

IMPACTO DAS MUDANÇAS DA COBERTURA VEGETAL NO ESCOAMENTO: REVISÃO

Carlos E. M. Tucci, Robin T. Clarke

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500
91501-970 Porto Alegre / RS*

RESUMO

As modificações naturais e artificiais na cobertura vegetal das bacias hidrográficas influenciam o seu comportamento hidrológico. Essas alterações produzem os mais variados impactos sobre o meio ambiente e a disponibilidade dos recursos hídricos.

Esse artigo revisa o conhecimento científico sobre o assunto e descreve os principais impactos do uso do solo sobre o escoamento.

Os estudos experimentais existentes mostram claramente que existe aumento do escoamento médio com o desmatamento em pequenas bacias hidrográficas bacias rurais, no entanto não existem resultados consistentes sobre médias e grandes bacias.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e a expansão das fronteiras agrícolas produziram alterações significativas na superfície e no uso do solo rural em países em desenvolvimento como o Brasil. O impacto dessas alterações tem sido discutido muito mais dentro de uma avaliação qualitativa do que quantitativa, já que o número de combinações entre as diferentes condições de clima, cobertura, solo, geologia e outros fatores são numerosas para permitir uma real estimativa dos impactos sobre o escoamento, produção de sedimentos e qualidade da água. A estimativa dos modelos matemáticos disponíveis normalmente não são confiáveis, devido a incerteza e empirismo dos parâmetros desses modelos. Mesmo quando os modelos matemáticos são utilizados para estimar os efeitos de mudanças, é sempre necessário comparar e confirmar as previsões obtidas

através desses modelos com observações no campo, sempre que possível.

Nesse estudo é apresentada uma revisão dos elementos quantitativos e indicadores existentes na literatura sobre o efeito da alteração da cobertura vegetal sobre o escoamento.

PROCESSOS DO CICLO HIDROLÓGICO TERRESTRE

Ciclo global

O ciclo da água no globo é acionado pela energia solar. Esse ciclo retira água dos oceanos através da evaporação da superfície do mar e da superfície terrestre. Anualmente cerca de $5,5 \cdot 10^5 \text{ km}^3$ de água é evaporada, utilizando 36% de toda a energia solar absorvida pela Terra, cerca de $1,4 \cdot 10^{24}$ joules por ano (IGBP, 1993). Essa água entra no sistema de circulação geral da atmosfera que depende das diferenças de absorção de energia (transformação em calor) e da reflectância entre os trópicos e as regiões de maior latitude, como as áreas polares. Em média, cerca de $5 \cdot 10^9 \text{ MW}$ é transportado dos trópicos para as regiões polares em cada hemisfério.

O sistema de circulação da atmosfera é extremamente dinâmico e não-linear, dificultando sua previsão quantitativa. Esse sistema cria condições de precipitação pelo resfriamento do ar úmido que formam as nuvens gerando precipitação na forma de chuva e neve (entre outros) sobre os mares e superfície terrestre. A água evaporada se mantém na atmosfera, em média apenas 10 dias.

O fluxo sobre a superfície terrestre é positivo (precipitação menos evaporação),

resultando nas vazões dos rios em direção aos oceanos. O fluxo vertical dos oceanos é negativo, com maior evaporação que precipitação. O volume evaporado adicional se desloca para os continentes através do sistema de circulação da atmosfera e precipita, fechando o ciclo. Em média, a água importada dos oceanos é reciclada cerca de 2,7 vezes sobre a terra através do processo precipitação-evaporação, antes de escoar de volta para os oceanos (IGBP, 1993).

Esse ciclo utiliza a dinâmica da atmosfera e os grandes reservatórios de água, que são os oceanos ($1.350 \cdot 10^5 \text{ m}^3$), as geleiras ($25 \cdot 10^5 \text{ m}^3$) e os aquíferos ($8,4 \cdot 10^5 \text{ m}^3$). Os rios e lagos, biosfera e atmosfera possuem volumes insignificantes se comparados com os anteriores.

Descrição dos processos hidrológicos na bacia

Os processos hidrológicos na bacia hidrográfica possuem duas direções predominantes de fluxo na bacia: vertical e longitudinal. O vertical é representado pelos processos de precipitação e evapotranspiração e o longitudinal pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo).

O balanço de volumes na bacia depende inicialmente dos *processos verticais*. Na Figura 1 observa-se que, da radiação solar que atinge a superfície da terra, parte é refletida e parte é absorvida. A proporção entre a energia refletida e a total é o albedo, que depende do tipo de superfície. Por exemplo, o albedo de uma superfície líquida é da ordem de 5-7%; enquanto que o de uma superfície como uma floresta tropical é cerca de 12%; para pasto e uso agrícola esta variável está entre 15 e 20% (Bruijnzeel, 1990). O albedo também varia sazonalmente ao longo do ano devido a declinação solar e dentro do dia devido a radiação solar. Essas condições variam com a latitude.

A vegetação tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água. A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação; quanto maior for a superfície de folhagem, maior a área de retenção da água durante a precipitação. Esse volume retido é evaporado assim que houver capacidade potencial de evaporação. Quando esse volume, retido pelas plantas, é totalmente evaporado, as plantas passam a perder umidade para o ambiente através da transpiração. A planta retira essa unidade do solo através de suas raízes. A evapotranspiração (evaporação + transpiração) de florestas tropicais que raramente tem déficit de umidade do solo, é, em média, 1.415 mm (1310-1500mm). Esse valor pode cair para 900 mm se houver períodos de déficit hídrico (Druijnzeel, 1990). A transpiração em florestas tropicais é da ordem de 70% desses valores.

A precipitação atinge o solo por (Figura 2): (i) atravessando a vegetação da floresta (em média 85% da precipitação incidente) ou; (ii) através dos troncos (1 a 2% da precipitação). A diferença é a interceptação. Na Reserva Duke em Manaus 8,9% da precipitação é interceptada pela vegetação, enquanto que na Reserva Jarú a interceptação é de 12% e na Reserva da Vale do Rio Doce 13% sendo 65% no período seco e 1% no período úmido (Ubarana, 1996).

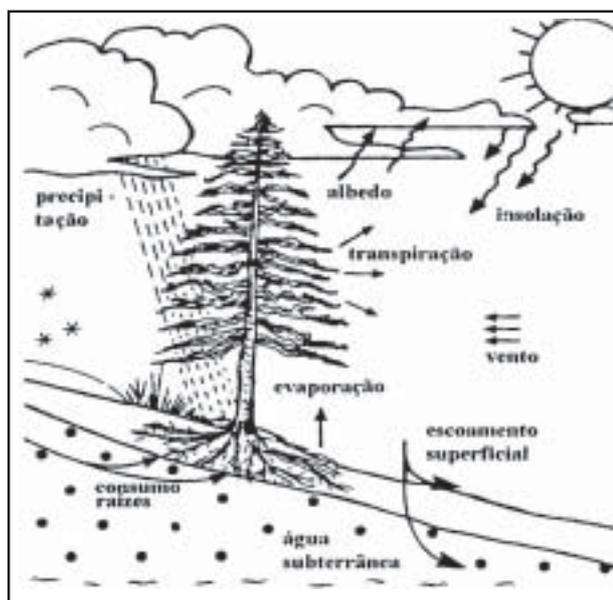


Figura 1. Processos Verticais (IGBP, 1993).

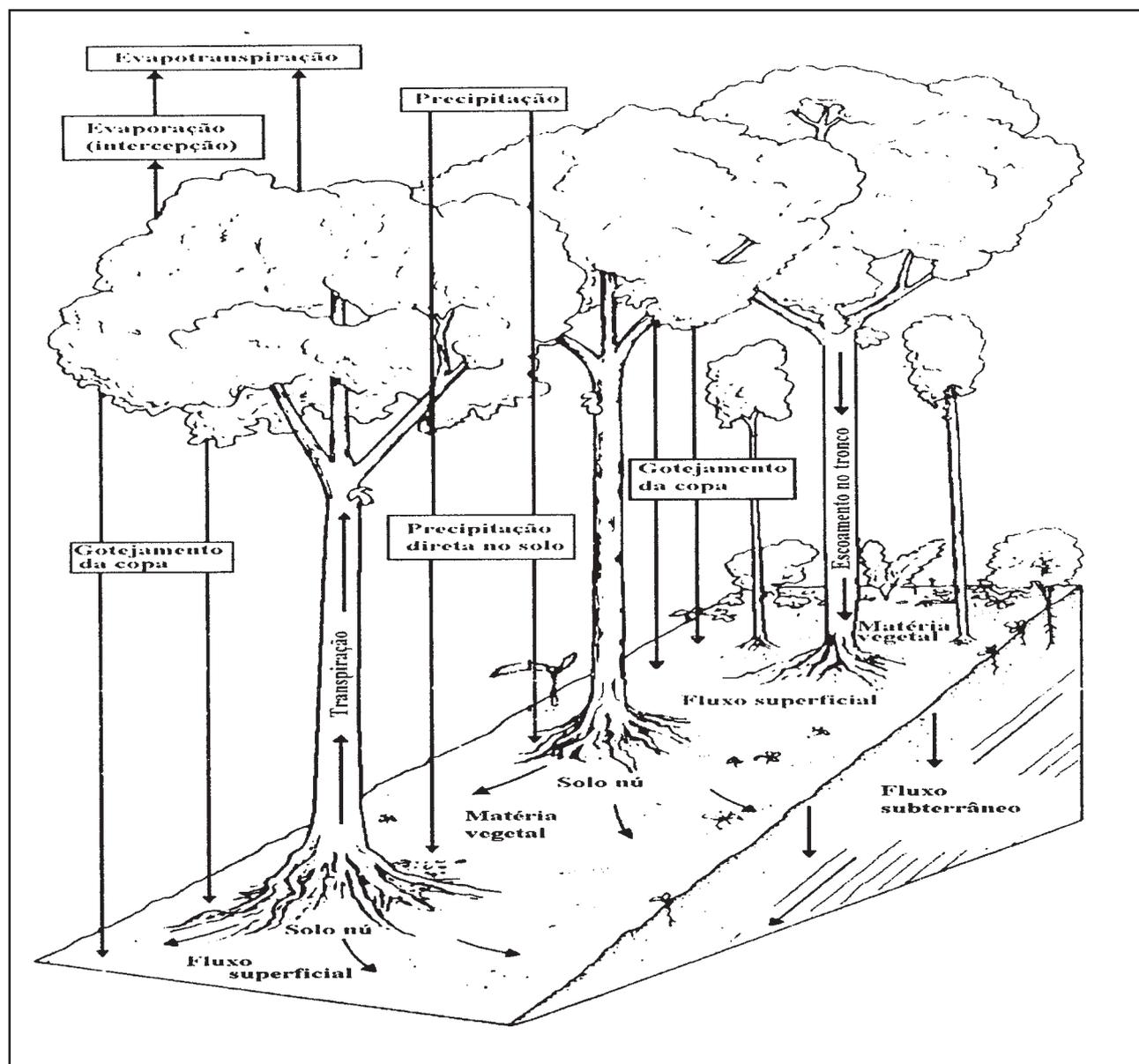


Figura 2. Interceptação vegetal (Bruijnzeel, 1990).

Da parcela de precipitação que atinge o solo a mesma pode infiltrar ou escoar superficialmente dependendo da capacidade do solo em infiltrar. Essa capacidade depende de condições variáveis, como a quantidade de umidade já existente, das características do solo e da sua cobertura. A água que infiltra, pode percolar para o aquífero ou gerar um escoamento sub-superficial ao longo dos canais internos do solo, até a superfície ou um curso d'água. A água que percola até o aquífero é armazenada e transportada até os

rios, criando condições para manter os rios perenes nos períodos de longa estiagem. Em bacias onde a capacidade da água subterrânea é pequena, com grandes afloramentos de rochas e alta evaporação, os rios não são perenes, como na região de cristalino do Nordeste.

A capacidade de infiltração depende do tipo e do uso do solo. Normalmente, a capacidade de infiltração de solos com floresta é alta (Pritchett, 1979), o que produz pequena quantidade de escoamento superficial. Para

solos com superfície desprotegida que sofre a ação de compactação, a capacidade de infiltração pode diminuir dramaticamente, resultando em maior escoamento superficial. Por exemplo, estradas, caminhos percorridos pelo gado sofrem forte compactação que reduz a capacidade de infiltração, enquanto o uso de maquinário agrícola para revolver o solo durante o plantio pode aumentar a infiltração. De outro lado, essa mesma capacidade de infiltração varia com o tipo de solo e com suas condições de umidade. Um solo argiloso pode ter uma alta capacidade de infiltração quando estiver seco, no entanto, após receber umidade pode se tornar quase que impermeável.

Existe uma camada do solo não saturada, onde ocorre infiltração e percolação e outra saturada onde ocorre armazenamento e escoamento subterrâneo. Na camada não-saturada podem existir condições de escoamento que dependem de vários fatores físicos. Na Figura 3b pode-se observar o escoamento dito "Hortoniano", onde o escoamento superficial é gerado em toda superfície (para capacidade de infiltração menor que a precipitação) e o escoamento sub-superficial escoo até o rio. No entanto, existem áreas onde praticamente não ocorre escoamento superficial (Figura 3a), toda a precipitação se infiltra, tendo um significativo escoamento sub-superficial que é transportado através de macroporos, que pode aparecer na superfície através de fontes, produzindo escoamento superficial em conjunto com a precipitação local.

O escoamento superficial converge para os rios que formam a drenagem principal das bacias hidrográficas. O escoamento em rios depende de várias características físicas tais como a declividade, rugosidade, seção de escoamento e obstruções ao fluxo. Os rios tendem a moldar dois leitos, o leito menor, onde escoo na maior parte do ano e o leito maior, que o rio ocupa durante algumas enchentes. Quando o leito não é rochoso, as enchentes que ocorrem ao longo dos anos geralmente moldam um leito menor de acordo com a freqüência das vazões. O tempo de

retorno da cota correspondente à definição do leito menor está entre 1,5 e 2 anos.

Como se observa dessa breve descrição, a interface entre solo-vegetação-atmosfera tem uma forte influência no ciclo hidrológico. Associados aos processos naturais, já complexos, existe também a ação humana que age sobre esse sistema natural.

A maior dificuldade em melhor representar os processos hidrológicos, nas interfaces mencionadas é a grande heterogeneidade dos sistemas envolvidos, ou seja a grande variabilidade do solo e cobertura vegetal, além da própria ação do homem.

ALTERAÇÕES DE USO E MANEJO DO SOLO

Características e classificação das alterações

A alteração da superfície da bacia tem impactos significativos sobre o escoamento. Esse impacto normalmente é caracterizado quanto ao efeito que provoca no comportamento das enchentes, nas vazões mínimas e na vazão média.

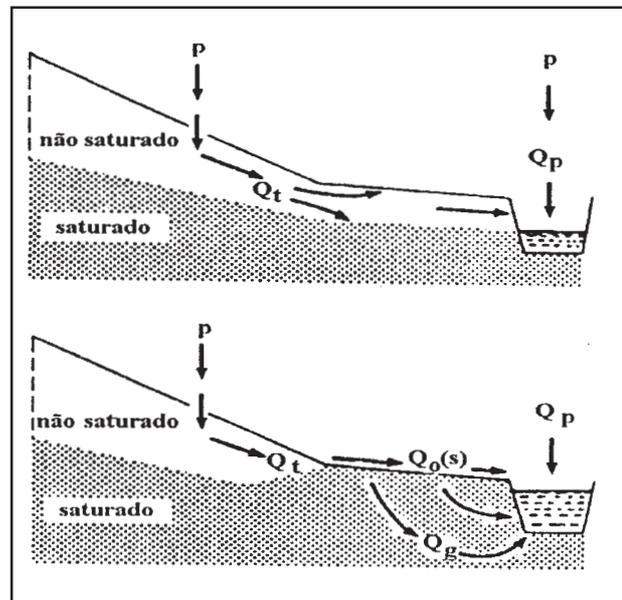


Figura 3. Escoamentos na bacia (a) áreas de infiltração e escoamento sub-superficial (b) processos hortonianos (Bruijnzeel, 1990).

As alterações sobre o uso e manejo do solo da bacia podem ser classificados quanto: (i) ao tipo de mudança; (ii) ao tipo uso da superfície ou; (iii) a forma de desmatamento. Na tabela 1 são apresentadas as principais classificações.

Tabela 1. Classificação sobre a mudança e uso do solo.

Classificação	tipo
Mudança da superfície	<ul style="list-style-type: none"> • desmatamento • reflorestamento • impermeabilização
O uso da superfície	<ul style="list-style-type: none"> • urbanização* • reflorestamento para exploração sistemática • desmatamento : extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas permanentes
Método de alteração	<ul style="list-style-type: none"> • queimada • manual • equipamentos

*tópico que não é abordado aqui

Desmatamento – O desmatamento é um termo geral para diferentes mudanças de cobertura. Segundo Bruijnzeel (1990) é necessário definir o desmatamento de acordo com o nível de alteração que ocorre na área. Jordan (1985) definiu em pequeno, intermediário e alto, de acordo com o impacto que produz na mata natural.

Os principais elementos do desmatamento são: o tipo de cobertura no qual a floresta é substituída e o procedimento utilizado para o desmatamento.

Extração seletiva de madeira – A extração de madeira envolve a construção de estrada e retirada por equipamentos de árvores ao longo da floresta natural ou reflorestada. O maior impacto sobre esse sistema envolve a construção de estradas, devido a área envolvida e a capacidade erosiva gerada pela superfície desprotegida.

O plantio de subsistência (*Shifting Cultivation*) – esse tipo de uso do solo representa cerca de 35% de todo o desmatamento de floresta na América Latina (Bruijnzeel, 1990). O desmatamento é realizado manualmente seguido por queimada antes do período chuvoso e depois o plantio sobre as cinzas. Após alguns anos, a produtividade diminui, a área é abandonada e o agricultor se desloca para outra área.

Quando ocorre o desmatamento sobre uma determinada área, que a seguir tende a recuperar a sua cobertura, o impacto sobre o balanço hídrico da área apresenta um comportamento como o apresentado na Figura 4. Num primeiro estágio ocorre aumento na vazão média, com redução da evapotranspiração, devido a retirada da cobertura. Com o crescimento da vegetação (Figura 4 chega a cerca de 20 anos) o balanço tende a voltar as condições iniciais devido a recuperação das suas condições prévias.

Culturas permanentes – As culturas permanentes são plantações que não sofrem alterações frequentes na sua estrutura principal, como plantações de café, fruticultura, pasto, entre outros.

Durante o processo de transformação da cobertura, o impacto sobre o escoamento pode ser importante. Após o seu desenvolvimento o balanço hídrico depende do comportamento da cultura e o balanço hídrico tende a se estabelecer num outro patamar.

Os desmatamentos mencionados podem ser considerados de intensidade pequena ou intermediária, de acordo com as condições de alteração de cada caso. No entanto, o impacto é grande quando o desmatamento dá origem a culturas anuais. De acordo com a Figura 4 pode-se esperar que o impacto do desmatamento é reduzido com o tempo e volta para as condições preexistentes, o que não é o caso da alteração para culturas anuais (Bruijnzeel, 1990).

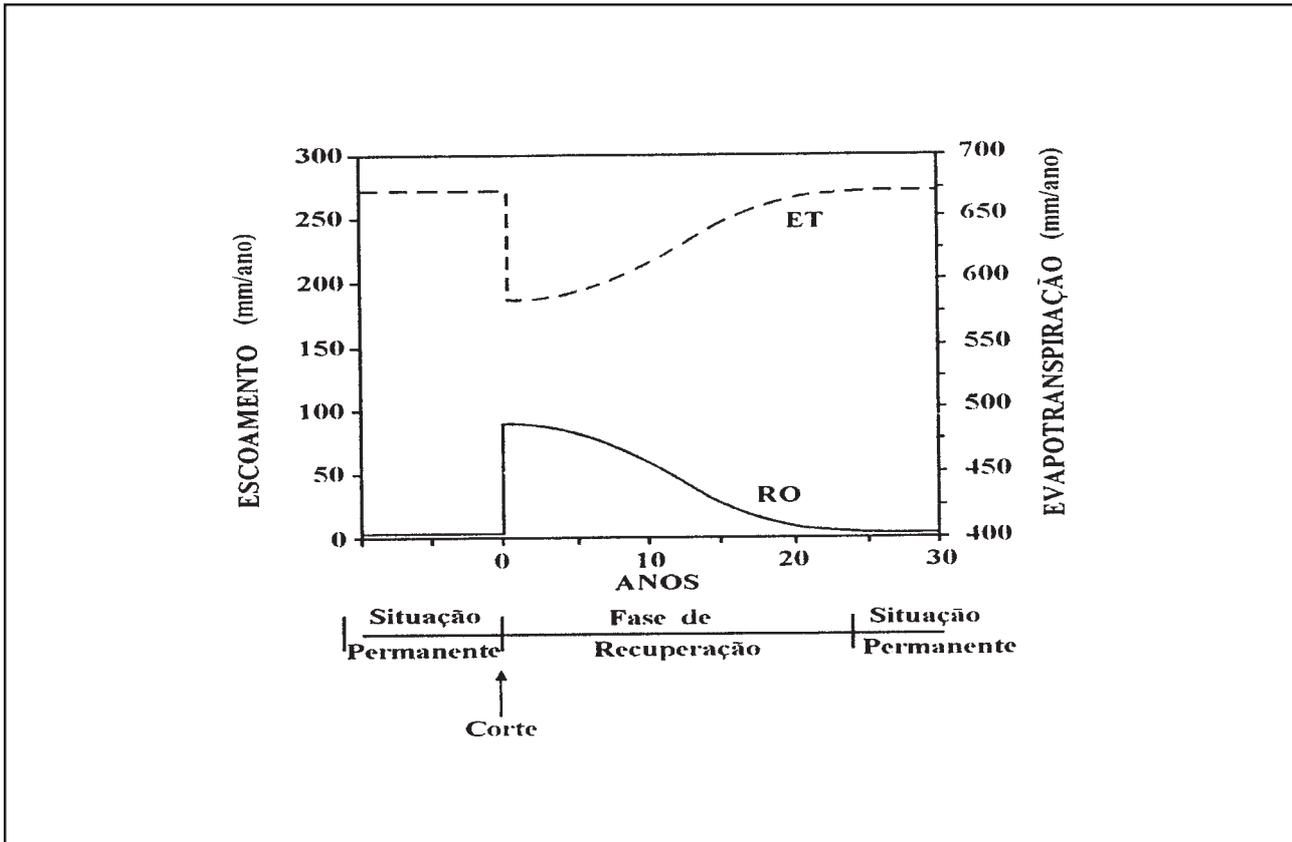


Figura 4. Modificações no escoamento e evapotranspiração devido ao desmatamento numa bacia no sul da África (Vörösmarty et al, 1991).

Culturas anuais – As culturas anuais envolvem a mudança da cobertura anualmente ou sazonalmente com diferentes plantios. Esse processo envolve a preparação do solo (aragem) em determinadas épocas do ano, resultando na falta de proteção do solo em épocas que podem ser chuvosas. Normalmente o preparo do solo é realizado antes do período chuvoso, no entanto na região Sul do Brasil não existe uma sazonalidade bem definida, podendo num determinado mês ter uma grande precipitação ou um período seco, o solo pode estar sujeito a energia do impacto de chuvas intensas que tendem a produzir erosão e modificar as condições de infiltração do solo.

O uso do solo para plantio anual, após o desmatamento, depende muito do preparo do solo e dos cuidados com o escoamento gerado. O plantio sem nenhum cuidado com a conservação do solo tende a aumentar

consideravelmente a erosão, com grande aumento no escoamento com relação as condições prévias de floresta. Adicionalmente, as estradas e as divisas de propriedades são geradores de alterações do solo devido a erosão e a compactação que se forma.

Atualmente, as práticas geralmente recomendadas para plantio são:

- I. Conservacionistas, que utiliza o terraceamento, que acompanha as curvas de nível, para direcionar o escoamento e evitar a erosão e o dano às culturas. Esse tipo de plantio tende a criar melhores condições para a infiltração, nas chuvas de baixa ou média intensidade, mas quando ocorre o rompimento do terraço nas cheias maiores a água pode provocar ravinamento na direção da maior declividade do escoamento. Essa

prática tem sido acompanhada pelo planejamento de microbacia, que retira as divisas das propriedades, organizando o uso do solo de acordo com microbacias e planeja as estradas vicinais;

- II. O plantio direto tem sido incentivado. Esse tipo de plantio não revolve a terra e, é realizado diretamente sobre o que restou do plantio anterior. A tendência é de que praticamente toda a água se infiltre, e o escoamento ocorra predominantemente na camada sub-superficial. Esse tipo de plantio pode gerar problemas em áreas com grande declividade, pois o escoamento sub-superficial, ao brotar na superfície, pode gerar erosão regressiva (como o *piping*). Em declividades mais suaves a erosão é reduzida já que o escoamento superficial é mínimo. O plantio direto produz uma maior regularização sobre o fluxo de estiagem e tende a apresentar também aumento de escoamento médio, se comparado com a floresta, devido a redução da evapotranspiração e interceptação. A tendência é que a substituição da floresta por plantio com prática conservacionista, também apresente aumento do escoamento médio, mas podendo reduzir o escoamento durante as estiagens, dependendo das características do solo e aquífero.

Método de desmatamento – a forma como o desmatamento é realizado influencia as condições de escoamento futuro da bacia. Dias e Nortcliff (1985) encontraram uma importante correlação entre o número de tratores utilizados no desmatamento e o grau de compactação do solo após o desmatamento.

O desmatamento manual é o procedimento mais dispendioso, mas provoca o menor impacto. Lal (1981) mostrou que os aumentos do escoamento superficial, utilizando desmatamento manual, uso de

tratores de arraste e tratores com lâminas para arado são, respectivamente, 1%, 6,5% e 12% da precipitação. O efeito da compactação do solo limita-se a profundidades de cerca de 20 cm (Dias e Nortcliff, 1985).

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO DESMATAMENTO

Segundo McCulloch e Robinson (1993) os estudos experimentais em bacias utilizados para avaliar o impacto das suas modificações físicas podem ser classificados em três grupos principais:

- I. **Estudos de correlação:** análise de correlação entre bacias de diferentes características de clima, cobertura, solo e morfologia. Este tipo de procedimento nem sempre permite uma clara estimativa dos processos envolvidos;
- II. **Estudos de uma única bacia:** para uma bacia experimental busca-se estabelecer a relação entre as condições prévias a mudança e após a mesma. Considerando a climatologia e o comportamento da bacia. Após a alteração da cobertura e uso do solo, são examinadas nas relações hidrológicas. A maior dificuldade desse procedimento reside na variabilidade climática entre os dois períodos (antes e depois da alteração da cobertura). Um período pode ser seco e o outro úmido, o que dificulta a comparação. No entanto, é possível planejar experimentos sobre os efeitos de desmatamento de modo a eliminar estas diferenças, mas a complexidade aumenta muito;
- III. **Estudos experimentais com pares de bacias:** Selecionando duas bacias de características similares. Uma é submetida a alteração do uso do solo, denominada de *experimental* e outra é mantida preservada denominada de bacia de *controle*.

Os primeiros estudos experimentais sobre alteração do uso do solo ocorreram nos Estados Unidos na década de 10. As medidas começaram em 1911 e se desenvolveram por 15 anos, numa bacia onde a maioria da precipitação era devido a neve (Bates e Henry, 1928, apud McCulloch e Robinson, 1993). Depois desse período foram elaborados vários experimentos em diferentes partes do mundo e existem algumas publicações que reuniram de forma sistemática os mesmos. Uma das primeiras foi devido a Hibbert (1967) (apud Bosch e Hewlett, 1982), complementado por Bosch e Hewlett (1982). Mais recentemente Bruijnzeel (1990) e Sahin e Hall (1996) atualizaram os artigos anteriores. Esses resultados englobam o efeito dos diferentes tipos de alteração e seus resultados. No entanto, como os objetivos desse trabalho são os de avaliar o impacto sobre o escoamento, os elementos aqui descritos se resumem a esse aspecto.

ALTERAÇÕES DA PRECIPITAÇÃO DEVIDO AO DESMATAMENTO

Com a retirada da floresta, os fluxos envolvidos no ciclo hidrológico se alteram, ocorrendo o seguinte:

- aumento do albedo. A floresta absorve maior radiação de onda curta e reflete menos;
- maiores flutuações da temperatura e déficit de tensão de vapor das superfícies das áreas desmatadas;
- o volume evaporado é menor devido a redução da interceptação vegetal pela retirada da vegetação das árvores;
- menor variabilidade da umidade das camadas profundas do solo, já que a floresta pode retirar umidade de profundidades superiores a 3,6 m, enquanto que a vegetação rasteira como pasto age sobre profundidades de cerca de 20 cm.

Com a redução da evaporação, pode-se esperar um efeito na precipitação, mas o

sistema climatológico local depende muito pouco da evaporação da superfície da área. Quando a precipitação local é dependente principalmente dos movimentos de massas de ar globais, o efeito da alteração da cobertura é mínimo. Mooley e Parthasarathy (1983) examinaram a tendência de valores acima ou abaixo da precipitação média, entre os anos 1871 e 1980, para 306 estações na Índia, e não encontraram nenhuma evidência estatística de alteração de tendência, apesar das áreas cobertas pelos postos, terem sofrido grande desmatamento ao longo dos anos mencionados.

Vários ensaios com modelos GCM (Global Climate Models) têm sido realizados sobre o comportamento da Amazônia. Esses modelos têm estudado a hipótese de retirada total da floresta e substituição pelo pasto (Nobre *et al.*, 1991). Os resultados com esses modelos têm previsto redução de até 50% na evapotranspiração e 20% na precipitação. Isso se deve a grande dependência que a região pode ter do ciclo interno de evaporação e precipitação (Dickison e Henderson-Sellers, 1988) e também devido as grandes incertezas na modelagem. Segundo Shuttleworth *et al* (1990) esses resultados devem ser vistos com muito cuidado, ou seja são especulações sobre o comportamento dessa região.

Bruijnzeel (1996) cita a revisão realizada por Meher-Homji (1989) em que menciona vários artigos que buscam mostrar evidências circunstanciais de redução de precipitação associada ao desmatamento. No entanto o autor menciona que nesses estudos não foram realizados estudos estatísticos consistentes. Segundo McCulloch e Robinson (1993) não existe nenhuma evidência de que plantando ou retirando uma floresta afete a precipitação.

IMPACTO DO DESMATAMENTO SOBRE O ESCOAMENTO

O efeito do desmatamento sobre o escoamento deve ser separado de acordo

com o efeito sobre a: (i) vazão média; (ii) vazão mínima e; (iii) vazões máximas.

Antes de analisar o impacto em cada uma das estatísticas do escoamento, é necessário caracterizar os principais aspectos que influenciam as alterações no escoamento, que são os seguintes:

Diferenças de estado de umidade do solo - Na condição em que a bacia está com floresta, a disponibilidade de atendimento da evapotranspiração, depende essencialmente da umidade do solo. Hodnett et al (1995) mostraram que na Amazônia, a variação sazonal da umidade do solo em profundidades superiores a 2 m, é mais acentuada na floresta porque as árvores retiram umidade a profundidades superiores a 3,6 m.

Na Figura 5 é apresentada a variabilidade de umidade do solo para uma área coberta de floresta e para área desmatada, coberta por vegetação rasteira. Pode-se observar, que a umidade do solo depleciona muito mais quando existe floresta, devido a capacidade da mesma em retirar umidade do solo em profundidades maiores e pela transpiração das plantas.

Climatologia sazonal - A distribuição da precipitação ao longo do ano e sua intensidade, permitem estabelecer se existirá disponibilidade de água para evapotranspirar. Numa região com precipitações concentradas numa parte do ano, por exemplo no período mais frio, tende a evapotranspirar menos porque a evapotranspiração potencial é menor e as diferenças de desmatamento serão menos acentuadas. No entanto, numa região com precipitações distribuídas ao longo do ano e concentradas no verão, a retirada da floresta tende a produzir maior impacto no escoamento, já que no período de maior evapotranspiração potencial, existe disponibilidade de água tanto na interceptação da vegetação quanto no solo, como na região Sudeste.

Diferenças de elevação - A elevação afeta a evaporação pelas características de incidência solar e velocidade do vento.

Profundidade do solo e declividade do solo - Solos com pequena profundidade, influenciam menos no processo devido a sua pequena capacidade. A declividade maior produz maior drenagem da água, fazendo com que a umidade do solo seja pouco utilizada na regulação dos volumes de evapotranspiração da vegetação. Quando a profundidade do solo é pequena e a declividade grande, a tendência é de que, as diferenças entre um estágio e outro, da cobertura, sejam menores.

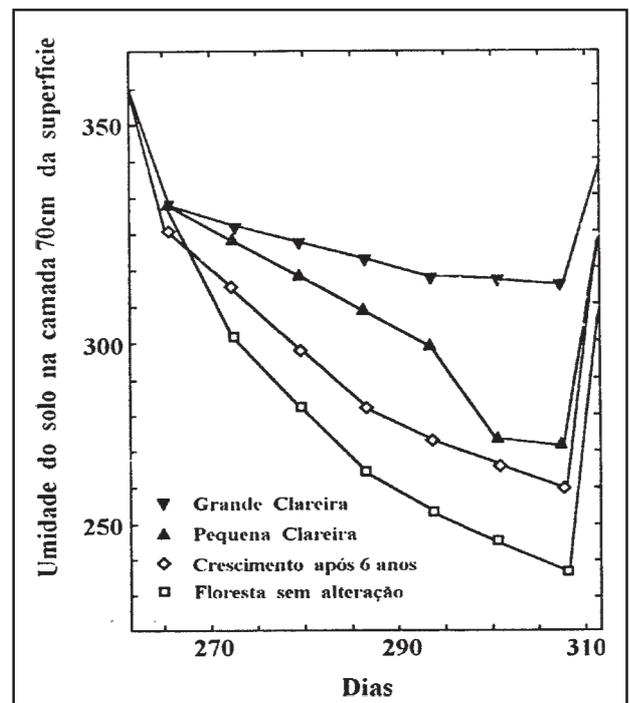


Figura 5. Umidade do solo (mm/70cm) numa floresta sem alterações, com crescimento de 6 anos em clareiras estreitas ou largas durante a temporada seca na Costa Rica (Parker, 1985, apud Bruijnzeel, 1996).

Grau de alteração devido ao método de desmatamento - O grau de alteração do solo devido ao método de desmatamento afeta as condições do solo, resultando em maior ou menor escoamento superficial.

O grau de desmatamento da bacia – A área de desmatamento com relação a seção principal (seção que define a bacia hidrográfica) e a percentagem de desmatamento, são fatores que obviamente influenciam o escoamento. Quanto mais próximo da seção principal, maior é o efeito observado no escoamento.

A cobertura que substitui a floresta ou a vegetação natural – Quando a vegetação se recupera, após vários anos o escoamento tende a retornar as condições anteriores, no entanto se as mudanças são permanentes para, por exemplo, culturas anuais, o efeito do desmatamento se mantém.

Vazões médias

Inicialmente Hibbert (1967), apud Bosch e Hewlett (1982) avaliaram o resultado de 39 bacias experimentais existentes no mundo e concluíram o seguinte:

- a redução da cobertura de floresta aumenta a vazão média;
- o estabelecimento de cobertura florestal em áreas de vegetação esparsa diminui a vazão média;
- a resposta à mudança é muito variável e, na maioria das vezes, não é possível prever.

Bosch e Hewlett (1982) atualizaram o estudo anterior utilizando 94 bacias, adicionando dados de 55 bacias experimentais. O tamanho médio das bacias experimentais utilizadas para verificar a alteração da vazão média foi de 80 ha, variando entre 1 ha e 2.500 ha. Os autores classificaram os dados em:

- bacias experimentais tratadas em pares como os que podem produzir melhores resultados já que tem o mesmo tipo de clima na comparação e;
- grupo onde as bacias que não possuem o controle climático, ou seja a comparação não é realizada sobre o mesmo período hidrológico; bacias em

que foi observado desmatamento e analisado o seu impacto ou; bacias grandes com experimentos pouco controlados.

Os resultados da análise principalmente do primeiro grupo de dados são resumidos a seguir:

- a. foram confirmadas as duas primeiras conclusões de Hibbert, mas os elementos existentes permitem estimar somente a ordem de magnitude das alterações com base no tipo de vegetação e na precipitação (Figura 5);
- b. não é possível detectar influência na vazão média quando o desmatamento é menor que 20%;
- c. a retirada de cobertura de coníferas ou eucaliptos causa aumento de cerca de 40 mm na vazão anual para cada 10% de alteração de cobertura, enquanto que a retirada da rasteira produz aumento de 25 e 10 mm na vazão média, respectivamente, para cada 10% de alteração de cobertura. Esses valores são aproximados e devem ser utilizados como indicadores.

Bruijnzeel (1990) atualizou o estudo de Bosch e Hewlett acrescentando os dados até a data da publicação. As principais conclusões do autor foram as seguintes:

- a. Confirma as conclusões de Bosch e Hewlett que a retirada da floresta natural resulta em considerável aumento inicial de vazão média (até 800 mm/ano), função da precipitação;
- b. A vazão média, após o crescimento da nova vegetação, pode ficar acima das condições de pré-desmatamento no caso de culturas anuais, vegetação rasteira e plantação de chá e retornar as condições naturais para pinos e reduzir a vazão para eucaliptos.

O autor comenta o pequeno número de experimentos que mostre a conversão de floresta em culturas anuais, que é o de maior impacto quanto a substituição da cobertura

natural. Esse também é o caso mais freqüente da bacia incremental de Itaipu.

Edwards (1979) apresenta os resultados de duas pequenas bacias na Tanzânia, uma com floresta e outra convertida para agricultura tradicional um pouco antes do início das observações. O autor observou um consistente aumento de 400 mm/ano durante os dez anos de observações. As principais características do experimento são: iniciado em 1958; floresta de montanha a 2.500 m; 1 metro de profundidade de solo vulcânico; precipitação de 1.925 mm, 6 meses com precipitação menor que 60 mm; a bacia com floresta tem 16,3 ha de área de drenagem e a bacia agrícola tem 20,2 ha; essa última é uma bacia agrícola com 50% de cultivo e 50% de vegetação rasteira.

Lal (1981) e Lawson et al (1981) apresentaram o resultado de duas bacias experimentais, uma delas subdividida em 12 áreas com diferentes tipos de desmatamento e a outra mantida sem modificação. Essas bacias estão localizadas em Ibadan na Nigéria. Na Tabela 2 são apresentadas as características das precipitações e as condições de interceptação da bacia florestada. Antes do desmatamento, a bacia produziu, durante 1974 a 1978 apenas 2,5% do escoamento, com relação a precipitação total. Em 1979, com os desmatamentos ocorridos na bacia de 34 ha, o escoamento passou para 23% da precipitação (deve-se considerar a diferença de precipitação entre os anos, que não foi informado nos artigos). Lal (1983) atualizou os resultados

apresentados anteriormente, incluindo os dados de 1979 a 1981. Na Tabela 4 são apresentados os resultados do ano de 1979 e para o período 1979-1981 para as pequenas áreas com diferentes tipos de tratamento do uso do solo, dentro da referida bacia. Pode-se observar que na área que foi mantida com floresta, praticamente não foi registrado escoamento. No entanto, de acordo com o sistema de desmatamento e preparo do solo, a produção de escoamento foi muito maior.

Tabela 3. Variáveis da área florestada para o ano de 1979 em Ibadan Nigéria (Lawson et al, 1981).

Variáveis	Resultados
Número de cheias	30
Total precipitado (mm)	645,1
Precipitação que atravessou a floresta (mm)	473,0
Água pelos troncos (stemflow) (mm)	64,4
Interceptação (mm)	107,7

Hsia e Koh (1983) apresentaram os resultados da comparação entre duas bacias experimentais no Taiwan. A bacia mantida desmatada tem 5,86 ha e a bacia mantida nas condições naturais tem 8,39 ha. As mesmas têm cerca de 40% de declividade, com precipitação anual de 2.100 mm (1.100 a 3.400mm). As bacias foram calibradas durante 7 anos. Na figura 6 é apresentada a relação de dupla massa entre os valores de

Tabela 4. Comparação de escoamento anual para diferentes tipos de práticas agrícolas (adaptado de Lal, 1981).

Tipo de desmatamento	Preparo ou tipo de plantio	Área das bacias ha	Escoamento anual mm/ano	
			1979	1979-1981
floresta sem alteração		16,0	0	
desmatamento tradicional	plantio direto	2,6	3,0	6,6
limpeza manual	sem preparo do solo	3,1	16,0	16,1
limpeza manual	preparo convencional	3,2	54,0	79,7
trator com lâminas	sem preparo	2,7	86,0	104,8
trator <i>tree-pusher</i>	sem preparo	3,2	153,0	170,0
trator <i>tree-pusher</i>	preparo convencional	4,0	250,0	330,6

escoamento das duas bacias, mostrando claramente o aumento de escoamento e mudança de tendência após o desmatamento. Os autores analisaram o aumento da vazão média sobre dois anos após o desmatamento. No primeiro ano a precipitação foi de

2.070 mm e no segundo, foi um ano seco com cerca de 1.500 mm. Os aumentos de vazão foram de 450 mm (58%) e 200 mm (51%) respectivamente para os dois anos. Considerando os períodos secos e úmidos o aumento foi de 108% e 193% para a estiagem dos dois anos, enquanto que no período úmido os aumentos foram de 55% e 47%. Na Figura 7 pode-se observar a comparação entre as duas bacias para os períodos úmido e seco.

Cornish (1993) apresentou o resultado de aumento da vazão média de 150 a 250 mm no primeiro ano após o desmatamento de eucaliptos de algumas bacias da Austrália. Hornbeck et al (1993) apresentaram os resultados de onze bacias no oeste americano, onde o desmatamento de florestas resultou em aumento de 110-250 mm no escoamento no primeiro ano após o desmatamento. Bruijnzeel (1996) agregou os dados desses experimentos e de outros em diferentes partes do mundo e relacionou com a percentagem de desmatamento (Figuras 8).

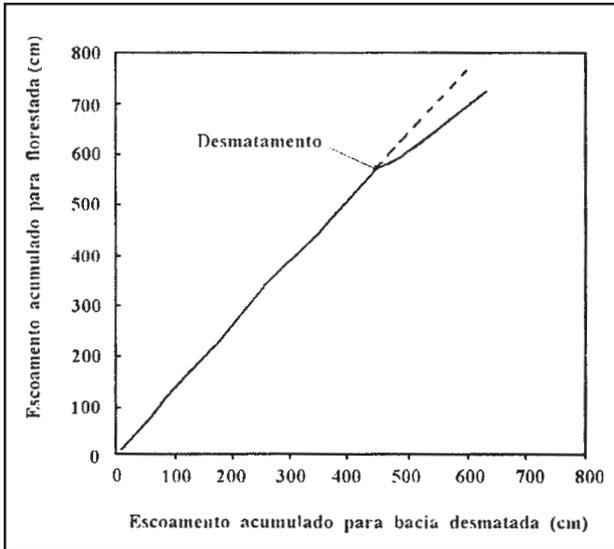


Figura 6. Identificação do desmatamento na relação de dupla massa (Hsia e Koh, 1983).

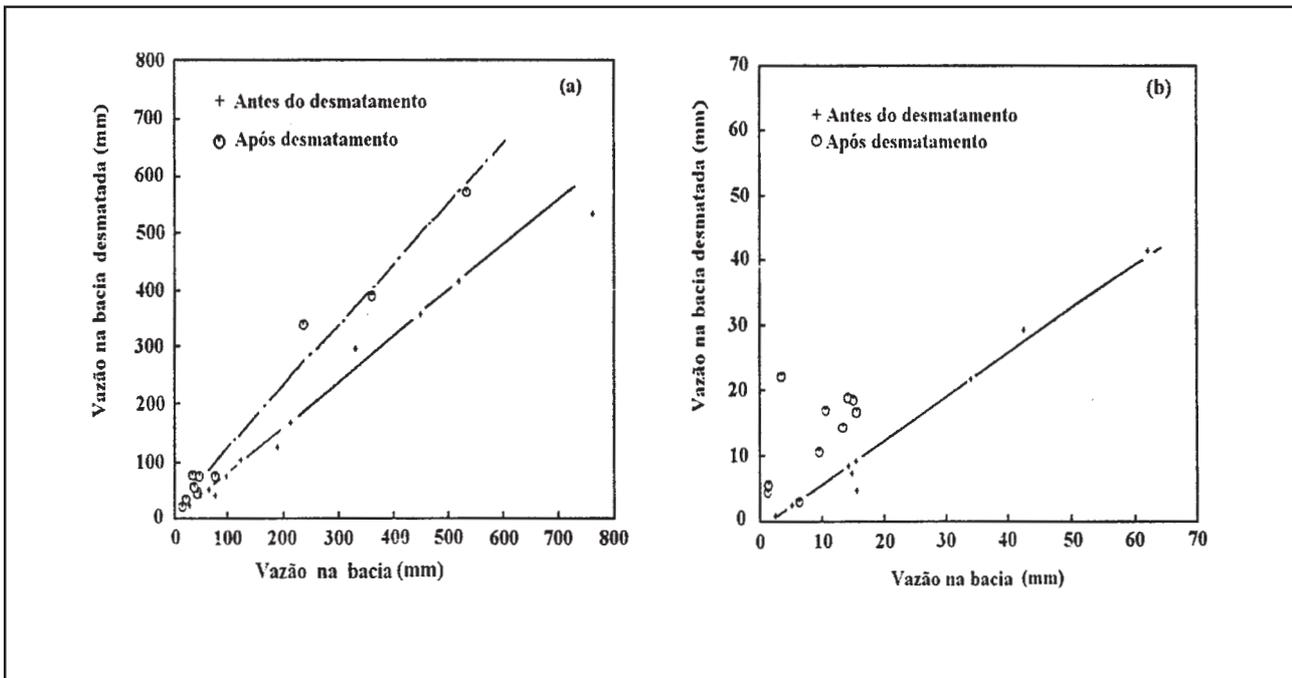


Figura 7. Relações entre as vazões na bacia desmatada e na bacia preservada em Taiwan (Hsia e Koh, 1983).

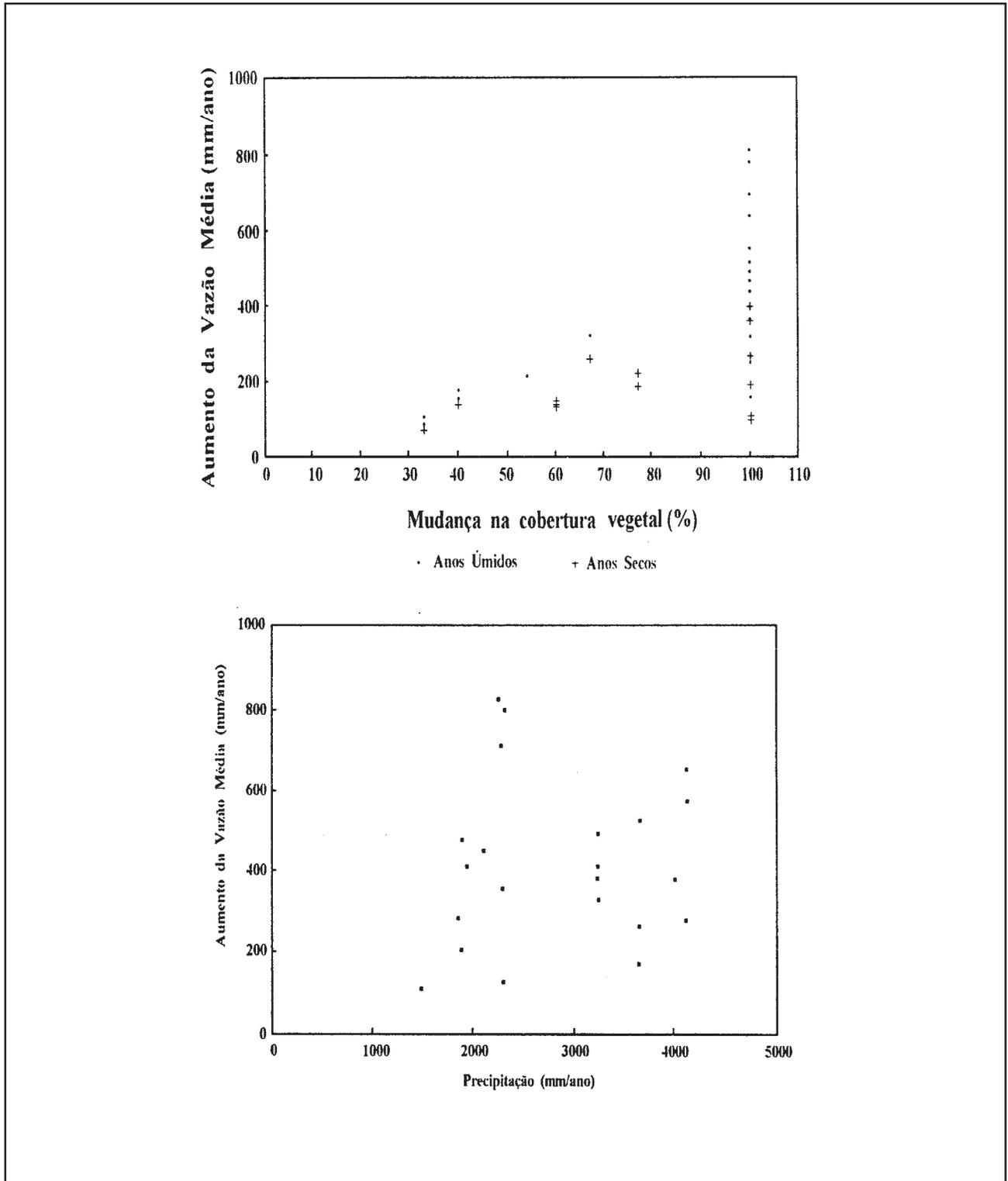


Figura 8. (a) Aumento da vazão média (mm/ano) durante os primeiros três anos após o desmatamento versus a percentagem da área desmatada; (b) Aumento da vazão média versus a precipitação anual (Bruijnzeel, 1996).

A dispersão encontrada indica que outros fatores devem ser levados em conta, além da porcentagem de desmatamento; no entanto os resultados são unânimes em mostrar que sempre ocorre aumento da vazão.

Sahin e Hall (1996) analisaram estatisticamente todos os experimentos disponíveis e resumiram os principais elementos, reproduzidos na Tabela 5. Dos resultados médios, pode-se observar que o desmatamento de florestas com precipitação menor que 1.500 mm tem como consequência um aumento médio de 169 mm para retirada de 100% da área, enquanto que para valores maiores que 1.500 mm de precipitação o efeito é de 201 mm.

Na Tabela 5 são apresentados os aumentos de escoamento permanentes, após o desmatamento de florestas tropicais, de acordo com cultura mantida.

Tabela 5. Alterações no escoamento devido ao desmatamento (Sahin e Hall, 1996).

Tipo de Cobertura	Mudança para 100% de remoção	Mudança para cada 10% de retirada
	mm	mm
conífera	330	23
eucaliptos	178	6
<i>hardwood-conifer</i>	201	22
floresta tropical	213	10
<i>hardwood</i> (> 1500mm)	201	19
<i>hardwood</i> (< 1500 mm)	169	17
Savana	92	9

Tabela 6. Valores médios de alteração da vazão de florestas tropicais, devido ao desmatamento em função da nova cobertura (Bruijnzeel, 1996).

Cultura mantida após o desmatamento	Aumento da vazão média mm/ano
cultura anual	300-450
vegetação rasteira	200-400
plantações de chá, borracha, cacau	200-300

Bruijnzeel (1996) cita que praticamente todas os resultados existentes se referem a

bacias pequenas, o que dificulta o prognóstico sobre bacias grandes. Isto se deve a grande variabilidade temporal e espacial de: precipitação, solo, cobertura, tipo de tratamento do solo e prática agrícola, entre outros. No entanto, o autor cita que Madduma et al (1988) identificaram grande aumento na vazão de uma bacia de 1.108 km² no Sri Lanka no período de 1944-1981, apesar da precipitação apresentar tendência de redução no período. Esse aumento, segundo os autores, foi devido a conversão de plantações de chá para culturas anuais e jardins residenciais sem o uso de medidas de conservação do solo.

Vazão mínima

É possível encontrar na literatura experimentos que mostram aumento ou diminuição da vazão mínima depois do desmatamento. O que pode caracterizar a dependência das características do solo após o desmatamento. Quando as condições de infiltração após o desmatamento ficam deterioradas, por exemplo o solo fica compactado pela energia da chuva, a capacidade de infiltração pode ficar reduzida e aumentar o escoamento superficial, com a redução da alimentação do aquífero. De outro lado, se a água que não é perdida pela floresta, atinge o solo e infiltra, o aquífero tem uma maior recarga, aumentando as vazões mínimas (veja Figura 7).

Comportamento dos hidrogramas

Burch et al (1987) apresentaram os resultados da comparação entre duas pequenas bacias de 5 ha e 7,8 ha com floresta e vegetação rasteira (grassland), respectivamente, localizadas na Austrália. Nas Figuras 9 e 10 são apresentados dois hidrogramas comparativos das duas áreas. Na primeira, um evento rápido com baixa umidade inicial e o outro, uma seqüência de três eventos durante um período maior. Na primeira (Figura 9), o escoamento da bacia

florestada foi de 0,02 mm e da bacia com vegetação rasteira foi de 16,8 mm. Na segunda (Figura 10) as diferenças relativas foram menores 21,8 mm para 63,6 mm.

Isto demonstra que o efeito da cobertura vegetal foi muito maior no período mais seco, com eventos de pequena e média intensidade de precipitação. No período de chuvas seqüenciais de grande intensidade a diferença diminuiu.

Em bacias com floresta e vegetação fechada, as precipitações de baixa intensidade

normalmente não geram escoamento. No entanto, após um período chuvoso de grande intensidade, quando a capacidade de interceptação da bacia é atingida, o escoamento aparece e as diferenças com relação ao volume escoado em bacias desmatadas são menores. Portanto, a cheia de pequeno médio tempo de retorno tende a aumentar, quando ocorre o desmatamento, enquanto que nas cheias de maior magnitude, as diferenças diminuem.

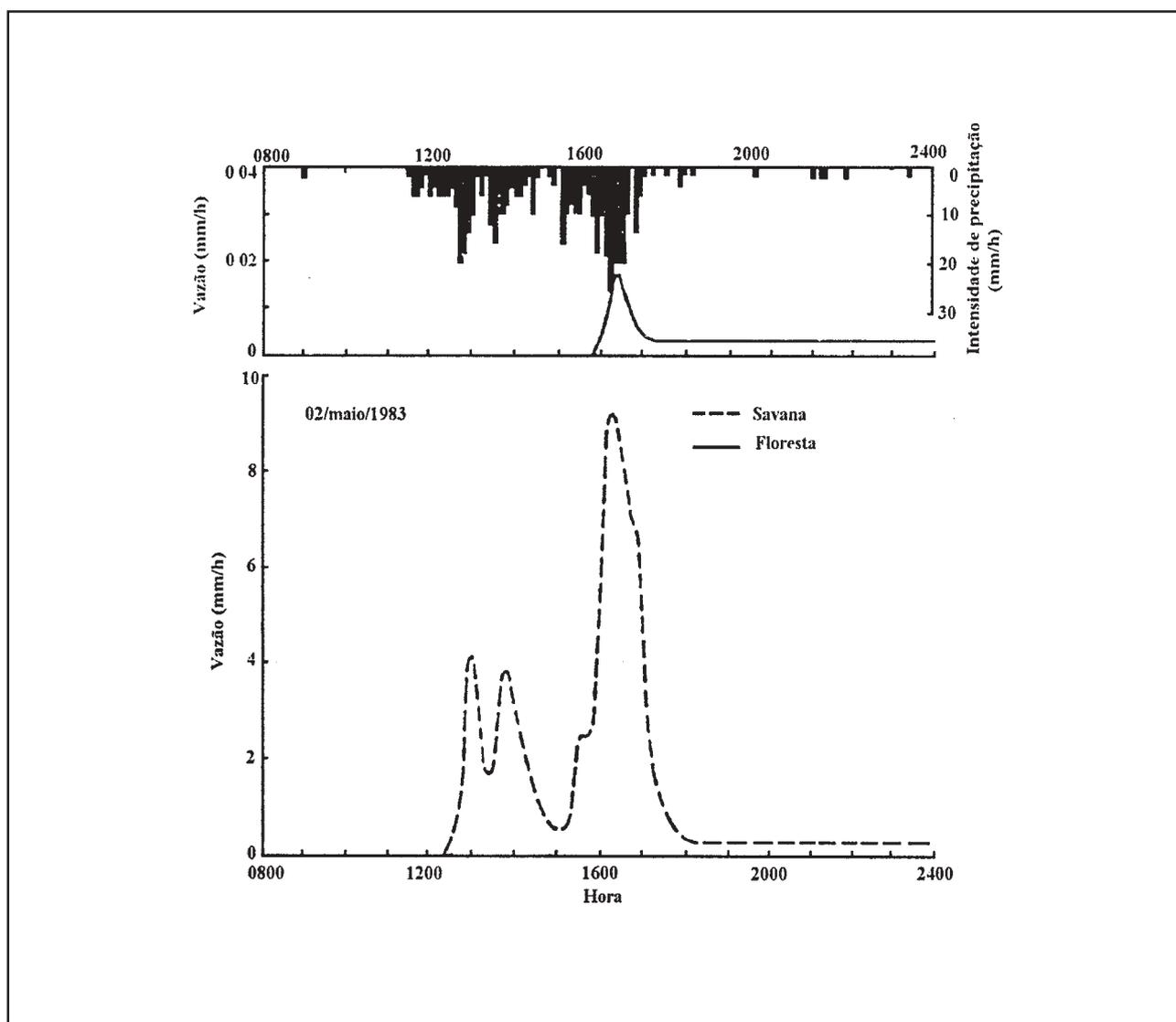


Figura 9. Evento num período de estiagem em duas bacias experimentais na Austrália (Burch et al, 1987).

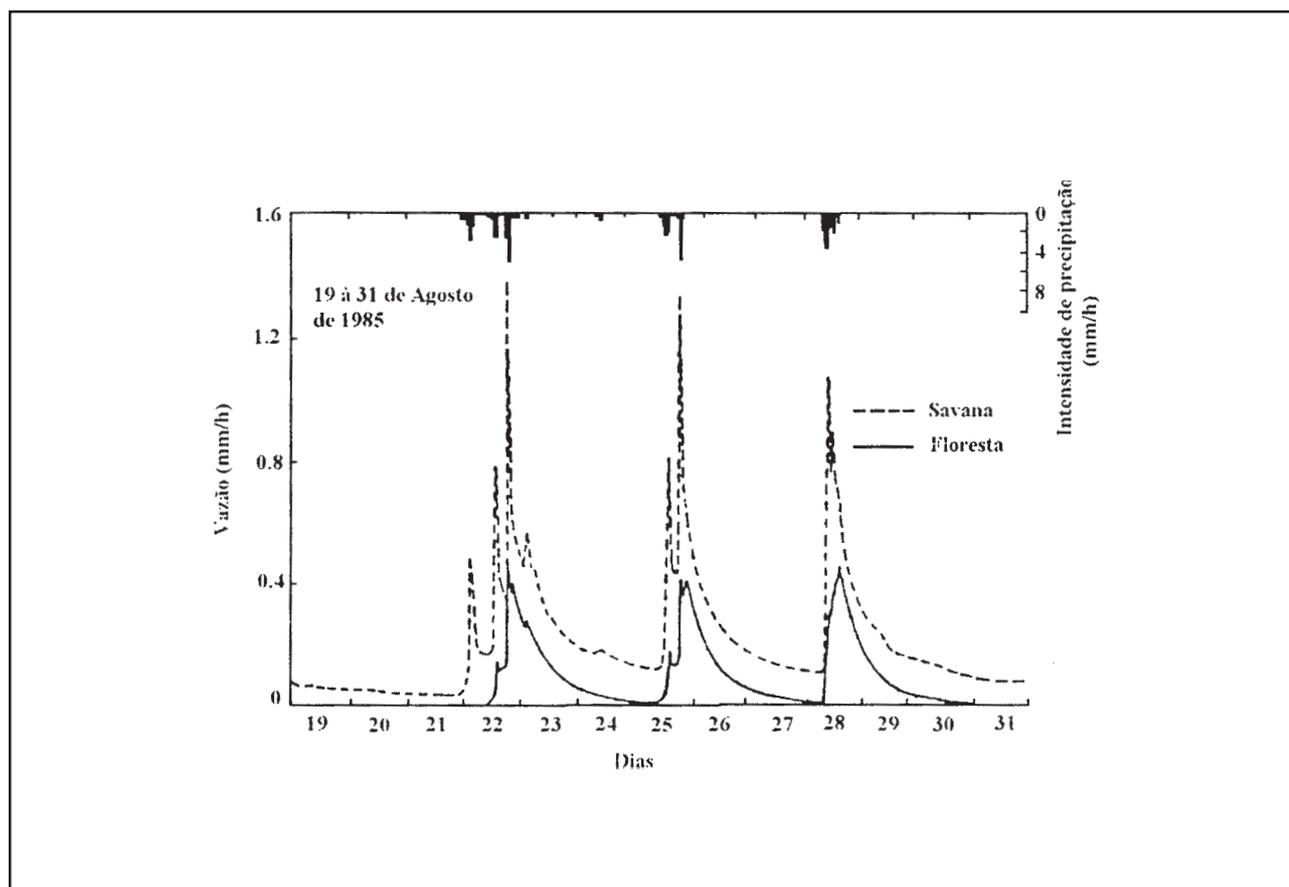


Figura 10. Hidrogramas de duas bacias experimentais na Austrália durante o período chuvoso (Burch et al 1987).

O Instituto de Pesquisas Hidráulicas operou por alguns anos duas bacias experimentais na bacia do rio Forquetinha, afluente do rio Taquari no Rio Grande do Sul. Apesar de não se encontrar na região de Interesse, a bacia em estudo está sobre o derrame basáltico do Sul do Brasil possui cultura anual de soja e milho.

As características das duas bacias são apresentadas na Tabela 7. Pode-se observar que uma bacia possui mata nativa e outra cultivo. Na figura são apresentadas as relações entre o coeficiente de escoamento e a precipitação para as duas bacias. Esses dados se referem a eventos chuvosos com precipitação antecedente menor ou igual a 10 mm nos últimos 6 dias. Pode-se observar que a bacia com mata somente produz escoamento após 50 mm e o coeficiente de

escoamento máximo observado foi de 0,22, enquanto que na bacia desmatada, com cultivo começa com 25 mm e o coeficiente de escoamento chega ao dobro do anterior (Figura 11).

CONCLUSÕES

O impacto do uso do solo sobre o comportamento hidrológico de bacias rurais é fundamental na preservação e uso dos recursos hídricos. A literatura apresenta vários artigos de bacias experimentais demonstrando que o desmatamento para utilização de culturas anuais, que é o processo que ocorre em grande parte do território brasileiro, produz aumento do escoamento de longo período. Essa alteração pode ser importante,

dependendo da cobertura anterior, das condições climáticas, e uso do solo.

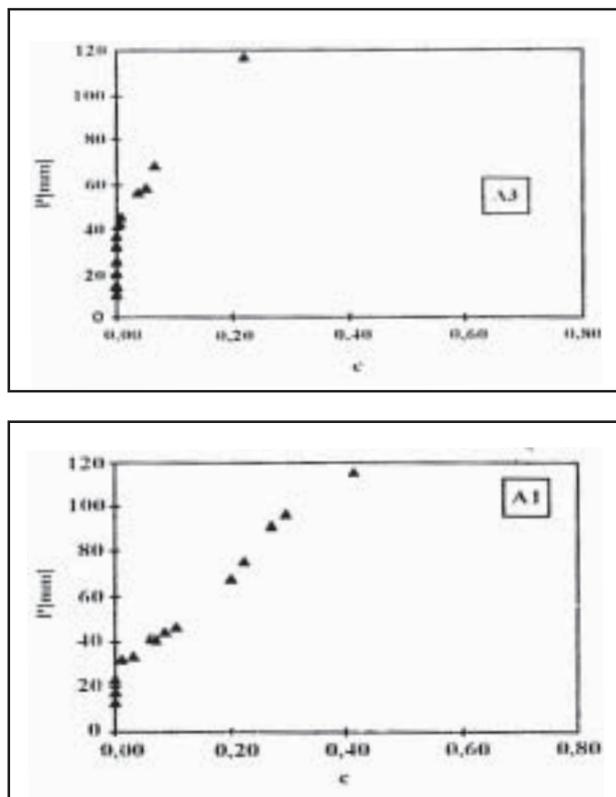


Figura 11. Relação entre precipitação e coeficiente de escoamento de: (a) uma bacia florestada e; (b) outra com cultivo na bacia do rio Forquetinha, afluente do rio Taquari no RS (Genz, 1996).

Tabela 7. Características das Vertentes do rio Forquetinha (Canali, 1981).

Bacia	Área km ²	Declividade %	Cobertura
A1	0,920	36	cultivo
A3	0,812	38	mata nativa

Esses resultados são de bacias de poucos hectares, portanto as questões passam a ser as seguintes:

Esse impacto pode ser extrapolado para bacias maiores? A literatura não apresenta resultados consistentes sobre o assunto, já que esse processo está dentro dos efeitos de escala do comportamento hidrológico de bacias de diferentes dimensões.

Considerando que o desmatamento e o uso do solo para cultura anual ocorre sobre toda uma bacia maior (> 500 km²), quais as chances que o aumento de escoamento seja proporcional ao de uma bacia experimental? Nesse caso, nas pequenas bacias, o escoamento deve aumentar devido a redução da evapotranspiração, a medida que esse fluxo adicional escoar para jusante é retido, criando oportunidade de evaporação, o efeito de aumento do escoamento é reduzido, enquanto, que se o sistema de drenagem comporta esse aumento, a tendência é do escoamento também aumentar nas bacias maiores, mas numa proporção menor.

Esse processo deve ser mais investigado através de estudos que comparem condições atuais e pré-existentes em bacias de diferentes portes. No entanto, exigem dados espaciais e temporais que normalmente não estão disponíveis.

REFERÊNCIA

- BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration *Journal of Hydrology* 55: 2-23
- BRUIJNZEEL, L.A., 1990. *Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review*. IHP. IAHS. UNESCO.224p.
- BRUIJNZEEL, L.A. 1996. Predicting the hydrological impacts of tropical forest conversion: The need for integrated research. Capítulo 2 de "Amazonian Deforestation and Climate" Eds: Gash J H C, Nobre C A, Roberts J M e Victoria R L John Wiley & Co: Chichester, Inglaterra.
- BURCH G J, BATH R K, MOORE I D e O'LOUGHLIN E M 1987. Comparative hydrological behaviour of forested and cleared catchments in southeastern Australia. *J. Hydrology* 90 19-42.
- CANALI, G.E., 1981. *Produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais. Efeito das características das chuvas, da declividade das vertentes e do uso do solo*. Dissertação de

- Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. 239p.
- CORNISH, P.M., 1993. The effects of logging and Forest Regeneration on Water Yield in Moist Eucalipt Forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, V150, N2/4, p301-322.
- DIAS, A.; NORTCLIFF, S., 1985. Effects of tractor passes on the physical properties of an Oxisol in the Brazilian Amazon. *Tropical Agriculture* 62: 202-212.
- HORNBECK, J.W.; ADAMS, M.B.; CORBETT, E.S.; VERRY, E.S.; LYNCH, J.A., 1993 Long-term impacts of forest treatments on water yield: A Summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology* 150 p323-344.
- HSIA e KOH 1983. Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan. in; *Hydrology of Humid Tropical Regions*, Keller, R. (ed.) IAHS publication n. 140, p215-220
- IGBP, 1993. *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle*. The International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Change, Report n.27. Estocolmo, 103p.
- JORDAN, C.F., 1985. *Nutrient Cycling in tropical forest ecosystems*. J.Wiley, New York.
- LAL, R., 1981 Deforestation of tropical rainforest and hydrological problems. in: *Tropical Agricultural Hydrology*, R. Lal e E. W. Russell (eds.) J. Wiley, New York, 131-140
- LAWSON, T.L.; LAL, R.; ODURO-AFRIYE, K., 1981. Rainfall Redistribution and microclimatic changes over a cleared watershed. In: *Tropical Agricultural Hydrology*, R. Lal & E. W. Russell (eds) J. Wiley, New York, 141-151.
- MADDUMA BANDARA, C.M.; KURUPPUARACHI, T.A., 1998. Land use change and hydrological trends in the upper Mahaweli basin. paper presented at the Workshop on Hydrology of Natural and Man-made Forests in the Hill Country of Sri Lanka, Kandy, outubro, 18p.
- McCULLOCH, J.S.G.; ROBINSON, M., 1993. History of forest hydrology *Journal of Hydrology*, 150: 189-216.
- MOOLEY, D.A.; PARTHASARATHY, B., 1983 Droughts and floods over India in Summer monsoon seasons 1871-1980 in: *Variation in Global Water Budget*, A. Street-Perrott et al. (eds) R. Reidel Dordrecht, The Netherlands 239-252p.
- NOBRE, C. A., SELLERS, P. J., e SHUKLA, J. 1991. *Amazonian deforestation and regional climate change*. J. of. Climate, 4, 957-988.
- PRITCHETT, W.L., 1979. *Properties and Management of Forest Soils*. John Wiley, New York, 500p.
- SAHIN, M. J.; HALL, M.J., 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields *Journal of hydrology* 1178 293-309.
- SHUTTLEWORTH, W.J.; GASH, J.H.C.; ROBERTS, J.; NOBRE, C.A.; MOLION, L.C.B. 1990. Post-deforestation Amazonian Climate: Anglo-Brazilian Research to improve prediction. Seminar on Hydrology and Water Management of The Amazon Basin, Manaus 5-9 de agosto 1990.
- TUCCI, C.E.M., 1996. *Estudos Hidrológicos e Hidrodinâmicos do rio Iguaçu na RMC*, COMEC, Relatório técnico.
- UBARANA, V. N. 1996. *Observations and modelling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia*. In: *Amazonian Deforestation and Climate*. Eds J H C GASH, C A NOBRE, J M ROBERTS e R L VICTORIA. John Wiley & Sons Ltd: Chichester. p 151-162.
- VÖRÖSMARTY, S.J. ; MOORE, B.; GRACE, A.; PETERSON, B.J.; RSTETTER, R.B.; MELILLO, J. 1991. Distributed parameter models to analyse the impact of human disturbance of the surface hydrology of a large tropical drainage basin in southern Africa, in: *Hydrology for the Water Management of Lange River Basins* F.H.M. Van de Ven, D. Gutnecht, D. P. Loucks and K.A. Salewicz (eds), IAHS Publ. 201.

Impact of Changes in Vegetation Cover on Runoff: a Review

ABSTRACT

Natural and man-induced changes to plant cover in drainage basins influence hydrological behaviour. The changes have varied effect both on the natural environment and the availability of water resources. This paper summarises the state of knowledge on the subject and describes the principal impacts of land-use changes on flow. Experimental studies clearly show that mean flow increases after deforestation of small, rural drainage basins, but there are no consistent results from medium and large basins.