacionados a tais tipos de ocorrência.

Eventos El-Nino usualmente causam redução nas chuvas na Amazônia, então, a princípio poderse-ia supor que essa fosse uma explicação para os resultados verificados no segundo período. Entretanto, não houve eventos fortes de El-Nino nos anos de 2003 a 2007, refutando a possibilidade de relação entre os resultados encontrados com o referido fenômeno.

De maneira similar, as ocorrências de La-Nina geralmente estão relacionadas a aumento de chuva, o que poderia justificar os valores de precipitação mais elevados no primeiro período. Durante tais anos houve um evento La-Nina em 1988. Entretanto, testando a diferença entre os períodos 1 e 2 excluindo-se o ano de 1988, encontra-se uma precipitação média nos primeiros anos ainda maior (6,27 mm/dia) ainda com nível de significância elevado (p = 0,04). Então, os resultados encontrados nesse caso também não parecem ser explicados por tal evento.

Marengo and Espinoza (2015) apontam que o ano de 2005 apresentou deficiência de chuvas, causando seca em grandes áreas da Amazônia, devido a uma temperatura de superfície do mar anômala. Então, essa também poderia ser a causa para os resultados encontrados. Entretanto, a Bacia do Uraim não está localizada dentro da área afetada pelo fenômeno, o qual foi concentrado na porção sudoeste da região. Dessa forma, tal anomalia também não seria a explicação para a redução de chuvas verificada na Bacia do Uraim.

Então, os resultados obtidos estão em consonância com diversos estudos que apontam que o desmatamento da Amazônia em larga escala poderia provocar alterações no clima regional (Nobre et al, 1991; Costa e Foley, 2000; Gash e Nobre, 2007; Sampaio et al., 2007; Coe et al, 2009). A explicação para tal redução, conforme já exposto, recai no maior albedo, menor profundidade das raízes, menor rugosidade e menor índice de área de folhagem, fatores que

levam a uma redução significativa na evapotranspiração e, consequentemente, um decréscimo no fornecimento de água para a atmosfera (Nobre et al., 2000; Sampaio et al., 2007).

# Mudanças no Regime

Em relação à sazonalidade das chuvas e descarga na bacia, os resultados dos testes indicam que a precipitação nos meses mais chuvosos diminui 1,0849 mm/dia entre o primeiro e o segundo período (aproximadamente 15%), porém tal resultado não atende um nível de significância elevado. Entretanto, a vazão no período de cheia passa de 2,7717 mm/dia para 2,27947 mm/dia, uma redução de 17%, com um nível de significância bastante alto (P =0.001).

No que diz respeito às secas e estiagens, os resultados indicam uma redução da precipitação nos meses mais secos entre os dois períodos, passando de 1,4913mm/dia na situação de vegetação mais preservada para 0,5196mm/dia na condição mais devastada. Esses valores representam, portando, uma redução de 65% na precipitação nos meses menos chuvosos, mais uma vez com nível de significância elevado (P = 0,000154).

Finalmente, a vazão nos meses de estiagem também sofre diminuição, passando de 0,858mm/dia no primeiro período para 0,548mm/dia no segundo período, uma redução de 36%, também estatisticamente significativa (P = 8,98E-08).

Tais resultados estão em concordância com o descrito na literatura, segundo a qual significativas reduções no fluxo em estações secas geralmente são atribuídas ao desflorestamento (Hardjono, 1980; Myers, 1986)

Especificamente quanto à precipitação, os resultados corroboram Nobre et al (1991), os quais encontraram por meio de simulações, que níveis de desmatamento muito elevados poderiam provocar alteração na precipitação da bacia, com as mudanças sendo maiores para a estação seca.

Os resultados encontrados para a Bacia do Uraim também estão em concordância com o observado por Sampaio et al. (2007), os quais simularam cenários de desmatamento em larga escala na Amazônia e obtiveram resultados indicando que, dentre os efeitos, haveria redução na evapotranspiração e na precipitação, especialmente na estação seca.

#### Conclusões

A bacia do Uraim já sofreu desmatamento na ordem de 65% de sua área, estando inclusa em uma grande área com característica semelhante no que diz respeito à taxa elevada de desmatamento, uma vez que a área total dos municípios vizinhos alcança cerca de 45.000 km2, dos quais cerca de 24.000 km2 já se apresentam devastados. Desta forma, a hipótese testada foi de que o impacto de um desmatamento tão avançado sobre a hidrologia da região se refletiria em redução da precipitação pluviométrica da área.

De modo geral, podem-se resumir os resultados da seguinte forma: ocorre uma redução na precipitação média anual da área, acarretando uma diminuição na vazão média anual da bacia, sendo ambas estatisticamente significativas.

Quanto ao regime de chuvas, uma primeira e importante constatação é que o período menos chuvoso se altera, passando de julho-agosto-setembro nos anos de 1985-1989 para agosto-setembro-outubro nos anos de 2003-2007. O trimestre mais chuvoso, porém, não sofre alteração, mantendo-se nos meses de fevereiro-março-abril em ambos os períodos. No que diz respeito à descarga da bacia, não ocorre alteração de sazonalidade, com meses de estiagem em outubro-novembro-dezembro e cheia em março-abril-maio em ambos os períodos (admitidos como "pré" e "pós" desmatamento).

Os resultados dos testes estatísticos realizados indicam que há uma redução na precipitação nos meses mais chuvosos, porém tal resultado não atende um nível de significância elevado. Entretanto, a vazão no período de cheia apresenta uma redução de aproximadamente 17%, com um nível de significância bastante alto, com P<0,01.

Já para os meses mais secos, os resultados indicam uma redução da precipitação da ordem de 65%, em um nível de significância elevado (P=0,01). Como consequência, a vazão nos meses de estiagem também sofre diminuição no segundo período, com uma redução de 36% estatisticamente significativa (P=0,001).

O aspecto mais importante dos resultados obtidos para se refere à verificação de que, de fato, níveis de desmatamento mais elevados podem provocar alterações (estatisticamente significativas) na precipitação de uma bacia.

Tal constatação se mostra especialmente relevante por apresentar a evidência com dados reais de campo de que as previsões de cenários futuros obtidos por diversas simulações numéricas, quanto à tendência de decréscimo na chuva como resultado de desmatamento em larga-escala, pode já estar ocorrendo. Ou seja, os resultados aqui apresentados apontam para um quadro mais alarmante, de que tal fenômeno pode não ser uma mera possibilidade em um quadro de desmatamento futuro, mas uma realidade de um

quadro de desmatamento atual, se não em escala regional, ao menos para uma bacia de grande dimensão que já apresenta uma situação de desmatamento muito alto tanto em termos de extensão quanto em termos de percentual da área da bacia.

#### Referências

- Andréassian, V., 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. Journal of Hydrology 291, 1-27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.015
- Beck, H. E., Bruijnzeel, L. A., van Dijk, A. I. J. M., McVicar, T. R., Scatena, F. N., Schellekens, J., 2013. The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. Hydrology and Earth System Sciences 17, 2613-2635. DOI: 10.5194/hessd-10-3045-2013
- Bruijnzeel, L. A., 1990. Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of knowledge review. UNESCO, Paris.
- Coe, M.T., Costa, M.H., Soares Filho, B.S., 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River Land surface processes and atmospheric feedbacks. Journal of Hydrology 369, 165-174. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.02.043
- Costa, M. H., Yanagi, S.N.M., Souza, P.J.O.P., Ribeiro, A., Rocha, E.J.P., 2007. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. Geophysical Research Letter 34, 1-4. DOI:10.1029/2007GL029271
- Costa, M.H., Botta, A., Cardille, J.A., 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. Journal of Hydrology 283, 206-217. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00267-1
- Costa, M.H., Foley, J.A., 2000. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO2 concentrations on the climate of Amazonia. Journal of Climate 13, 18-34. http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0018:CEODAD>2.0.CO;2
- D'Almeida, C., Vörösmarty, C. J., Hurtt, G. C., Marengo, J. A., Dingman, S. L., Keim, B. D., 2007. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. International Journal of Climatology 27, 633-647. DOI:10.1002/joc.1475.
- Fearnside, P., 1990. Environmental destruction in the Amazon, in: Goodman, D., Hall, A. (Eds.), The Future of Amazonia: Destruction or

- Sustainable Development?. MacMillan, London, pp. 179-225.
- Feng, X.M., Sun, G., Fu, B.J., Su, C.H., Liu, Y., Lamparski, H., 2012. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China. Hydrology and Earth System Sciences 16, 2617-2628. DOI:10.5194/hess-16-2617-2012
- Gao, G., Fu, B., Wang, S., Liang, W., Jiang, X., 2016. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. Science of the Total Environment 557-558, 331-342. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.0
- Guo, J., Su, X., Singh, V.P, Jin, J., 2016. Impacts of Climate and Land Use/Cover Change on Streamflow Using SWAT and a Separation Method for the Xiying River Basin in Northwestern China. Water 8, 1-14. DOI:10.3390/w8050192
- Hardjono, H.W., 1980. Influence of a permanent vegetation cover on streamflow. In: Proceedings Seminar on Watershed Management, Development and Hydrology 3, 280-297.
- Hecht, S., Norgard, R., Possio, G., 1988. The economics of cattle ranching in eastern Amazonia. Interciencia 13, 233-40.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015. Projeto Prodes: Monitoramente da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite Disponível: http://www.obt.inpe.br/prodes/. Acesso: 03 ago. 2015.
- Liang, W., Bai, D., Wang, F.Y., Fu, B.J., Yan, J.P., Wang, S., Yang, Y.T., Long, D., Feng, M.Q., 2015a. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. Water Resources Research 51, 6500-6519. DOI:10.1002/2014WR016589.
- Liang, W., Bai, D., Zhao, J., You, Y.C., Li, J.X., Yang, Y.T., 2015. A study on the streamflow change and its relationship with climate change and ecological restoration measures in a sediment concentrated region in the Loess Plateau. China. Water Resources Management 29, 4045-4060. DOI: 10.1007/s11269-015-1044-5
- Liu Z., Yao Z., Huang H., Wu S., Liu G., 2012. Land use and climate changes and their impacts on runoff in the Yarlung Zangbo river basin, China. Land Degradation & Development 25, 203-215. DOI:10.1002/ldr.1159.

- Marengo, J.A., Espinoza, J.C., 2015. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. International Journal of Climatology 36, 1033-1055. DOI: 10.1002/joc.4420
- Myers, N., 1986. Environmental repercussions of deforestation in the Himalayas. Journal of World Forest Resource Management 2, 63-72.
- Nobre, C.A., Sellers, P.J., Shukla, J., 1991. Amazonian deforestation and regional climate change. Journal of Climate 4, 957-988. http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2
- Peel, M., McMahon, T., and Finlayson, B., 2010. Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scale, Water Resources Research 46, 1-16. DOI:10.1029/2009WR008233.
- Petchprayoon, P., Blanken, P.D., Ekkawatpanit, C., Husseinc, K., 2010. Hydrological impacts of land use/land cover change in a large river basin in central—northern Thailand. International Journal of Climatology 30, 1917-1930. DOI: 10.1002/joc.2131
- Sahin, V., Hall, M.J., 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields. Journal of Hydrology 178, 293-309. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02825-0
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M.H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B.S., Cardoso, M., 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. Geophysical Research Letter 34, 1-7. DOI:10.1029/2007GL030612
- Thiessen, A. H., 1911. Precipitation averages for large areas. Monthly Weather Review 39, 1082-1084. DOI:10.1175/1520-0493(1911) 39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2.
- Van Dijk, A.I.J.M., Pena-Arancibia, J.L., Bruijnzeel, L.A., 2012. Land cover and water yield: inference problems when comparing catchments with mixed land cover. Hydrology and Earth System Sciences 16, 3461-3473. DOI:10.5194/hess-16-3461-2012
- Wang, S., Zhang, Z., McVicar, T.R., Guo, J., Tang, Y., Yao, A., 2013. Isolating the impacts of climate change and land use change on decadal streamflow variation: assessing three complementary approaches. Journal of Hydrology 507, 63-74. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.018
- Wang, S., Zhang, Z., Sun, G., McNulty, S.G., Zhang, M., 2009. Detecting water yield variability due to the small proportional land use and land cover changes in a watershed on the Loess Plateau, China. Hydrological Processes 23, 3083-3092. DOI: 10.1002/hyp.7420

- Zhang, L., Dawes, W. R., Walker, G. R., 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Technical Report. 99/12, Cooperative Research Center for Catch. Hydrology, Canberra, ACT.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resources Research 37, 701-708. DOI: 10.1029/2000WR900325
- Zhang, L., Zhao, F.F., Chen, Y., Dixon, R.N.M., 2011. Estimating effects of plantation expansion and climate variability on streamflow for catchments in Australia. Water Resources Research 47, 1-13.

- http://dx.doi.org/10.1029/2011WR010711.
- Zhang, X., Zhang, L., Zhao, J., Rustomji, P., Hairsine, P., 2008. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. Water Resources Research 44, 1-12. DOI:10.1029/2007WR006711
- Zhou, G.Y., Wei, X.H., Chen, X.Z., Zhou, P., Liu, X.D., Xiao, Y., Sun, G., Scott, D.F., Zhou, S.D., Han, L.S., Su, Y.X., 2015. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. Nature Communications 6, 1-9. DOI:10.1038/ncomms6918.