**BALANÇO HÍDRICO, CARACTERÍSTICAS DO DEFLÚVIO E
CALIBRAGEM DE DUAS MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS NA
SERRA DO MAR, SP.**

FRANCISCO CARLOS SORIANO ARCOVA
Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. WALTER DE PAULA LIMA

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da
Universidade de São Paulo, para obtenção do
título de Mestre em Ciências, Área de
Concentração: Ciências Florestais.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Dezembro - 1996

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Arcova, Francisco Carlos Soriano

Balanço hídrico, características do deflúvio e calibragem de duas microbacias hidrográficas na Serra do Mar, SP / Francisco Carlos Soriano Arcova, 1996.

130 p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996.

Bibliografia.

1. Balanço hídrico 2. Deflúvio 3. Microbacias 4. Serra do Mar I. Título

CDD 551.483

BALANÇO HÍDRICO, CARACTERÍSTICAS DO DEFLÚVIO E
CALIBRAGEM DE DUAS MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS NA
SERRA DO MAR, SP.

FRANCISCO CARLOS SORIANO ARCOVA

Aprovada em: 19. 12. 1996

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Walter de Paula Lima

Prof. Dr. Fábio Pogianni

PqC. Dr. Rui Marconi Pfeifer

ESALQ/USP

ESALQ/USP

INSTITUTO FLORESTAL

Prof. Dr. WALTER DE PAULA LIMA
Orientador

À minha esposa Hideko e
ao meu filho Yuri,
à meus pais e irmãos.

DEDICO

Agradecimentos

Ao Professor Doutor WALTER DE PAULA LIMA, pela orientação e estímulo na condução da pesquisa.

Ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, que possibilitou a realização do curso de pós-graduação.

Ao Instituto Florestal, pelo apoio irrestrito à pesquisa durante o mestrado. Em especial, aos Pesquisadores Científicos Sebastião F. Cesar e Luiz A. Bucci, da Seção de Engenharia Florestal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Professor Dr. João Luis Ferreira Batista, meu reconhecimento pelo seu importante assessoramento estatístico.

Aos colegas Edson Namita Higashi, Erika Laura Schloemp, Marco Nalon e, em especial, ao Robinson Tuon, que muito auxiliaram nas questões de informática.

Aos Engenheiros Florestais Maurício Ranzini e José Henrique Abdalla, que revisaram este trabalho.

À Professora Dra. Sônia Maria Furian, do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP, pela contribuição científica e pelas importantes sugestões feitas na redação final desta dissertação.

Ao Pesquisador Científico Rui M. Pfeifer, que confeccionou o mapa de compartimentação altimétrica e o mapa de classes de declividades da microbacia hidrográfica B.

Ao colega Fernando P. Scardua, pelo estímulo na realização deste trabalho.

Aos pesquisadores, técnicos e pessoal de apoio do Laboratório de Hidrologia Florestal. Eng. Agro. Walter Emmerich, pela coleta e tabulação dos dados hidrológicos utilizados na pesquisa.

Ao Pesquisador Científico Valdir de Cicco, pelo profissionalismo e devoção ao L.H.F.E.A. Walter Emmerich.

À Marilena Ranzini, pela revisão efetuada no “Summary”.

À Maria Candida, que fez a digitação e a formatação final do texto ora apresentado.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xvi
SUMMARY	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. Características do meio biofísico da área de estudo	32
3.1.1. Localização geográfica	32
3.1.2. Topografia e relevo	36
3.1.3. Geologia e solos	42
3.1.4. Clima	46
3.1.5. Vegetação	49
3.2. Metodologias	50
3.2.1. Monitoramento hidrológico	50
3.2.2. Balanço hídrico	53
3.2.3. Comparação das características do deflúvio das microbacias B e D	54
3.2.3.1. Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário	54
3.2.3.2. Escoamento direto	54
3.2.3.3. Pico de vazão	56
3.2.4. Equações de predição (calibragem)	56

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1. Balanço hídrico	61
4.2. Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário	73
4.3. Escoamento direto	77
4.4. Pico de vazão	96
4.5. Equações de predição (calibragem)	102
4.5.1. Deflúvio anual	102
4.5.2. Deflúvio mensal	105
4.5.3. Escoamento direto	109
4.5.4. Pico de vazão	113
5. CONCLUSÕES	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

LISTA DE FIGURAS

N.º	Página
1 Localização do Laboratório de Hidrologia Florestal E. A. Walter Emmerich	33
2 Localização geográfica do município de Cunha no Estado de São Paulo	34
3 Secção transversal do Vale do Paraíba e localização da área de pesquisa (Adaptado de JICA, 1980)	35
4 Localização das microbacias B e D	35
5 Mapa de compartimentação altimétrica da microbacia B	38
6 Mapa de compartimentação altimétrica da microbacia D (Fonte: CARVALHO et al., 1990)	39
7 Mapa das classes de declividades da microbacia B	40
8 Mapa das classes de declividades da microbacia D (Fonte: CARVALHO et al., 1990)	41
9 Precipitação anual no L.H.F.E.A. Walter Emmerich	47
10 Precipitação mensal no L.H.F.E.A. Walter Emmerich	47

11	Temperatura mensal do ar no L.H.F.E.A. Walter Emmerich	48
12	Estação fluviométrica da microbacia B	52
13	Estação fluviométrica da microbacia D	52
14	Separação dos escoamentos direto e base dos hidrogramas (JICA, 1986)	55
15	Componentes dos hidrogramas e das precipitações empregados na calibragem do escoamento direto e do pico de vazão	58
16	Curva de dupla massa da precipitação anual das microbacias B e D	62
17	Precipitação anual das microbacias B e D	63
18	Deflúvio anual das microbacias B e D	64
19	Precipitação e deflúvio mensal médio acumulados, expressos como percentuais dos totais anuais da microbacia B	65
20	Precipitação e deflúvio mensal médio acumulados, expressos como percentuais dos totais anuais da microbacia D	65
21	Precipitação mensal média das microbacias B e D	66
22	Deflúvio mensal médio das microbacias B e D	66

23	Evapotranspiração anual das microbacias B e D	67
24	Relação entre a precipitação e o deflúvio anual da microbacia B ..	68
25	Relação entre a precipitação e o deflúvio anual da microbacia D ..	69
26	Relação entre a precipitação e a evapotranspiração anual da microbacia B	69
27	Relação entre a precipitação e a evapotranspiração anual da microbacia D	70
28	Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D para o período anual	74
29	Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D para o período seco	76
30	Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D para o período úmido	76
31	Hidrogramas das microbacias B e D ocorridos no dia 27 de janeiro de 1987	79
32	Hidrogramas das microbacias B e D ocorridos no dia 15 de fevereiro de 1988	80

33	Contribuição percentual do escoamento direto para o escoamento total das microbacias B e D	81
34	Relação entre o escoamento direto das microbacias B e D no período seco	82
35	Relação entre o escoamento direto das microbacias B e D no período úmido	82
36	Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia B no período seco	84
37	Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia D no período seco	84
38	Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia B no período úmido	85
39	Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia D no período úmido	85
40	Representação gráfica da regressão linear entre a precipitação e o escoamento direto da microbacia B	86
41	Representação gráfica da regressão linear entre a precipitação e o escoamento direto da microbacia D	86

42	Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia D em função da precipitação no período seco	89
43	Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia B em função da precipitação no período seco	89
44	Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia D em função da precipitação no período úmido	90
45	Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia B em função da precipitação no período úmido	90
46	Curvas de frequência relativa acumulada das taxas de pico de vazão das microbacias B e D no período seco	97
47	Curvas de frequência relativa acumulada das taxas de pico de vazão das microbacias B e D no período úmido	97
48	Relação entre as quantidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia B	100
49	Relação entre as quantidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia D	100
50	Relação entre as intensidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia B	101

51	Relação entre as intensidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia D	101
52	Relação entre o deflúvio anual das microbacias B e D	102
53	Relação entre os valores do deflúvio anual observados e os estimados da microbacia B	104
54	Relação entre os valores do deflúvio anual estimados da microbacia B e os resíduos	104
55	Relação entre os valores do deflúvio mensal observados e os estimados da microbacia B para o período total	108
56	Relação entre os valores do deflúvio mensal observados e os estimados da microbacia B para o período seco	108
57	Relação entre os valores do deflúvio mensal observados e os estimados da microbacia B para o período úmido	109
58	Distribuição dos resíduos versus os valores do escoamento direto da microbacia B a partir de dados não transformados	110
59	Distribuição dos resíduos versus os valores do escoamento direto da microbacia B a partir de dados transformados em logaritmo	111

60	Relação entre o logaritmo do escoamento direto observado e o estimado da microbacia B	112
61	Relação entre o logaritmo do pico de vazão observado e o estimado da microbacia B	115

LISTA DE TABELAS

N.º		Página
1	Evapotranspiração anual de florestas tropicais (Adaptado de BRUIJNZEEL, 1990)	12
2	Fatores de resposta médios de diferentes microbacias florestais	16
3	Características físicas das microbacias B e D	42
4	Variáveis resposta e de predição utilizadas nas análises de regressão para calibragem das microbacias B e D	59
5	Balanço hídrico médio anual das microbacias B e D	71
6	Temperatura do ar, evapotranspiração potencial (THORNTHWAITE & MATTER, 1955) e precipitação da microbacia D	72
7	Valores característicos das curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D	77
8	Distribuição de frequência das precipitações que provocaram os hidrogramas da microbacia B e das precipitações antecedentes ..	91
9	Fatores de resposta e áreas mínimas de contribuição das microbacias experimentais D e Tinga	94

10	Características das precipitações que provocaram os maiores picos de vazão nas microbacias B e D	99
11	Características estatísticas da equação de predição do deflúvio anual	103
12	Características estatísticas das equações de predição do deflúvio mensal	107
13	Características estatísticas da equação de predição do escoamento direto	111
14	Características estatísticas da equação de predição do pico de vazão	114

**BALANÇO HÍDRICO, CARACTERÍSTICAS DO DEFLÚVIO E
CALIBRAGEM DE DUAS MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS NA
SERRA DO MAR, SP.**

Autor: FRANCISCO CARLOS SORIANO ARCOVA

Orientador: PROF. DR. WALTER DE PAULA LIMA

RESUMO

Com o objetivo de comparar o balanço hídrico e características do deflúvio e, também, de realizar a calibragem das microbacias hidrográficas experimentais B e D, do Laboratório de Hidrologia Florestal Eng.º Agr. Walter Emmerich, estudou-se o comportamento hidrológico das duas microbacias durante um período de seis anos.

A área do experimento está localizada à leste do Estado de São Paulo, no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha, no limite entre a Serra do Mar e o Planalto Atlântico.

O clima da região é úmido, com fortes influências dos efeitos orográficos da Serra do Mar. A precipitação média anual é superior a 2000 mm, podendo o ano hídrico ser dividido em um período caracterizado como úmido, que se estende de outubro a março, e um período seco, que compreende os meses de abril a setembro.

Com área de 36,68 ha e 56,04 ha respectivamente, as microbacias B e D estão recobertas com vegetação secundária de Mata Atlântica, em solos do tipo Latossolo Vermelho Amarelo predominantemente, estabelecidos sobre rochas graníticas.

No período compreendido entre outubro de 1986 a setembro de 1992, monitorou-se as duas microbacias, efetuando-se medições contínuas das descargas e das precipitações pluviométricas.

Os componentes do balanço hídrico anual determinados foram a precipitação e o deflúvio. Pela diferença entre ambos, estimou-se a evapotranspiração, desconsiderando-se as variações de armazenamento de água no solo.

As características do deflúvio estudadas foram as curvas de duração de fluxo do deflúvio diário, o escoamento direto e as taxas de pico de vazão de hidrogramas.

Utilizando o método das microbacias pareadas, correlacionou-se o deflúvio anual, o deflúvio mensal, a quantidade de escoamento direto e o pico de vazão das microbacias B e D, por meio de regressões lineares, resultando em equações de calibragem das microbacias. A microbacia D foi considerada como controle no experimento.

A média anual da precipitação, do deflúvio e da evapotranspiração foram, respectivamente: **microbacia B** - 2012 mm, 1473 mm e 539 mm; **microbacia D** - 2158 mm, 1555 mm e 603 mm. Em termos percentuais, a evapotranspiração das microbacias é da ordem de 30% da precipitação anual.

O deflúvio médio diário das microbacias durante os períodos seco e úmido foram, respectivamente: **microbacia B** - 3,4 mm e 4,7 mm; **microbacia D** - 3,8 mm e 4,8 mm.

Os fatores de resposta médios das microbacias B e D, calculados pelo quociente entre o volume de escoamento direto e a precipitação, estimados a partir de 88 hidrogramas, foram 0,23 e 0,12, respectivamente.

Frente às análises efetuadas no presente trabalho pode-se concluir:

1) as microbacias são conservativas quanto ao consumo de água. Em comparação com outras florestas de clima tropical, a evapotranspiração anual da vegetação de mata atlântica do local ocorre a taxas consideravelmente menores;

2) as microbacias apresentam um regime de vazão bastante regular durante todo o ano hídrico. Em média, a produção de água no período das chuvas supera em apenas 10% a produção hídrica no período mais seco. O escoamento base é o principal componente do fluxo diário de água dos rios, abrangendo aproximadamente 90% do tempo de descarga na curva de duração de fluxo das microbacias. A contribuição do escoamento direto para o deflúvio diário restringe-se a cerca de 10% de todo o tempo do escoamento;

3) há uma diferença marcante entre a resposta hidrológica das duas microbacias devido às precipitações, em função da época do ano. No período das chuvas a proporção de escoamento direto é superior à verificada no período mais seco. As áreas geradoras de escoamento direto nas duas microbacias aumentam com a passagem da estação seca para a estação úmida e também com o incremento das chuvas. Embora pouco comum, a área mínima de contribuição do escoamento direto pode corresponder a 60% da superfície das microbacias;

4) o volume de escoamento direto da microbacia B, em geral, supera o da microbacia D. Uma maior proporção da superfície da primeira microbacia contribui para o escoamento rápido comparativamente à microbacia D. Para a maior parte das chuvas do período seco, não mais que 10% da microbacia D produz escoamento direto, enquanto na microbacia B, de 20% a 30% da superfície gera escoamento rápido. No período das chuvas, é bastante freqüente que 30% da microbacia D participe na formação do hidrograma, enquanto 30% a 50% da área da microbacia B usualmente produz este componente do deflúvio;

5) há evidências de que a resposta hidrológica às chuvas, mais intensa na microbacia B que na microbacia D, decorre principalmente, da presença de grandes extensões de solos rasos localizados em terrenos de grande inclinação, concentrados desde as partes mais elevadas até as porções inferiores das vertentes da microbacia B;

6) com relação à calibragem das microbacias, as equações determinadas para o deflúvio anual e para o deflúvio mensal, com reduzidos erros padrão de estimativa, podem ser utilizadas para avaliação de um eventual tratamento experimental, ao contrário dos modelos obtidos para estimativa do volume de escoamento direto e do pico de vazão. Recomenda-se a inclusão de mais observações na tentativa de melhorar as equações para as duas últimas características do deflúvio.

**WATER BALANCE, STREAMFLOW CHARACTERISTICS AND
CALIBRATION OF TWO SMALL WATERSHEDS IN SERRA DO MAR,
SÃO PAULO.**

Author: FRANCISCO CARLOS SORIANO ARCOVA

Adviser: PROF. DR. WALTER DE PAULA LIMA

SUMMARY

Our main target is the comparison of the water balance and the streamflow characteristics, besides achieving the calibration of B and D experimental watersheds in Walter Emmerich Hydrologic Laboratory. We have studied the hydrologic behaviour of the two small watersheds for six years.

The area of the experiment is in the east of São Paulo State, in Serra do Mar State Park in the border between Serra do Mar and Atlantic Plateau, at Brazil.

It's a wet area with hard influences of the orographic effects from Serra do Mar. The annual average precipitation is above 2,000 mm, and the water year can be divided in a wet period - from October to March - and a dry period - from April to September.

There are 36.68 ha and 56.04 ha in the B and D small watersheds, respectively. They are covered with Mata Atlântica forest, principally in Red Yellow Latosols, in granite.

From October 1986 to September 1992, we monitored the two watersheds, measuring discharge and precipitation continuously.

The measured components of the annual water year were the precipitation and streamflow. From the difference between them we estimated the evapotranspiration, neglecting the changes in soil moisture storage.

The studied streamflow characteristics were: flow duration curves of daily streamflow, stormflow and peak flow rates of hydrographs.

Applying the paired catchment method by means of linear regressions, we correlated the annual streamflow, monthly streamflow, the amount of stormflow and the peak discharge for the two watersheds, resulting in calibration equations. The D watershed was used as the control in the experiment.

The mean annual precipitation, streamflow and evapotranspiration were respectively: **B watershed** - 2,012 mm; 1,473 mm and 539 mm; **D watershed** - 2,158 mm; 1,555 mm and 603 mm. Within percentage limits, the evapotranspiration of the watersheds is about 30% the annual precipitation.

The mean daily flow of the watersheds during the dry and wet periods were respectively: **B watershed** - 3.4 mm and 4.7 mm; **D watershed** - 3.8 mm and 4.8 mm.

The mean hydrologic response of B and D watersheds - estimated by the rate between stormflow volume and precipitation, calculated from 88 selected hydrographs, were 0.23 and 0.12 respectively.

The results permit the following conclusions:

1) B and D small watersheds are conservative in terms of water consumption. Comparing to other tropical forests, the annual evapotranspiration of forest in the Mata Atântica presents a remarkable smaller proportion;

2) the watersheds presents a rather regular discharge regime during all the water year. In average, the water yield in the rainy period is only 10% greater than the water yield in the drier period. The baseflow is the main component of the daily streamflow, occurring during 90% of the time on the flow duration curves of the catchments. The daily direct runoff contribution occurs only about 10% of the time of the streamflow;

3) there is a remarkable difference between the two watersheds hydrologic response due to precipitations in different seasons of the year. In the rainy period,

the proportion of the stormflow is greater than the drier period. The generating area of stormflow in the two watersheds increase from the dry season to the wet season and with rainfall. Even though rare, the minimum contributing area can reach up to 60% of the total catchment area;

4) the stormflow volume of the B watershed is generally greater than the D watershed. During the dry period, 10% the area has a stormflow in the D watershed whereas 20% to 30% the area in B watershed produces a quickflow. During the rainy period, 30% D watershed usually contributes to the development of hydrograph, while 30% to 50% the B watershed surface usually produces this component of the flow;

5) the larger hydrologic responses to stronger rains in the B watershed than D watershed are mainly due to vast area of shallow soil in sloping ground which are concentrated from the top to the bottom in B watershed hillslopes;

6) the determined calibration equations for annual and monthly streamflow, with low standard error of estimate, could already be used to predict streamflow after an eventual experimental treatment in the B catchment. However, the models using volume of direct runoff and runoff peak were not significant with the available number of data.

1. INTRODUÇÃO

A água é o habitat para grande número de organismos vegetais e animais. É essencial para a vida no planeta. É um recurso natural vital ao desenvolvimento das sociedades, influenciando o estabelecimento e a distribuição das comunidades humanas nos vários pontos do globo terrestre. Esta influência se dá quando o recurso serve como fonte alimentar, como requisito para o estabelecimento de agricultura, meio de transporte ou para abastecimento de indústrias e cidades.

Devido às características de circulação da água na biosfera, movimentando-se rapidamente entre a terra e a atmosfera, é tida como recurso renovável e, portanto, inesgotável.

Apesar da rápida circulação e da grande quantidade envolvida, apenas uma porção de toda água da Terra está prontamente disponível ao uso humano, e tem como origem principalmente as chuvas sobre os continentes. Sérios problemas de distribuição espacial e temporal trazem dificuldades ao homem, seja devido a sua escassez ou ao seu excesso. Regiões com regime de chuvas bem distribuídas e abundantes são privilegiadas, pois é praticamente ilimitado o seu potencial para o desenvolvimento econômico.

Porém, devido as grandes transformações que o planeta vem sofrendo, com o crescimento pouco planejado dos centros urbanos e a destruição de áreas naturais, várias regiões estão começando a enfrentar sérios problemas quanto ao recurso água.

O elevado consumo de água para satisfazer as necessidades humanas tem trazido problemas na sua utilização, gerando conflitos entre os beneficiários do recurso. Muitas vezes, a água não é suficiente para um determinado propósito, como o abastecimento de indústrias e de populações, causando prejuízos à ambos. Esta água em quantidade insuficiente é ainda em muitos casos de qualidade inadequada para os diferentes fins, necessitando tratamento oneroso e que nem sempre devolve à água as suas características originais.

A preocupação do homem frente a escassez iminente dos recursos hídricos, e do conseqüente comprometimento do desenvolvimento econômico e social se faz presente de forma intensa nos nossos dias, a ponto da "Agenda 21", documento base da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em 1992 no Rio de Janeiro, dedicar um capítulo inteiro sobre o assunto.

As modificações no ambiente natural, com as transformações de florestas em cidades ou campos de agricultura e pastagem, contribuem para a alteração do ciclo hidrológico de bacias hidrográficas, agravando a situação acima exposta. As florestas, especialmente as localizadas em regiões de montanha e de regime pluviométrico elevado, desempenham papel fundamental no recebimento e distribuição da água das chuvas, influenciando na sua liberação para a atmosfera, pelo processo de evapotranspiração e, também, para alimentação dos aquíferos e das águas superficiais, como rios, nascentes e lagos.

O Vale do Paraíba é um exemplo desta realidade. Ligando as duas maiores cidades do Brasil, São Paulo e Rio de Janeiro e com inúmeras cidades em processo crescente de urbanização e industrialização, esta região é responsável por cerca de 40% da produção industrial do país (JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA, 1986). Como decorrência, há um elevado consumo de água para abastecimento destes centros urbanos.

As porções altas do Vale do Paraíba apresentam relevo montanhoso e sofrem um processo gradativo de depauperamento de seus solos, em função do uso inadequado. Historicamente, ao substituir-se a vegetação florestal natural pelo cultivo de cultura de café e, posteriormente, pelo uso na pecuária extensiva de leite com baixa produtividade, presente até nossos dias. Como consequência, estas áreas encontram-se em adiantado estágio de degradação, com acentuados processos erosivos e movimento de solos, que provocam a sedimentação e o assoreamento de cursos de água e reservatórios, a mudança do regime de descarga dos seus rios e a deterioração da qualidade da água para diversos fins, comprometendo assim os recursos hídricos que servem a região.

Devido a localização geográfica, próxima ao Oceano Atlântico, estas áreas montanhosas sofrem influência das massas de ar úmidas provenientes do mar, que ao se elevarem após contato com a Serra do Mar, precipitam-se como chuvas, proporcionando à região elevado índice pluviométrico. Com inúmeros rios perenes, tais áreas caracterizam-se como mananciais de água para o uso humano. Assim, a Serra do Mar e as partes montanhosas do Vale do Paraíba sob sua influência, apresentam papel preponderante para o suprimento hídrico da região no presente e no futuro.

Para o aproveitamento racional dos recursos hídricos gerados na região, são necessárias informações básicas sobre o comportamento da água nas suas microbacias e sobre os fatores que o influenciam, como clima, tipo de vegetação, solo, geologia e intervenções antrópicas. Tais informações só podem ser obtidas por meio de estudos de longa duração, envolvendo de forma integrada, os vários componentes do ciclo hidrológico e suas interrelações.

Pesquisas sobre os mecanismos do ciclo hidrológico em microbacias hidrográficas florestadas nesta região são conduzidas desde 1982, com a instalação do Laboratório de Hidrologia Florestal Eng. Agr. Walter Emmerich, do Instituto Florestal de São Paulo, resultado de cooperação técnica entre os

Governos do Brasil e Japão, para o desenvolvimento de um projeto de manejo florestal de bacias hidrográficas experimentais (JICA, 1980; 1986).

A localização geográfica da área é ideal para os estudos. O Laboratório está situado em região montanhosa de elevado índice pluviométrico, junto às cabeceiras do rio Paraibuna, um dos formadores do rio Paraíba do Sul, fazendo parte do complexo da Serra do Mar.

Três microbacias experimentais com vegetação natural de Mata Atlântica são monitoradas continuamente, com medições das precipitações pluviométricas e do deflúvio. Estudos sobre o balanço hídrico, o processo de interceptação das chuvas pela floresta, dinâmica da água no solo, qualidade da água, ciclagem de nutrientes, dentre outros, têm produzido grande gama de informações sobre a hidrologia e ecologia da área (CICCO et al., 1985a; 1985b; 1986/88; 1989; CARVALHO et al., 1992; CICCO & FUJIEDA, 1992; ARCOVA et al., 1993; e FUJIEDA et al., 1993).

Em continuidade às pesquisas do projeto, o presente trabalho faz uma comparação do comportamento hidrológico e a calibragem das microbacias hidrográficas experimentais B e D, para um período de seis anos.

Os objetivos do estudo são:

- 1) determinar o balanço hídrico anual das duas microbacias;
- 2) realizar uma análise do regime do deflúvio das duas microbacias, por meio de curvas de duração de fluxo do deflúvio diário, de características do escoamento direto e do pico de vazão;
- 3) obter equações de predição para o deflúvio anual, deflúvio mensal, para o volume de escoamento direto e para o pico de vazão de hidrogramas, empregando o método de calibragem das bacias hidrográficas pareadas.

A análise comparativa prévia das duas microbacias experimentais permite obter o que é normalmente referido como calibragem experimental. A partir disto, a hipótese de trabalho é que será possível efetuar uma avaliação

estatística dos efeitos sobre o deflúvio, caso haja, deliberadamente ou não, uma alteração da cobertura vegetal de uma das microbacias hidrográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos dos conhecimentos atuais sobre os processos hidrológicos de áreas montanhosas florestadas são o resultado de estudos conduzidos em microbacias hidrográficas experimentais.

Os mecanismos que influenciam a geração do deflúvio, as perdas evaporativas, o suprimento de água em florestas, bem como os efeitos das intervenções do homem sobre estas, decorrentes das atividades de manejo e exploração, são estudados com a utilização de microbacias experimentais em vários locais do mundo (BOSCH & HEWLETT, 1982; SHIMIZU, 1983; BRUIJNZEEL, 1990 e WHITEHEAD & ROBINSON, 1993).

O estudo pioneiro no qual se empregou o chamado "método hidrométrico de microbacias experimentais" data de 1899, sendo realizado na Suíça (SHIMIZU, 1983 e WHITEHEAD & ROBINSON, 1993).

SHIMIZU (1983) faz menção a um estudo iniciado no Japão no ano de 1906, envolvendo oito microbacias experimentais, no qual se compara a diferença na produção de água entre bacias florestadas e bacias desprovidas de qualquer tipo de vegetação.

O primeiro experimento do gênero com resultados conhecidos é o consagrado estudo desenvolvido na região de Wagon Wheel Gap, Colorado, Estados Unidos. Duas microbacias adjacentes e florestadas foram instrumentadas para a medição da precipitação e do deflúvio, calibradas e então uma delas sofreu o corte da floresta, permanecendo a outra inalterada, como testemunha do

experimento. Observou-se um aumento significativo da produção anual de água da microbacia desmatada (BOSCH & HEWLETT, 1982 e HEWLETT, 1982).

BOSCH & HEWLETT (1982) revisaram resultados de estudos em 94 bacias experimentais em todo o mundo, acumulando informações úteis a respeito das alterações da vegetação sobre o deflúvio.

O Laboratório Hidrológico de Coweeta, na Carolina do Norte, Estados Unidos, é o centro de estudos em hidrologia florestal mais antigo. Em operação desde os anos 30, os registros prolongados de precipitação e deflúvio, em conjunto com outras medições realizadas no interior das microbacias e em parcelas experimentais, têm gerado informações fundamentais sobre a influência do tipo de vegetação e de práticas silviculturais na produção, consumo e dinâmica da água em áreas montanhosas.

Muitos dos trabalhos pioneiros sobre os mecanismos de geração do escoamento direto em áreas florestais, que culminaram no conceito de “área variável de afluência”, foram conduzidos nas microbacias experimentais de Coweeta (HIBBERT & TROENDLE, 1988).

Os anos 60 e 70 destacaram-se pelo grande interesse e entusiasmo nas pesquisas em hidrologia, sendo o período de 1965 a 1974 adotado como o "Decênio Hidrológico Internacional", quando foi estabelecido um grande número de microbacias experimentais em todo o mundo, orientadas por critérios e recomendações segundo a UNESCO, (TOEBES & OURYVAEV, 1970 e WHITEHEAD & ROBINSON, 1993).

Apesar de mundialmente consagrada e de ser a metodologia mais comumente utilizada, o emprego de microbacias monitoradas é frequentemente questionado por cientistas que pesquisam a influência da floresta sobre os recursos hídricos. Os críticos ao uso de microbacias experimentais apontam como desvantagens desta metodologia: os custos elevados envolvidos com equipamentos sofisticados; o longo tempo dispendido nas pesquisas; sua pouca

representatividade; a possibilidade de vazamentos nas áreas experimentais; a dificuldade de se ter duas microbacias idênticas como prevê o método e; a dificuldade na extrapolação dos resultados (HEWLETT et al., 1969 e NEWSON & CALDER, 1989).

Intensamente utilizadas, as microbacias experimentais passaram a ser úteis não apenas para estudos hidrológicos isolados, mas também para estudos integrados a uma perspectiva global do ecossistema (WHITEHEAD & ROBINSON, 1993).

Neste contexto, estes autores exemplificam, com justiça, o já citado Laboratório Hidrológico de Coweeta e a Estação Experimental de Hubbard Brook, New Hampshire, ambos nos Estados Unidos. Estas áreas, inicialmente idealizadas apenas para estudos das relações floresta-recursos hídricos, tornaram-se centro de pesquisas ecológicas integradas, com o objetivo de desenvolver uma melhor compreensão da resposta de ecossistemas florestais a perturbações locais e também de larga escala. Assim, tais áreas incluem atualmente estudos avaliando o efeito da preparação de solos, da aplicação de herbicidas e do fogo sobre a qualidade da água das bacias hidrográficas. Estudos integrados de vegetação, solo, química e biologia das águas, processos biogeoquímicos e hidrológicos e de fauna são conduzidos. Mais recentemente, com os problemas de poluição atmosférica, os efeitos da chuva ácida sobre os ecossistemas passaram a ser estudados nas microbacias.

Com o crescimento da tomada de consciência sobre os problemas de poluição do ar e da chuva ácida, da mudança do uso da terra afetando a dinâmica de nutrientes, metais pesados e das mudanças climáticas, os estudos em microbacias têm se tornado uma prioridade. Estas áreas experimentais, envolvendo normalmente um monitoramento prolongado, podem contribuir como indicadoras das mudanças ambientais globais (WHITEHEAD & ROBINSON, 1993).

Todo estudo que envolve as relações floresta-recursos hídricos tem como ponto de partida a realização do balanço hídrico, estimando seus principais componentes. Do menor vale à maior bacia hidrográfica, sempre existe uma discreta área do terreno que recebe a água da chuva, evapora parte desta e produz a diferença como deflúvio ou recarga de água subterrânea (HEWLETT, 1982).

Uma microbacia instrumentada para a medição da precipitação e do deflúvio pode ser considerada como um grande lisímetro. Pela diferença entre estes dois componentes do ciclo hidrológico é possível estimar a evapotranspiração para qualquer período, no qual o armazenamento de água inicial é igual ao final, isto é, a variação de armazenamento de água na bacia seja nula. Esta restrição, freqüentemente possibilita o uso de bacias hidrográficas apenas para a estimativa da evapotranspiração de valores anuais (FEDERER, 1975). O período utilizado para tanto é aquele correspondente ao do ano hídrico.

Para que uma microbacia possa ser utilizada na determinação do balanço hídrico, é necessário que todos os fluxos de água estejam sob controle, ou seja, que não haja possibilidade de vazamentos na bacia.

LEE (1980) demonstra que uma bacia hidrográfica pode estar sujeita a vazamentos de água de dentro para fora da bacia, como de outra bacia vizinha para o interior da bacia experimental. Isto pode ocorrer quando existe uma área de drenagem superficial da bacia que não corresponde exatamente aos limites subterrâneos. Duas situações são possíveis. Na primeira, a presença de uma camada de rocha impermeável, partindo de uma bacia vizinha e com inclinação voltada para o curso de água da bacia experimental provoca um aumento na contribuição dos fluxos subterrâneos de água, aumentando o deflúvio da bacia. Conseqüentemente, haverá uma subestimativa da evapotranspiração quando do seu cálculo pela equação do balanço hídrico. Se a direção geral do declive da camada de rocha for da bacia experimental em direção ao rio da bacia vizinha, o deflúvio será subestimado. Outra possibilidade é que os divisores topográfico e

freático não coincidam. Se o divisor freático estiver deslocado para o interior da bacia experimental, haverá vazamento para fora da bacia, com subestimativa do deflúvio, acarretando na superestimativa da evapotranspiração. Caso o divisor freático esteja deslocado para a bacia vizinha haverá superestimativa do deflúvio e portanto subestimativa da evapotranspiração.

Uma outra possibilidade de vazamento para fora da bacia experimental é que ocorra perda de água por falhas no substrato rochoso da área, isto é, que haja percolação profunda.

A utilização de microbacias experimentais com vazamento é um problema real na interpretação de dados de consumo de água pela vegetação, conforme constatado por BRUINJZEEL (1990). Na sua revisão bibliográfica sobre a hidrologia de florestas tropicais úmidas e sobre os efeitos da conversão da vegetação, o autor creditou 'a vazamentos para fora das microbacias experimentais os elevados valores de evapotranspiração.

No contexto do balanço hídrico, o conhecimento das taxas anuais de evapotranspiração é de grande importância, uma vez que o rendimento hídrico de uma bacia hidrográfica é afetado pelo consumo total de água pela vegetação. Este componente do balanço pode mesmo suplantar a produção de água da bacia.

Um resumo de resultados de estudos de evapotranspiração compilados do trabalho de BRUINJZEEL (1990) é apresentado na Tabela 1 e mostra uma grande amplitude de valores para florestas tropicais. Em geral, tanto para florestas de baixas altitudes quanto para as florestas de montanha, as perdas anuais pela evapotranspiração ultrapassam a 1000 mm. No primeiro caso a média está próxima de 1400 mm. Para regiões de maiores altitudes a evapotranspiração tende a ser menor; em termos médios da ordem de 1200 mm. No entanto, taxas de evapotranspiração bastante reduzidas são registradas para “casos especiais de florestas” denominado pelo autor de “cloud forests”, cujas características são o

baixo recebimento de energia, o baixo deficit de pressão de vapor atmosférico e o processo de contato das copas das árvores com as nuvens (cloud stripping).

LIMA (1993) relata que as florestas tropicais atingem um valor médio limite de 1500 mm/ano, e que florestas naturais de folhosas mistas de clima temperado, tendem a apresentar uma taxa média anual de evapotranspiração entre 1000 e 1100 mm, sob precipitação anual superior a 1500mm.

O deflúvio de uma bacia hidrográfica pode ser considerado como sendo o produto residual do ciclo hidrológico, o qual é influenciado por três grandes grupos de fatores: clima, fisiografia e uso do solo (LIMA, 1986).

Os fatores climáticos influenciam o deflúvio por meio da precipitação e da evapotranspiração. A quantidade, intensidade, duração, distribuição espacial e temporal, a frequência de ocorrência, a forma e o tipo são algumas das características das chuvas que afetam a geração do deflúvio. A evapotranspiração, que consiste em perda de água da bacia, afeta a produção hídrica, como mencionado anteriormente.

As características físicas que mais afetam a formação do deflúvio são: a declividade, a área, a forma, a orientação da bacia, a densidade de drenagem, a geologia, os solos e as características geométricas da rede de drenagem.

Para bacias hidrográficas não urbanizadas, a cobertura vegetal, pela sua influência nos processos hidrológicos como interceptação das chuvas, transpiração, infiltração e percolação, constitui num importante fator de contribuição na geração do deflúvio. No conjunto, estes fatores explicam algumas características hidrológicas do deflúvio de microbacias hidrográficas florestais, como a rapidez de formação de escoamento direto e o regime do fluxo de água no decorrer do ano.

Tabela 1. Evapotranspiração anual de florestas tropicais (Adaptado de BRUIJNZEEL, 1990).

Local	Precipitação (mm)	Evapotranspiração (mm)
Florestas de baixa altitude		
Reserva Ducke, Brasil	2648	1311
Grégoire II, G. Francesa	3697	1437
Barro Colorado, Panamá	2425	1440
Tai II, Ivory Coast	1986	1363
Babinda, Austrália	4037	1421
Tonka, Suriname	2143	1630
Florestas de montanha		
Sierra Nevada, Colômbia	1983	1265
idem	2316	308 ^c
San Eusébio, Venezuela	1576	980
Rio Macho, Costa Rica	2697	366 ^c
Kericho, Kenya	2130	1337
Perinet, Madagascar	2081	1295
Mbeya, Tanzânia	1924	1381
Mt. Data, Filipinas	3382	392 ^c

Sobrescrito “c” significa “cloud forests”.

SEARCY (1959) e CHANG (1982) consideram a chamada "curva de duração de fluxo" uma técnica de trabalho bastante útil para o estudo das características do deflúvio de bacias hidrográficas.

Esta "curva de duração de fluxo" é uma curva de frequência cumulativa que mostra o percentual de tempo no qual descargas específicas são igualadas ou excedidas durante um dado período.

SEARCY (1959) resume os dois principais métodos usados para construção das curvas de duração de fluxo. No primeiro, denominado "método do calendário anual", as descargas são classificadas segundo sua magnitude para o período de um ano, sendo o processo repetido para os demais anos. Em seguida, obtém-se a média dos valores das frequências para cada classe de magnitude de descarga. Um bloco diagrama é plotado, com o tempo no eixo das abcissas e as descargas nas ordenadas. No outro método, chamado "método do período total", todas as descargas do período estudado são classificadas segundo sua magnitude. Os totais são acumulados, começando com as classes mais elevadas, e a percentagem do tempo totalizado é computado para cada classe. Os dados são então plotados, com o percentual de tempo nas abcissas e as descargas nos eixos das ordenadas. O autor enfatiza que o segundo método é mais preciso que o primeiro.

A curva de duração de fluxo mostra os efeitos integrados dos vários fatores que afetam o deflúvio. Como a inclinação da curva é influenciada pelas características hidrológicas e geológicas da área, a curva pode ser usada tanto para a análise do deflúvio de uma bacia hidrográfica como para comparar as características de uma bacia com aquelas de outras bacias. SEARCY (1959) explica que uma curva de duração de fluxo com uma inclinação acentuada em toda a sua extensão reflete uma contribuição bastante significativa do escoamento direto no fluxo total da bacia hidrográfica. Por outro lado, uma curva com uma

inclinação suave em toda sua extensão revela uma contribuição mais significativa do escoamento base.

As curvas de duração de fluxo têm sido úteis para a caracterização hidrológica de microbacias durante o período de calibragem, e para períodos posteriores à aplicação de tratamentos em estudos dos efeitos das alterações da vegetação florestal sobre o comportamento do deflúvio (HELVEY, 1973 e SMITH & BOSCH, 1989).

Assim, para a caracterização da microbacia hidrográfica Tinga, da Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ - USP, região de Itatinga - São Paulo, SCARDUA (1994) usou, dentre vários aspectos hidrológicos, a curva de duração de fluxo do deflúvio diário para um período de três anos, estimando também alguns valores inerentes à curva, como o deflúvio diário médio e o deflúvio diário mediano.

HORNBECK et al.(1970) utilizaram curvas de duração de fluxo para avaliar os efeitos da eliminação da floresta sobre o regime do deflúvio de uma bacia hidrográfica experimental na região de New England, Estados Unidos. Compararam curvas desenvolvidas com dados medidos na estação fluviométrica após a derrubada da floresta, com curvas obtidas por meio de valores de deflúvio estimados por intermédio de regressões estabelecidas antes que a vegetação fosse alterada. As curvas de duração foram determinadas para as estações de dormência e de crescimento da vegetação, e também para um ano hídrico completo. Com este procedimento foi possível detectar que as maiores diferenças entre o fluxo medido e o fluxo estimado ocorreram para as menores descargas. Como um exemplo do efeito do tratamento observado por intermédio das curvas, observou-se que 116 dias da estação de crescimento da vegetação tiveram descargas que excederam 28,32 l/s. Se a derrubada da floresta não tivesse sido efetuada, apenas 26 dias teria excedido 28,32 l/s de descarga. Por outro lado, as curvas de duração de fluxo mostraram que os efeitos do tratamento sobre o deflúvio durante a

estação de dormência foram pequenos. A curva obtida a partir de descargas medidas após o tratamento diferiu muito pouco daquela determinada para o período anterior ao tratamento.

A representação gráfica da altura da lâmina d'água ou da descarga do deflúvio em função do tempo em minutos, horas ou dias recebe a denominação de hidrógrafa ou hidrograma. O deflúvio total, a sua distribuição sazonal, o escoamento diário, o pico de vazão, o deflúvio mínimo e a frequência de várias taxas de fluxos são obtidas a partir de hidrogramas (HEWLETT, 1982).

O escoamento total do deflúvio em função de uma dada chuva é composto de dois componentes: o escoamento base, que alimenta o rio na ausência de chuvas e o escoamento direto, ou escoamento rápido, que consiste no volume de água que deixa a bacia ainda durante a chuva e logo após esta. Por representar a resposta imediata da bacia hidrográfica à uma dada chuva, o conhecimento dos vários aspectos relacionados ao escoamento direto é importante para a caracterização hidrológica de microbacias.

A partir de uma breve revisão sobre a análise de hidrogramas realizada por SWFIT JR. et al. (1988), conclui-se que os chamados "coeficientes do deflúvio" ou "fatores de resposta", tais como as razões entre deflúvio total e precipitação; entre escoamento direto e precipitação; e entre escoamento direto e deflúvio total, podem ser usados na caracterização de microbacias. Além dos fatores de resposta médios, como o quociente entre escoamento direto médio anual e precipitação média anual, os autores destacam que a variação da resposta do deflúvio às chuvas é útil também como característica hidrológica da microbacia, na definição dos eventos máximos e mínimos encontrados.

A Tabela 2 apresenta o fator de resposta médio de várias microbacias hidrográficas experimentais, mostrando uma ampla variação deste coeficiente.

Tabela 2. Fatores de resposta médios de diferentes microbacias florestais.

Microbacia	Fator de resposta (escoamento direto / precipitação)
R. Florestal Ducke, Brasil (1)	0,03
Coweeta 2, EUA (2)	0,04
Coweeta 18 (2)	0,05
Coweeta 14 (2)	0,05
Coweeta 21 (2)	0,06
Bent Creek 7, EUA (2)	0,06
Coweeta 8 (2)	0,07
Union 3, EUA (2)	0,08
Coweeta 28 (2)	0,10
Copper Basin 2, EUA (2)	0,10
Leading Ridge 1, EUA (2)	0,11
Dilldown Creek, EUA (2)	0,12
Fernow 4, EUA (2)	0,14
Coweeta 36 (2)	0,15
Burlington Brook, EUA (2)	0,17
Hubbard Brook, EUA (2)	0,18

Adaptado de: (1) FRANKEN & LEOPOLDO (1986/87); (2) LEE (1980).

À luz dos conhecimentos atuais de hidrologia florestal, sabe-se que o escoamento direto em microbacias florestais protegidas é produzido por apenas uma fração de toda a superfície ou subsuperfície da bacia hidrográfica, e que estas áreas são dinâmicas, expandindo-se com a continuidade das chuvas e retraindo-se com o fim destas. Em linhas gerais a afirmação acima explica o conceito de "área variável de afluição" desenvolvido por Hewlett e Hibbert nos anos sessenta (HEWLETT, 1982).

Este conceito difere em dois pontos básicos da teoria de geração do escoamento direto considerada até então e que foi preconizada por Horton na década de 30: 1) que o escoamento direto é gerado pelo escoamento superficial sempre que a intensidade da chuva suplanta a capacidade de infiltração do solo da bacia hidrográfica; 2) toda a bacia produz escoamento superficial, LIMA¹.

Segundo a hipótese proposta por HEWLETT & HIBBERT (1967), uma microbacia florestada bem protegida raramente tem a capacidade de infiltração excedida pelas intensidades das chuvas. Assim sendo, o escoamento superficial é exceção em tais bacias hidrográficas, limitando-se àquelas de regiões de clima árido ou semiárido.

O preceito básico do conceito de "área variável de afluição" é que a água das chuvas geralmente infiltra-se nos solos florestais não perturbados, migra no sentido da declividade e mantém os solos na porção inferior das vertentes em condições de saturação ou próximo a este estado de umidade. Estas áreas contribuem prontamente com o fluxo subsuperficial para o escoamento direto como zonas de solos saturados. Estas áreas expandem-se lateralmente e longitudinalmente, sendo que o grau de saturação e subsequente expansão varia em função das condições de umidade antecedente do solo e do volume e duração da chuva (HIBBERT & TROENDLE, 1988).

¹ LIMA, W.P. de. Estudo de funções de matas ciliares em microbacias (trabalho apresentado na Mesa Redonda "Novas Perspectivas de Trabalhos em Matas Ciliares", do II Simpósio sobre Matas Ciliares, Ribeirão Preto, 1995).

Em extensa revisão bibliográfica sobre o assunto, LIMA² relaciona as áreas potenciais para a geração do escoamento rápido de microbacias florestadas como: 1) zonas saturadas que margeiam os cursos d'água e suas cabeceiras, as quais podem se expandir durante chuvas prolongadas, isto é, as zonas ripárias; 2) concavidades do terreno, para as quais há convergência das linhas de fluxo, como as concavidades freqüentemente existentes nas cabeceiras (também parte da zona ripária); 3) áreas de solo raso, com baixa capacidade de infiltração. O autor destaca que nos dois primeiros exemplos o processo que ocorre é o de "escoamento superficial de áreas saturadas", presente mesmo quando a intensidade da chuva é inferior a capacidade de infiltração do solo, sendo que parte deste processo pode ser derivado do interfluxo lateral. O terceiro caso refere-se ao escoamento superficial Hortoniano propriamente dito.

WARD (1984), ao realizar análise profunda sobre esse tema, enfatiza que o conceito de área variável de afluência, como proposto por Hewlett e Hibbert, valoriza sobremaneira as regiões de solos saturados contíguas à rede de drenagem, como principais áreas geradoras do escoamento direto. Em seu trabalho, o autor realça a existência de outros locais com ocorrência de escoamento superficial saturado não necessariamente adjacentes aos canais do deflúvio, comuns no interior de microbacias. Explica que a convergência de fluxos de água subsuperficial pode acontecer e levar à saturação (superficial) do solo provocando fluxo superficial saturado em adição àquelas áreas imediatamente vizinhas a rede de drenagem. Os locais prováveis de saturação do solo são: 1) partes de encostas de topografia com conformação côncava, onde a convergência do interfluxo leva a saturação da região central; 2) concavidades nas porções inferiores das vertentes com solos de propriedades hidráulicas uniformes; 3) áreas cujos perfis do solo sofrem depressão, com a conseqüente redução da

² LIMA, W.P. de. Estudo de funções de matas ciliares em microbacias (trabalho apresentado na Mesa Redonda "Novas Perspectivas de Trabalhos em Matas Ciliares", do II Simpósio sobre Matas Ciliares, Ribeirão Preto, 1995).

capacidade de transmissão da água; 4) solos que exibem uma redução da condutividade hidráulica com a profundidade. Neste caso, parte da água que percola verticalmente tende a sofrer uma alteração de direção no sentido do declive, levando ao desenvolvimento de uma camada ou de camadas de saturação temporária.

Ainda de acordo com WARD (1984), as áreas saturadas não contíguas à rede de drenagem podem ser ligadas hidrológicamente a esta por meio de canais ou galerias ("pipeflows") resultantes da atividade animal, da decomposição de raízes vegetais ou mesmo formados por processos hidrológicos e hidráulicos. Esta conexão entre ambas permite que as áreas geradoras localizadas nas porções superiores da vertente contribuam para o escoamento rápido do deflúvio.

O escoamento direto pode ser analisado em termos do "conceito de área mínima de contribuição", definido como aquela área da microbacia na qual 100% da precipitação efetiva é liberada na forma de escoamento direto (DICKINSON & WHITLEY, 1972).

Por intermédio da equação:

$$R = (V/P).C$$

onde,

R = área mínima de contribuição;

V = volume de escoamento direto;

P = precipitação efetiva; e

C = coeficiente adimensional que determina a unidade de R,

é possível estimar a área que gerou o escoamento rápido para cada evento de chuva.

Na ausência de informações sobre valores de saturação das copas das árvores, BRUIJNZEEL (1983) utilizou a precipitação total da chuva, no lugar da precipitação efetiva, para a estimativa da área mínima de contribuição em uma microbacia na Indonésia.

WATERLOO (1994) e SCARDUA (1994) também usaram a precipitação total no cálculo da área mínima de contribuição em estudos do gênero. Para os cálculos estes autores utilizaram a equação:

$$MCA = (Qd/P) \cdot Ac$$

onde,

MCA = área mínima de contribuição (ha);

Qd = volume do escoamento direto (mm);

P = precipitação total (mm); e

Ac = área da bacia (ha).

Assim, WATERLOO (1994) verificou para uma microbacia de 63 ha em Fiji, que para chuvas pequenas, apenas uma fração relativamente reduzida da bacia provocou escoamento direto ($MCA < 2$ ha). Por outro lado, durante chuvas fortes, até 13 ha da microbacia causaram escoamento rápido.

SCARDUA (1994) estimou para a microbacia Tinga, com vegetação de *Eucalyptus saligna* em região de topografia suavemente ondulada a plana e latossolo vermelho amarelo fase arenosa, que até 4,9% da área contribui para a formação do escoamento direto.

Apesar do MCA indicar apenas as quantidades em área de superfície da bacia hidrográfica potencialmente geradora do deflúvio durante e imediatamente após as chuvas, não fornecendo qualquer informação de localização destas, é sem

dúvida um coeficiente importante para a caracterização hidrológica de microbacias.

O volume de escoamento direto e o pico de vazão são funções de dois grupos de fatores: os fatores fixos e os fatores que variam com o tempo. No primeiro caso, enquadram-se características da bacia como tamanho, forma, declividade do canal, declividade da bacia, densidade de drenagem, dentre outros. Os fatores que variam com o tempo são ligados à características das precipitações e condições das bacias. O volume das chuvas, a duração, a intensidade, a distribuição espacial e o intervalo de tempo entre eventos de chuvas são importantes. As condições da bacia hidrográfica que podem variar e influenciar a resposta hidrológica incluem o tipo de vegetação, a sua extensão, as condições da superfície do solo e mudanças em geral que a atividade antrópica pode provocar na bacia hidrográfica (BROOKS et al., 1991).

Para que se possa avaliar as alterações na produção de água de microbacias experimentais, decorrentes das mudanças das condições originais das bacias, é necessário que se estabeleça relações matemáticas entre as características do deflúvio de interesse e outra ou outras variáveis hidrológicas das microbacias estudadas. Estas relações devem ser determinadas durante um período que antecede a perturbação da floresta. Este procedimento é denominado pelos hidrologistas florestais como calibragem (REIGNER, 1964; REINHART, 1967; GOLDING, 1980 e SWINDEL & DOUGLAS, 1984).

Conforme GOLDING (1980), os métodos de calibragem de microbacias experimentais são três: o método das bacias pareadas; o método da calibragem de uma única bacia usando dados climáticos; e o método da curva de dupla massa.

No método das bacias pareadas, uma variável do deflúvio de interesse da bacia a ser alterada é correlacionada com a mesma variável de interesse de uma segunda bacia adjacente ou vizinha, de condições similares à primeira, denominada de bacia controle. Esta correlação é estimada, pela análise de

regressão, resultando numa equação de predição que é usada para a determinação da mudança na produção de água após a alteração das condições originais da bacia. A diferença entre o deflúvio medido na bacia que sofreu a alteração e o deflúvio estimado pela relação obtida na calibragem fica, por este procedimento, estatisticamente caracterizado como resultado do tratamento aplicado na bacia.

Uma opção ao uso de microbacias pareadas é a utilização, não de um único par de bacias, uma como controle e a outra a ser tratada, mas sim de vários pares de bacias. Neste caso, a característica do deflúvio de um determinado número de bacias tratadas pode ser comparada com o deflúvio do mesmo número de bacias controle.

Na impossibilidade de monitoramento de duas ou mais microbacias, pode-se efetuar a calibragem de uma única bacia, usando dados hidrológicos e climáticos, como realizado por REIGNER (1964). Por este método, usa-se a característica do deflúvio de interesse e dados climáticos e hidrológicos obtidos durante o período de calibragem da bacia, desenvolvendo a partir deles equação ou equações de regressão para predizer a característica do deflúvio estudada. Estas equações são aplicadas durante o período de pós-ocorrência do tratamento experimental da bacia e o deflúvio estimado é comparado com o deflúvio atual medido. A diferença é uma medida do efeito da perturbação.

O método da curva de dupla massa pode ser usado para bacias pareadas e para uma única bacia, indistintamente. Os totais acumulados da característica de interesse são plotados contra a variável controle em um gráfico do sistema cartesiano. O efeito da alteração da vegetação é indicado pela mudança na declividade da curva.

REIGNER (1964) faz uma breve análise sobre as principais vantagens e desvantagens na utilização dos dois primeiros métodos. O método das bacias pareadas tem elevada confiabilidade, pois trata-se de um procedimento bastante utilizado nos experimentos de hidrologia florestal, com grande respaldo da

experiência e sucesso, sendo ele o mais recomendado. O sucesso do método é baseado na elevada correlação existente entre as características do deflúvio utilizadas. Suas desvantagens são o alto custo de manutenção e instalação de mais de uma microbacia, a possibilidade de distúrbios na bacia controle, como incêndios florestais que podem prejudicar as características hidrológicas da bacia e também a possibilidade de que a vegetação na bacia controle possa sofrer alterações após o período de calibragem. Por outro lado, a calibragem de uma única bacia por meio de dados climáticos é menos onerosa, uma vez que há a instrumentação de apenas uma área. Além disso, a análise é mais informativa, pois o método relaciona o deflúvio com fatores que o influenciam diretamente. A principal desvantagem é sua grande complexidade, pois o número de tabulações e análises de dados necessários é consideravelmente maior, a fim de se obter resultados desejáveis na avaliação dos efeitos dos distúrbios da vegetação da bacia sobre a produção hídrica.

Sobre o uso de vários pares de microbacias, GOLDING (1980) ressalta que, se por um lado este método necessita de um grande investimento financeiro, operacional e de mão de obra a curto prazo, os resultados dos estudos são obtidos em um período mais curto, havendo ainda a redução dos riscos de perdas de dados das bacias controle e tratada devido a uma calamidade natural que venha a ocorrer. Esta alternativa reduz o período de calibragem, sendo possível determinar efeitos significativos de tratamentos florestais com apenas um ano de observações.

O método da curva de dupla massa, que na verdade deve ser entendido como uma forma de análise das relações entre as características do deflúvio em estudo, tem como desvantagem o fato de não ser suficientemente sensível para a realização de uma análise estatística, além das dificuldades na obtenção de conclusões objetivas (GOLDING, 1980).

As características mais comumente utilizadas na calibragem estão relacionadas à quantidade de deflúvio. Evidentemente, quanto maior o número de características empregadas, maior o número de informações que poderão ser obtidas, porém mais complexo se torna o estudo. O deflúvio mensal, sazonal e anual são as características de maior interesse em estudos de hidrologia florestal. Outras características, como o deflúvio diário, vazão máxima diária, vazão máxima de hidrogramas isolados, vazão mínima diária, volume de escoamento direto, escoamento base, etc., são também freqüentes (REINHART, 1958; SAMRAJ et al., 1988; BOSCH & SMITH, 1989; BREN & PAPWORTH, 1991).

Além das características ligadas à quantidade do deflúvio, características inerentes ao regime de vazão são igualmente empregadas na calibragem de bacias pareadas.

Para avaliar o efeito de dois tipos de exploração de uma floresta de *Pseudotsuga menziesii* sobre a produção hídrica de bacias hidrográficas em Oregon, nos Estados Unidos, HARR et al. (1982) utilizaram na calibragem de duas bacias hidrográficas, além do deflúvio anual e do pico de vazão, o número de dias cujo deflúvio médio diário foi inferior a 0,22 l/s/ha. Para as duas primeiras características as correlações foram bastante elevadas; os coeficientes de determinação (r^2) das regressões definidas foram 0,98 e 0,99 para o deflúvio anual e 0,93 e 0,95 para o pico de vazão. Por outro lado, a característica relacionada ao número de dias foi moderadamente correlacionada, com valores de r^2 iguais a 0,92 e 0,72.

Ao calibrarem dois pares de bacias experimentais, BRECHTEL et al. (1982) utilizaram o deflúvio anual e o deflúvio médio para cada mês. O número de dias que o deflúvio de determinadas magnitudes foram igualados ou excedidos na curva de duração de fluxo também foi testado nas análises de regressão.

HEWLETT & HELVEY (1970) avaliaram o efeito do corte raso da floresta, com a manutenção dos restos vegetais no solo, sobre os hidrogramas de

uma microbacia em Coweeta. Para tanto, calibraram duas bacias experimentais. As características de interesse no estudo foram o volume de escoamento direto, o pico de vazão, o tempo do pico de vazão, o tempo de duração do escoamento direto e o tempo de descida do hidrograma.

Dois tipos de regressões têm sido normalmente utilizados na calibragem de microbacias experimentais: a regressão linear simples e a regressão linear múltipla.

A regressão linear simples é o modelo mais comum, sendo amplamente empregado na calibragem de bacias pareadas. É expresso pela fórmula genérica:

$$Y = a + b.(X) + e$$

onde,

Y = variável resposta (característica do deflúvio da bacia à ser alterada);

X = variável de predição (característica do deflúvio da bacia controle);

b, a = parâmetros que expressam a inclinação da linha e o ponto de interceptação do eixo y pela curva, respectivamente;

e = erro aleatório com distribuição normal, média igual a zero e variância constante.

Uma correlação elevada tem sido verificada quando se relaciona linearmente o deflúvio de bacias hidrográficas vizinhas. BRECHTEL et al. (1982) encontraram valores elevados de coeficientes de correlação (r) para dois pares de bacias hidrográficas experimentais, quando se utilizou o deflúvio anual. O menor valor obtido foi de 0,973. Por outro lado, quando os autores correlacionaram o

deflúvio médio das bacias para cada mês, encontraram valores de coeficiente de correlação que variaram de 0,5806 a 0,9961.

BREN & PAPWORTH (1991), ao calibrarem duas bacias hidrográficas com uma terceira (controle), encontraram elevado coeficiente de determinação para regressão linear simples, sempre superiores a 0,98, indistintamente da característica utilizada, isto é, o deflúvio diário, mensal ou sazonal.

Também SAMRAJ et al. (1988) utilizaram a regressão linear simples, encontrando a melhor correlação para o deflúvio mensal, escoamento direto e fluxo base entre duas bacias hidrográficas experimentais.

Outros modelos de relação que não linear, têm sido determinados na calibragem de microbacias. BOSCH & SMITH (1989) registraram que o melhor modelo que descreveu a relação do deflúvio mensal entre duas bacias hidrográficas na África do Sul estava na seguinte forma:

$$Y = a.(x)^b$$

Porém, para sua utilização no experimento, a relação foi transformada na forma logarítmica linearizada, isto é:

$$\ln(y) = \ln(a) + b.(\ln(x))$$

Todas as demais relações entre as duas bacias apresentaram forma linear.

Menos utilizados, porém não menos importantes, os modelos de regressão linear múltipla podem ser úteis. Eles permitem que a inclusão de outras variáveis independentes proporcionem uma melhoria da equação da predição de calibragem. Sua principal vantagem é proporcionar a avaliação de efeitos

combinados de muitos parâmetros sobre a característica estudada. O efeito relativo de cada variável independente pode ser determinado.

Os modelos de regressão linear múltipla são expressos da seguinte forma:

$$Y = a + b_1.(X_1) + b_2.(X_2) + \dots + b_n.(X_n) + e$$

onde,

a = parâmetro do ponto de interceptação do eixo y ;

$b_1, b_2, \dots, b_n$ = parâmetros da inclinação das relações entre as respectivas variáveis de predição $X_1, X_2, \dots, X_n$ com a variável resposta Y ;

e = erro aleatório com distribuição normal, média igual a zero e variância constante.

Na calibragem de uma microbacia experimental na região nordeste dos Estados Unidos REIGNER (1964) obteve uma melhora significativa na equação de predição do deflúvio anual ao introduzir no modelo, além da precipitação, a evapotranspiração potencial e o armazenamento de água no solo como variáveis de predição. A regressão múltipla produziu um erro de estimativa de 10,30 mm, enquanto a relação obtida empregando apenas a precipitação gerou um erro de estimativa de 23,20 mm.

Na calibragem de bacias pareadas, o emprego de outras características combinadas com o deflúvio, usadas como variável de predição, pode também ser frutífero no estabelecimento das regressões. REINHART (1967) sugere o uso de dados climáticos obtidos no local do estudo. O autor destaca que a utilização da diferença entre os valores de precipitação das duas bacias pareadas é promissora.

Porém, a inclusão da precipitação na calibragem de duas bacias hidrográficas pelo método da bacia controle, além do deflúvio de uma terceira bacia, na localidade de Victoria, Austrália, não proporcionou qualquer melhoria significativa nos modelos de regressões definidos por BREN & PAPWORTH (1991) nas equações de predição do deflúvio diário, mensal e sazonal. O mesmo ocorrendo nas análises de regressões conduzidas por BOSCH & SMITH (1989).

Para avaliar os efeitos do corte da floresta sobre o volume de escoamento direto, pico de vazão e de componentes de tempo dos hidrogramas, HEWLETT & HELVEY (1970) se valeram principalmente de modelos de regressões múltiplas no estabelecimento das equações de predição.

Para o volume de escoamento direto, a equação definida na calibragem foi:

$$\hat{V}_t = -0,152 + 0,883.(V_c) + 0,116.(P_c)$$

onde,

$\hat{V}_t$ = volume de escoamento direto estimado da bacia tratada;

V_c = volume de escoamento direto da bacia controle;

P_c = precipitação da bacia controle.

A presença da precipitação como variável de predição indica que a quantidade da chuva afetou a correlação entre as duas microbacias.

Na equação que relacionava o pico de vazão para as duas bacias, os autores utilizaram também a intensidade das chuvas, conforme o modelo:

$$(\hat{Q}_t)^{1/2} = 0,858 + 1,071.(Q_c)^{1/2} + 0,535.(I)$$

onde,

$\hat{Q}_t$ = pico de vazão estimado da bacia tratada;

Q_c = pico de vazão da bacia controle;

I = intensidade da chuva.

Por outro lado, a partir da análise de regressão, produziu-se um modelo de equação linear simples para o tempo de pico do hidrograma:

$$\hat{L}_t = -0,438 + 0,999.(L_c)$$

onde,

$\hat{L}_t$ = tempo de pico do hidrograma estimado da bacia tratada;

L_c = tempo de pico do hidrograma da bacia controle.

Para a duração do escoamento direto e do tempo de descida do hidrograma, as análises de regressão levaram novamente a modelos de equações múltiplas:

$$\hat{D}_t = 12,58 + 0,957.(D_c) - 1,553.(q_c)$$

onde,

$\hat{D}_t$ = tempo de duração do escoamento direto estimado da bacia tratada;

D_c = tempo de duração do escoamento direto da bacia controle;

q_c = deflúvio antecedente ao início do hidrograma.

$$\hat{R}_t = 11,13 + 0,959.(R_c) - 1,442.(q_c)$$

onde,

$\hat{R}_t$ = tempo de descida do hidrograma estimado da bacia tratada;

R_c = tempo de descida do hidrograma da bacia controle;

q_c = deflúvio antecedente ao início do hidrograma.

A duração da calibragem de microbacias é um fator muito importante para seu êxito. Deve-se sempre ter em mente que a equação de predição estabelecida é válida apenas para aquela variação de dados a partir da qual a regressão foi obtida.

O período de calibragem deve ser o mais representativo possível das condições climáticas e hidrológicas da área, abrangendo a maior gama de variações climáticas que possa ocorrer, incluindo anos secos e anos úmidos no estudo (REINHART, 1967).

BRUIJNZEEL (1990) destaca que um fator complicador na avaliação de efeitos hidrológicos com a transformação da cobertura vegetal nas regiões tropicais é a elevada variabilidade climática no decorrer dos anos. Isto, é claro, se aplica tanto ao período de pós-tratamento quanto ao período da calibragem das bacias.

Evidentemente, como lembrado por BROOKS et al. (1991), o número de anos necessários para que se obtenha uma calibragem adequada entre bacias pareadas não é fixo, dependendo dos objetivos do estudo e também da variabilidade dos dados utilizados para tal. Caso se deseje determinar uma equação de predição para o deflúvio anual, cada ano representa apenas um dado na regressão. Por outro lado, se o interesse existe na determinação de uma relação que estime componentes de hidrogramas, vários eventos podem ser analisados em poucos anos, proporcionando um conjunto de dados adequados para a calibragem.

O período de calibragem de microbacias pareadas estende-se por cinco ou mais anos. SAMRAJ et al. (1988) utilizaram 4 anos para o estabelecimento de regressões que relacionavam o deflúvio mensal e também os escoamentos direto e base entre duas bacias hidrográficas na Índia. BOSCH & SMITH (1989) empregaram dados mensais do deflúvio de duas bacias hidrográficas coletados num período que abrangeu seis anos de calibragem. Seis anos também foram utilizados para o estabelecimento de regressões para o deflúvio anual entre bacias

hidrográficas na Floresta Experimental de H. J. Andrews (ROTHACHER, 1970). HORNBECK et al. (1970) desenvolveram equações para o deflúvio anual, mensal e sazonal a partir de dados coletados num total de oito anos. Para avaliar o efeito da exploração de uma floresta de *Pseudotsuga menziesii* de 130 anos de idade sobre a produção hídrica anual e outras características do deflúvio, HARR et al. (1982) se valeram de equações obtidas após 11 anos de calibragem.

Para a obtenção de modelos de calibragem de componentes dos hidrogramas de duas microbacias experimentais de Coweeta, HEWLETT & HELVEY (1970) utilizaram-se dos 77 principais hidrogramas obtidos em 18 anos de pesquisa.

Um exemplo da importância da utilização de um grande número de anos na predição do deflúvio anual foi apresentado por BRECHTEL et al. (1982). Ao calibrarem duas bacias hidrográficas, utilizando dados de 8 anos, obtiveram um coeficiente de correlação de 0,973. Adicionando o nono e o décimo ano nas análises houve uma melhora gradativa; os coeficientes de correlação aumentaram para 0,979 e 0,982, respectivamente.

A acurácia a ser alcançada nos experimentos com microbacias é freqüentemente de difícil determinação. Na calibragem, uma equação de predição é definida e a ela está associado um erro de estimativa. Caso este erro seja suficientemente pequeno para ser aceito, significa que o grau de correlação entre as características das bacias e a precisão das observações são satisfatórios (REIGNER, 1964).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características do meio biofísico da área de estudo

3.1.1. Localização geográfica

O Laboratório de Hidrologia Florestal Engenheiro Agrônomo Walter Emmerich está situado no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha, Município de Cunha, no limite entre a Serra do Mar e o Planalto Atlântico, no Estado de São Paulo. É administrado pelo Instituto Florestal, Órgão da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo.

Com área de 2.854 ha, o Núcleo está localizado entre os paralelos 23° 13' e 23° 16' de Latitude Sul e os meridianos 45° 02' e 45° 05' de Longitude Oeste de Greenwich. Dista aproximadamente 170 km da capital paulista e 15 km do Oceano Atlântico (Figuras 1 e 2).

A área faz parte da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, região do Vale do Paraíba, que na sua parte mais elevada é formada pelas bacias hidrográficas dos rios Paraitinga e Paraibuna, totalizando 4.400 km², localizada a leste do Estado de São Paulo (PRANDINI et al., 1982), (Figura 3).

O Núcleo abrange, a nível regional, uma parte do alto ao médio vale do rio Paraibuna, pertencente ao Planalto de Paraitinga, no Planalto Atlântico. As nascentes do rio Paraibuna localizam-se a sudeste da cidade de Cunha, em compartimento mais interiorizado da Serra do Mar, em altitudes variando entre 1.300 m e 1.600 m (FURIAN, 1987).

As microbacias B e D distam aproximadamente três quilômetros entre si, sendo seus cursos d'águas tributários do rio Paraibuna (Figura 4).

Figura 1. Localização do Laboratório de Hidrologia Florestal E.A. Walter Emmerich.

Figura 3. Secção transversal do Vale do Paraíba e localização da área de pesquisa (Adaptado de JICA, 1980).

Figura 4. Localização das microbacias B e D.

3.1.2. Topografia e relevo

O relevo da região é montanhoso, caracterizado como sendo do tipo "mar de morros ou de meias laranjas". Apresenta fortes oscilações topográficas, onde predominam altitudes superiores a 1.000 m e declividades de encostas acima de 15° (FURIAN & PFEIFER, 1986).

Conforme FURIAN (1987), no Núcleo Cunha as classes de níveis de altitude são distribuídas num plano geral entre 1.000 m e 1.228 m. Esta cota de 1.228 m pertence ao topo mais elevado da área. A cota de 1.000 m corresponde à calha do rio Bonito e a de 1.053 m à do rio Paraibuna. A distribuição dessas classes na área é a seguinte:

1- entre 1.035 m e 1.100 m pertencem aos topos dos morrotes que circundam o rio Paraibuna, compondo os mais baixos níveis;

2- entre 1.100 m e 1.200 m pertencem ao nível médio, predominante no Núcleo Cunha, abrangendo praticamente todo o sistema de morros e;

3- o nível mais elevado, com topos entre 1.200 m e 1.228 m, onde se localizam as nascentes do ribeirão do Barracão (microbacia D), formam o divisor de água entre o rio Paraibuna e o seu afluente rio Bonito, coincidindo com um pequeno compartimento mais interiorizado da Serra do Mar.

A microbacia B possui os divisores topográficos em cotas ligeiramente inferiores às da microbacia D, conforme mostram os mapas de compartimentação altimétrica das duas áreas (Figuras 5 e 6). Nos topos dos morros as altitudes variam de 1130 m à 1170 m na microbacia B e 1150 m à 1228 m na microbacia D.

A microbacia B apresenta topos arredondados. As vertentes são íngremes, com declividades entre 58% a 97% em sua grande maioria, como mostrado pelo mapa de declividades (Figura 7), obtido a partir de metodologia apresentada por DE BIASI (1970). Há exposição de rochas em alguns trechos da

microbacia. Da meia vertente para baixo ocorrem alguns terrenos com forma côncava, entre-cortadas por vertentes abruptas, também com altas declividades. Tanto as formas das vertentes quanto das declividades apresentam expressivas rupturas. Tais rupturas de formas e de declividades são igualmente observadas na baixa vertente até o canal do deflúvio, cujas altitudes variam de 1130 m a menos que 1050 m.

A microbacia D é caracterizada por divisores d'água com topos abaulados, isto é, trechos com faces íngremes e exposição de paredes rochosas e trechos com faces pouco íngremes à arredondadas. Escorregamentos são registrados em setores de vertentes retilíneas íngremes, próximos aos topos. Há destaque para as formas de vertentes retilínea-côncavas. Ocorrem formas convexas em alguns segmentos próximos aos topos abaulados e nos segmentos das baixas vertentes, onde são registrados contatos abruptos com o fundo de vale, definidos preferencialmente pela existência de rochas. Os depósitos de vertente são expressivos nos médios e baixos compartimentos da microbacia. Suavizam os contatos das baixas vertentes com o fundo do vale, caracterizando as vertentes côncavas. Pontos de ressurgência de água subsuperficial são registrados, predominantemente, em setores de vertente côncava, próximos aos contatos desses depósitos com a rocha alterada, DOMINGUES e FURIAN³.

Os terrenos mais íngremes da microbacia D, dispersos espacialmente e predominantemente localizados próximos aos divisores d'água, apresentam declividades entre 58% a 97% (Figura 8).

³ DOMINGUES, E. N. & FURIAN, S. M. Geomorfologia (Texto apresentado no 1º Curso Internacional sobre Manejo Florestal em Bacias Hidrográficas, realizado no Instituto Florestal, São Paulo, 1995).

Figura 5. Mapa de compartimentação altimétrica da microbacia B.

Figura 6. Mapa de compartimentação altimétrica da microbacia D (Fonte: CARVALHO et al., 1990).

Figura 7. Mapa das classes de declividades da microbacia B.

Figura 8. Mapa das classes de declividades da microbacia D (Fonte: CARVALHO et al., 1990).

Um resumo das características físicas das duas microbacias consta da Tabela 3.

Tabela 3. Características físicas das microbacias B e D.

Característica	Microbacia	
	B	D
Área (ha)	36,68	56,04
Comprimento do rio principal (m)	920,00	1260,00
Comp. total dos rios (m)	920,00	1550,00
Densidade de drenagem (Km/km ²)	2,51	2,77
Declividade do canal (%)	6,6	7,1
Perímetro (m)	2750,00	3450,00
Fator de forma	0,433	0,353
Declividade média da bacia (%)	25,8	28,1

3.1.3. Geologia e solos

A estrutura geológica da área faz parte do Complexo Cristalino, do Período Pré-cambriano. Contém granitos miloníticos, gnaisses, xistos cristalinos

(micaxistos, quartzoxistos), granitos e diabásios básicos de intrusão parcial na era Mesozóica (JICA, 1980).

Segundo FURIAN⁴, os migmatitos são as rochas mais comuns nesse meio e apresentam xistosidade forte, textura variando de fina a grosseira, definindo fácies mais quartzosas e outras mais micáceas.

Os solos da região são predominantemente Latossolos e Cambissolos Álicos. FURIAN & PFEIFER (1986) classificam os solos do Núcleo Cunha como Latossolo Vermelho Amarelo Fase Rasa, provenientes de rochas duras, orientadas e de difícil decomposição, como gnaisses, migmatitos e granitos.

São solos quimicamente pobres, ácidos e relativamente rasos, com textura grosseira, estrutura fraca, elevada porosidade e boa permeabilidade. São susceptíveis a erosão e também a escorregamentos, quando da ocorrência de chuvas de grande frequência e intensidade.

O levantamento de reconhecimento detalhado dos solos da microbacia D, realizado por CARVALHO et al. (1990), identificou na área o predomínio de Latossolos Vermelho Amarelo, num total de nove classes. Há ainda dois tipos de solos Gleizados e dois tipos de solos Aluviais.

Os Latossolos originam-se da decomposição de gnaisses. Apresentam textura variando de argilosa à média. A porosidade total média dos horizontes A e B são 44,4% e 41,7%, respectivamente. O horizonte C, quando presente, apresenta porosidade média de 46,7%. A densidade real destes horizontes são: 2,40; 2,50; 2,70 g/cm³, respectivamente.

Nas áreas com declividades superiores a 58% os solos são Latossolos Vermelhos Álicos pouco profundos e muito pedregosos, mais solos litólicos em terrenos escarpados.

⁴ FURIAN, S.M. Morfogênese e pedogênese em meio tropical úmido: uma contribuição ao estudo de processos atuais de vertentes, (Trabalho apresentado ao 49º Congresso Latino Americano de Geografia, Havana, 1995).

Os solos Aluviais, presentes nas porções inferiores da microbacia, são provenientes de material não consolidado, de deposição recente. Apresentam-se em camadas estratificadas compostas de materiais argilosos, arenosos ou siltsos, dispostos uns sobre os outros, não havendo seqüência preferencial na superposição.

Os Aluviais Distróficos apresentam horizonte A moderado e textura indiscriminada. São profundos, com características variando muito ao longo do perfil. Possuem coloração clara, em relevo plano ou quase plano e declividades bem suaves. Situam-se nas planícies e fundo de vales, formando os terraços dos rios.

Os Aluviais Eutróficos Epidistróficos diferem do anterior na porcentagem de saturação de bases.

Os solos gleizados são diferenciados em Glei Húmico Indiscriminado e Glei Pouco Húmico Distrófico.

O primeiro constitui solos de várzea, normalmente com relevo plano, pouco profundo com características associadas à encharcamentos, redundando em acumulação de matéria orgânica na primeira camada ou fenômeno de redução nas camadas subjacentes. Apresenta pequena expressão espacial na área da microbacia D.

O solo Glei Pouco Húmico Distrófico se diferencia do anterior por apresentar um horizonte diagnóstico A moderado (menor teor de matéria orgânica no horizonte superficial) e também pela melhor drenagem, permanecendo encharcado por um menor período de tempo durante o ano.

A distribuição lateral e vertical de materiais do solo de uma toposeqüência da microbacia D analisada por FURIAN⁵, mostra a organização dos horizontes do solo, salientando um horizonte argiloso de estrutura

⁵ FURIAN, S.M. Morfogênese e pedogênese em meio tropical úmido: uma contribuição ao estudo de processos atuais de vertentes. (Trabalho apresentado ao 49º Congresso Latino Americano de Geografia, Havana, 1995).

microagregada que se desenvolve sobre um horizonte argilo-siltoso de estrutura maciça em forma de língua, com uma variação abrupta da porosidade entre estes horizontes. A macroporosidade do horizonte argiloso é de 31,6% enquanto a do horizonte argilo-siltoso é de 9,5%, verificando sobre este contato uma zona preferencial de circulação lateral de água em direção à jusante da vertente, responsável por escorregamentos de solo para eventos chuvosos de grande magnitude. A movimentação lateral de água na vertente ocorre em diferentes pontos, incluindo as porções de meia vertente e áreas à jusante destas.

FURIAN observou também outra zona de circulação lateral de água, em profundidade, no contato do material de alteração e da rocha menos alterada. Este material de alteração, nesse contato, é arenoso, com uma porosidade intersticial, inter-granular bastante desenvolvida.

Algumas áreas da microbacia D apresentam grande variação de condutividade hidráulica entre os horizontes A e B do perfil do solo, conforme informações contidas em estudos desenvolvidos por CARVALHO et al. (1992). Na base de uma vertente da microbacia constatou-se uma permeabilidade do solo da ordem de 0,01 - 0,001 cm/s para o horizonte A e de 0,001 - 0,00001 cm/s para o horizonte B.

Ainda, conforme FURIAN⁶, os trabalhos preliminares de levantamento de solos na microbacia B indicaram a presença dos mesmos tipos de solos encontrados na microbacia D.

⁶ FURIAN, S. M. (USP. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, São Paulo) Comunicação Pessoal, 1996.

3.1.4. Clima

Massas de ar equatoriais e tropicais imprimem à área uma dinâmica climática caracterizada por um clima úmido, com fortes influências da altitude e dos efeitos orográficos da Serra do Mar (FURIAN, 1987).

A região onde se localiza a área de estudo, isto é, as porções altas das encostas da Serra do Mar voltados para o Oceano Atlântico, apresentam precipitações anuais elevadas, normalmente superiores a 2000 mm.

No Núcleo Cunha, a precipitação média anual de 12 anos, período compreendido entre outubro de 1982 a setembro de 1994, é de 2241 mm, com valores extremos de 1985 mm e 3088 mm (Figura 9). O máximo valor anual obtido foi decorrente de uma precipitação que houve entre os dias 23 e 24 de janeiro de 1985, totalizando 430 mm em 24 horas.

Com relação as chuvas locais, o ano pode ser dividido em um período caracterizado como úmido, que se estende de outubro a março (estação chuvosa) e um período caracterizado como seco ou pouco úmido, compreendendo os meses de abril a setembro. O mês mais chuvoso é janeiro e os meses mais secos são junho, julho e agosto (Figura 10).

A variação da precipitação mensal de ano para ano é bastante significativa. O quociente entre as precipitações mensais máxima e mínima para os meses de janeiro e fevereiro são 5,2 e 9,1, respectivamente e demonstram uma grande flutuação das chuvas mensais.

Os tipos de precipitação do local são distintos em função da época do ano. As chuvas no período úmido são frequentemente fortes e podem estar associadas a trovoadas, enquanto na estação seca ocorrem chuvas uniformes que podem se estender por todo o dia (JICA, 1986).

Figura 9. Precipitação anual no L.H.F.E.A. Walter Emmerich.

Figura 10. Precipitação mensal no L.H.F.E.A. Walter Emmerich.

A temperatura média anual do ar é de 16,5 °C (média de 10 anos). As maiores temperaturas ocorrem em fevereiro, sendo julho o mês mais frio (Figura 11). Valores negativos podem ser registrados em alguns dias, durante os meses de junho e julho. As temperaturas médias de inverno e de verão estão em torno de 10 °C e 22 °C, respectivamente.

Figura 11. Temperatura mensal do ar no L.H.F.E.A. Walter Emmerich.

A umidade relativa média mensal do ar está entre 80% a 85% na estação chuvosa, sendo inferior a 80% para o restante do ano. Os ventos locais são fracos, sendo a frequência de dias calmos correspondente a 50% de todo o tempo (JICA, 1986).

A ocorrência de nevoeiros densos é frequente. Normalmente iniciam-se no começo da tarde, estendendo-se noite adentro, envolvendo todo o Núcleo.

3.1.5. Vegetação

LEITÃO FILHO (1982) classifica a vegetação natural primária da região como Floresta Latifoliada Perenifolia - Mata Atlântica.

A maior parte desta mata foi substituída por pastagens e culturas anuais, ou sofreu exploração para produção de madeira e carvão, permanecendo apenas uma floresta secundária em fase de recuperação. A vegetação primitiva é encontrada ainda nas encostas declivosas de difícil acesso e nos topos de morros.

As microbacias apresentam cobertura vegetal natural secundária, resultado de exploração madeireira ocorrida há aproximadamente 45 anos. Cerca de 15% a 20% da microbacia D, principalmente nas porções inferiores, teve campos de pastos até 12 anos atrás, sendo tais áreas invadidas por vegetação pioneira da região. Nas porções mais elevadas e de maior declividade, em ambas as microbacias, encontram-se árvores remanescentes da vegetação primitiva, que podem alcançar 20 metros de altura. Para o restante da vegetação das microbacias raramente as árvores ultrapassam esta altura.

Levantamento florístico conduzido na microbacia D amostrou 102 espécies arbóreas e/ou arbustivas, pertencentes a 65 gêneros e 38 famílias, das quais se destacam Myrtaceae (12), Lauraceae e Solanaceae (10), Asteraceae (9) e Melastomataceae (7). Os gêneros mais importantes são: *Ocotea*, *Solanum* e *Miconia*, AGUIAR⁷ et al.

⁷ AGUIAR, O. T.; PASTORE, J. A.; BAITELLO, J. B.; ROCHA, E. T. (Instituto Florestal, São Paulo) Flora Fanerogâmica de um trecho de mata secundária no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha (SP) (Em elaboração).

3.2. Metodologias

3.2.1. Monitoramento hidrológico

As microbacias B e D vêm sendo monitoradas desde 1986 e 1982 respectivamente, por meio de medições contínuas da precipitação pluviométrica e do deflúvio.

Quatro pluviógrafos medem a precipitação na microbacia D. Três deles estão instalados em clareiras ao longo do curso d'água principal. O quarto aparelho está localizado no ponto de maior altitude da área. A microbacia B conta com três pluviógrafos.

Os pluviógrafos são do tipo caçamba, modelo B400, da NAKAASA Corporation. Cada caçamba tem capacidade de 0,5 mm. São alimentados por bateria de 7,5 volts e operam com carta de registro de duração mensal ou trimestral.

Para a medição do deflúvio construíram-se estações linimétricas no ponto mais a jusante do curso d'água das microbacias.

A estação da microbacia B é constituída de dois tanques de sedimentação e um vertedouro triangular de ferro de 90° (Figura 12). A estação da microbacia D é composta de um tanque de sedimentação e um canal trapezoidal aberto, regulador do fluxo d'água (Figura 13).

Linígrafos do tipo flutuador, modelo WR-11Z, da NAKAASA Corporation, de precisão igual a 0,5 cm, alimentados por conjunto de baterias de 7,5 volts, com carta de registro de duração mensal, foram instalados e medem continuamente as variações da altura da lâmina de água nos vertedouros.

A conversão dos valores de altura da lâmina da água em descarga das microbacias B e D é realizada por meio da curva chave dos vertedouros, determinadas empiricamente (equações 1 e 2), respectivamente:

$$Q = 0,0180.(H)^{2,4887} \dots\dots\dots \text{Equação 1}$$

$$Q = 2,9148.(H)^{1,6983} \dots\dots\dots \text{Equação 2}$$

onde,

Q = descarga (vazão) em litros/segundo;

H = altura da lâmina da água em centímetros.

O ano hídrico adotado para Cunha compreende o período de outubro a setembro (CICCO et al., 1985a).

A coleta de dados abrange um período de 6 anos, estendendo-se de outubro de 1986 a setembro de 1992.

Figura 12. Estação fluviométrica da microbacia B.

Figura 13. Estação fluviométrica da microbacia D.

3.2.2. Balanço hídrico

Considerando que as microbacias hidrográficas B e D não apresentam vazamentos de água através do substrato rochoso, não haja entrada de água das áreas vizinhas, e que não esteja ocorrendo fluxo de água para fora das bacias experimentais, o balanço hídrico pode ser determinado pela equação:

$$P = Q + ET \pm \Delta S \dots\dots\dots \text{Equação 3}$$

onde,

P = quantidade de precipitação (mm);

Q = deflúvio (mm);

ET = evapotranspiração (mm);

ΔS = variação de armazenamento (mm).

Tomando o período de 12 meses do ano hidrológico, ΔS tende a zero, e a equação acima fica simplificada (equação 4), sendo utilizada para a determinação do balanço hídrico anual.

$$P = Q + ET \dots\dots\dots \text{Equação 4}$$

Na determinação da precipitação de cada microbacia foi calculada a média aritmética de seus pluviômetros.

3.2.3. Comparação das características do deflúvio das microbacias B e D

3.2.3.1. Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário

Os dados de descarga diária das duas microbacias foram agrupados em classes de intervalos bem distribuídos, variando da menor para a maior vazão. O número de vezes que as descargas diárias enquadraram-se em cada uma das classes foi computado e somado. O total de dias em cada classe foi acumulado, começando pela classe de descarga mais elevada; o valor final acumulado na menor classe igualou-se ao número total de dias do período. Dividindo-se o valor acumulado em cada classe pelo número total de dias do período, obteve-se o percentual de tempo em que a vazão diária igualou-se ou excedeu a magnitude indicada.

Plotando-se em papel monologarítmico os valores de descarga nas ordenadas, contra o valor percentual de tempo correspondente no eixo das abcissas, obteve-se as curvas de duração de fluxo das microbacias.

Determinou-se as curvas de duração de fluxo para o ano hídrico completo e também para os períodos seco e chuvoso, separadamente.

3.2.3.2. Escoamento direto

Correlações entre o volume de escoamento direto gerado nas microbacias e a quantidade de chuva que o originou foram analisadas graficamente, para os períodos úmido e seco.

A resposta hidrológica das microbacias à estas chuvas foram comparadas em termos dos coeficientes do deflúvio; quociente entre o

escoamento direto e o escoamento total do hidrograma; e o quociente entre o escoamento direto e a precipitação que o gerou.

Para tanto, foram selecionados oitenta e oito hidrogramas produzidos por chuvas de diferentes magnitudes ocorridas no período.

A obtenção dos volumes de escoamento direto foi feita pela análise dos hidrogramas, com a separação dos componentes escoamento base e escoamento direto. Para a separação dos componentes foi adotado o procedimento apresentado em JICA (1986), um método do ponto de mudança rápida no gradiente, conforme Figura 14.

Figura 14. Separação dos escoamentos direto e base dos hidrogramas (JICA, 1986).

A porção do hidrograma acima do segmento de linha AA' corresponde ao escoamento direto em resposta a chuva, enquanto a parte inferior do hidrograma refere-se à contribuição do escoamento base.

Por intermédio da equação da "Área Mínima de Contribuição"

$$MCA = (Qd/P).Ac,$$

utilizada por WATERLOO (1994) e por SCARDUA (1994), estimou-se as áreas produtoras de escoamento direto de cada microbacia para os oitenta e oito hidrogramas selecionados, estudando os resultados em função da quantidade de precipitação e da época do ano.

3.2.3.3. Pico de vazão

As taxas de pico de vazão das microbacias B e D foram analisadas por intermédio de curvas de frequência relativa acumulada para as estações seca e úmida, definidas a partir da descarga máxima instantânea, em litros por segundo, de quatrocentos hidrogramas selecionados nos seis anos.

3.2.4. Equações de predição (calibragem)

Pelo método das bacias hidrográficas pareadas, características do deflúvio das microbacias foram correlacionadas por meio de análise de regressão, resultando na determinação de equações de predição.

A microbacia D foi considerada como "controle" no estudo, sendo as características do deflúvio oriundas dela as variáveis de predição. As características da microbacias B compuseram as variáveis resposta.

Assim, os totais anuais e mensais do deflúvio da microbacia D, além do volume de escoamento direto e dos picos de vazão dos oitenta e oito hidrogramas selecionados, foram correlacionados com estas mesmas características da microbacia B.

Outras características hidrológicas e climáticas também foram testadas como variáveis de predição.

Para as regressões do deflúvio mensal e anual, serviu-se da quantidade de precipitação dos respectivos períodos, além da diferença entre a precipitação das duas microbacias. A evapotranspiração potencial da área, calculada pelo método de THORNTHWAITE & MATTER (1955), também foi testada para ambos os casos.

Para as equações do escoamento direto e do pico de vazão as seguintes características foram empregadas: 1) a quantidade de precipitação que provocou o hidrograma; 2) a diferença entre as precipitações nas duas bacias; 3) a precipitação de cada um dos cinco primeiros dias que antecederam à ocorrência do hidrograma; 4) o total de precipitação dos cinco primeiros dias antecedentes ao hidrograma; 5) a intensidade máxima da precipitação do evento no intervalo de uma hora; e 6) o deflúvio antecedente, que refere-se a vazão no início da ascensão de cada hidrograma.

A Figura 15 ilustra os principais componentes dos hidrogramas e das precipitações empregadas na calibragem do escoamento direto e do pico de vazão.

Figura 15. Componentes dos hidrogramas e das precipitações empregados na calibragem do escoamento direto e do pico de vazão.

As características hidrológicas adotadas como variáveis resposta, bem como as testadas como variáveis de predição nas análises de regressão para definição dos modelos de calibragem das microbacias estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 4. Variáveis resposta e de predição utilizadas nas análises de regressão para calibragem das microbacias B e D.

Característica hidrológica		
Variável resposta	Variável de predição	
Deflúvio anual, mensal ($Q_{a,m}B$)	Deflúvio da bacia D	($Q_{a,m}D$)
	Precipitação da bacia D	($P_{a,m}D$)
	Evapotranspiração potencial (*)	($ET_{a,m}$)
	Diferença entre precipitação das bacias D e B	($PD - PB_{a,m}$)
Escoamento direto (EdB) e Pico de Vazão (PvB)	Escoamento direto da bacia D	(EdD)
	Pico de vazão da bacia D	(PvD)
	Precipitação da bacia D	(PD)
	Diferença entre as precipitações das bacias D e B	($PD - PB$)
	Precipitações dos 5 primeiros dias antecedentes aos hidrogramas da bacia D	($P_{1,2,3,4,5}, Pt$)
	Intensidade máxima da chuva da bacia D	(IhD)
	Vazão antecedente da bacia D	(VaD)

Subscritos "a" e "m" significam período anual e mensal, respectivamente;

(*) evapotranspiração calculada pelo método de THORNTHWAITE & MATTER (1955).

Os modelos de regressão empregados na calibragem foram a regressão linear simples e a regressão linear múltipla.

Em função do reduzido número de observações usado para definir o modelo de predição do deflúvio anual, isto é apenas 6, selecionou-se as variáveis de predição baseando-se somente no procedimento da inclusão das variáveis uma a uma à equação. Para os demais modelos a seleção foi feita também em função da análise de resíduos.

Para assegurar uma precisão adequada, incluiu-se nas equações apenas as variáveis de predição com nível de significância dos coeficientes "b" superior a 0,05. O mesmo procedimento foi adotado para o coeficiente "a".

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Balanço hídrico

Para verificar a homogeneidade dos dados de precipitação anual nas microbacias, isto é, para avaliar se houve alguma anormalidade no período que possa influenciar a comparação do balanço hídrico e a realização da calibragem anual, determinou-se a curva de dupla massa deste parâmetro hidrológico (Figura 16).

Uma avaliação visual da figura sugere uma elevada consistência da precipitação entre as duas áreas. Os dados acumulados da precipitação anual de uma bacia versus os dados acumulados da mesma variável da outra bacia alinham-se linearmente, não havendo qualquer alteração da inclinação da reta que poderia ser causada por mudanças na relação entre as variáveis.

Portanto, as duas microbacias apresentam registros anuais de precipitação com adequada consistência para a realização de estudos hidrológicos comparativos. Também, não se detecta qualquer mudança natural de comportamento entre as duas microbacias ano após ano, fato importante para a calibragem anual.

Figura 16. Curva de dupla massa da precipitação anual das microbacias B e D.

A distribuição das precipitações anuais das microbacias está presente na Figura 17.

A microbacia D apresenta precipitação ligeiramente superior, não excedendo mais que 12% da precipitação da microbacia B. As médias anuais durante o período são 2159 mm e 2013 mm, respectivamente.

Observa-se uma grande variação entre anos úmidos e anos mais secos, com uma amplitude de 737 mm para a microbacia D e 515 mm para a microbacia B. O desvio padrão da média para a precipitação da microbacia B é de 201 mm e para a microbacia D é 272 mm, correspondendo a 10% e 13% dos valores médios anuais respectivamente.

A diferença de precipitação entre as duas microbacias é explicada, parcialmente, pela localização das áreas em relação à proximidade do oceano e

também em função dos efeitos orográficos da Serra do Mar. A microbacia D está localizada próxima do limite da Serra do Mar com o Planalto Atlântico. Conseqüentemente, esta bacia sofre intensamente os efeitos orográficos da Serra do Mar, recebendo diretamente massas de ar carregadas de umidade vindas do oceano. A microbacia B, ao contrário, está situada mais no interior do Planalto Atlântico. Nesta área, seu limite se faz com a bacia do rio Bonito, sendo os efeitos orográficos menos acentuados.

Figura 17. Precipitação anual das microbacias B e D.

Em comparação com um período mais prolongado de registro de chuvas da microbacia D (Figura 9), verifica-se que durante a pesquisa não há qualquer ano atípico, como o ano hídrico de 1984/85, excessivamente úmido. Excluindo este ano, a média e o desvio padrão dos 6 anos de abrangência do estudo (2159 mm; 271,5 mm) e do período total de registro de chuvas da microbacia D

(2132 mm; 257,3 mm) são praticamente os mesmos. Portanto, o período de outubro de 1986 a setembro de 1992 é representativo da pluviosidade média da área experimental.

Da mesma forma que para a precipitação, o deflúvio da microbacia D é ligeiramente superior ao da microbacia B, excedendo-o em 7%. Os valores médios anuais durante o experimento são 1555 mm e 1473 mm (Figura 18).

Figura 18. Deflúvio anual das microbacias B e D.

As variações sazonais da precipitação e do deflúvio em ambas as áreas, expressas como percentual da precipitação e do deflúvio mensal acumulados, são ilustradas nas Figuras 19 e 20.

Aproximadamente 65% da precipitação ocorre durante a estação úmida, com o restante das chuvas alcançando as bacias no período seco.

Quanto ao deflúvio, não há grande diferença no montante de água que deixa as bacias entre as duas épocas do ano. Cerca de 55% do volume total de

água deixa as microbacias na estação das chuvas e 45% no período de menor precipitação.

Figura 19. Precipitação e deflúvio mensal médio acumulados, expressos como percentuais dos totais anuais da microbacia B.

Figura 20. Precipitação e deflúvio mensal médio acumulados, expressos como percentuais dos totais anuais da microbacia D.

Janeiro é o mês mais úmido, com uma precipitação média entre 290 mm e 310 mm. O mês mais seco é agosto, com uma pluviosidade média de 70 mm (Figura 21). Com relação ao deflúvio, os meses de janeiro a março são responsáveis por 70% do volume total escoado na estação das chuvas (Figura 22).

Figura 21. Precipitação mensal média das microbacias B e D.

Figura 22. Deflúvio mensal médio das microbacias B e D.

As quantidades anuais de água evapotranspirada das áreas experimentais constam da Figura 23. Os valores médios são de 539 mm para a microbacia B e 603 mm para a microbacia D. É observado uma grande variação de ano para ano, com desvio padrão da média da ordem de 20%.

Figura 23. Evapotranspiração anual das microbacias B e D.

Há uma clara tendência de aumento do deflúvio anual com a precipitação. Estes dois componentes do balanço hídrico são altamente correlacionados para as duas microbacias, como expresso pelos elevados coeficientes de correlação (r) de 0,92 (microbacia B) e 0,90 (microbacia D).

O deflúvio e a precipitação anual das microbacias são relacionados linearmente pelas equações apresentadas a seguir, com a representação gráfica desta relação presente nas Figuras 24 e 25.

$$QB = -805,3936 + 1,1321.(PB) \quad (r^2 = 0,8072); e$$

$$QD = -415,8160 + 0,9130.(PD) \quad (r^2 = 0,8065)$$

A evapotranspiração, por outro lado, mostra-se pouco correlacionada com a precipitação, isto é, não se percebe qualquer tendência de comportamento entre a entrada de água e as perdas evaporativas anuais (Figuras 26 e 27). Os coeficientes de correlação não superam o valor de 0,24 (microbacia B).

Figura 24. Relação entre a precipitação e o deflúvio anual da microbacia B.

Figura 25. Relação entre a precipitação e o deflúvio anual da microbacia D.

Figura 26. Relação entre a precipitação e a evapotranspiração anual da microbacia B.

Figura 27. Relação entre a precipitação e a evapotranspiração anual da microbacia D.

Uma síntese do balanço hídrico das microbacias é produzida na Tabela 5.

Em decorrência das baixas taxas evaporativas, da ordem de 30%, a produção hídrica na área é bastante elevada, com cerca de 70% de toda a água que chega às microbacias pelas chuvas contribuindo para o deflúvio anual.

Tabela 5. Balanço hídrico médio anual das microbacias B e D.

	mm +/- Sx	Porcentagem do total (%)
Microbacia B		
Precipitação	2012,8 +/- 201,0	100,0
Deflúvio	1473,3 +/- 247,4	73,2
Evapotranspiração	539,5 +/- 100,7	26,8
Microbacia D		
Precipitação	2158,6 +/- 271,5	100,0
Deflúvio	1555,1 +/- 276,0	72,0
Evapotranspiração	603,5 +/- 123,7	28,0

As reduzidas perdas evaporativas das microbacias são confirmadas pela estimativa da evapotranspiração potencial da microbacia D, obtida pelo método de THORNTHWAITE & MATTER (1955), a partir de 10 anos de dados, período compreendido entre outubro de 1982 a setembro de 1992 (Tabela 6). A evapotranspiração anual média de 757 mm corresponde a 33% da precipitação, portanto de uma ordem de grandeza bastante próxima da evapotranspiração estimada pelo método da bacia hidrográfica. Assim, pode-se inferir que as condições climáticas da região de Cunha são favoráveis para que as taxas de evapotranspiração local sejam baixas. Temperaturas pouco elevadas em boa parte

do ano, alto teor de umidade relativa do ar e presença de nevoeiros intensos são fatores que devem contribuir para tal comportamento.

Tabela 6. Temperatura do ar, evapotranspiração potencial (THORNTHWAITE & MATTER, 1955) e precipitação da microbacia D.

Mês	Temperatura (°C)	Evapotranspiração potencial (mm)	Precipitação (mm)
outubro	16,2	63	167
novembro	17,9	76	193
dezembro	18,7	87	285
janeiro	20,1	97	351
fevereiro	19,8	82	248
março	19,4	83	298
abril	17,4	63	210
maio	15,2	49	122
junho	12,9	35	74
julho	12,2	34	82
agosto	13,2	40	68
setembro	14,4	48	178
Total	-	757	2276

Comparativamente à maior parte dos resultados obtidos em regiões tropicais, a evapotranspiração das microbacias B e D é significativamente menor.

Porém, em relação àquelas florestas que BRUIJNZEEL (1990) chamou de "cloud forests", a evapotranspiração das duas microbacias é superior, embora os menores consumos de água registrados em Cunha, 378 mm na microbacia B e 457 mm na microbacia D, estão muito próximos dos valores apresentados para estes tipos de florestas, que assim como Cunha, estão sujeitas à nevoeiros densos.

Pode-se depreender face aos resultados obtidos que a vegetação das microbacias B e D utiliza água de forma bastante conservativa, quando comparadas com grande parte das florestas tropicais e florestas temperadas de clima úmido.

4.2. Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário

As curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D para o período de 6 anos hídricos estão presentes na Figura 28. Para 80% do tempo o deflúvio das microbacias é inferior a 6,0 mm. A microbacia D apresenta um ligeiro predomínio sobre a microbacia B para os fluxos com valores inferiores a 6,0 mm. Esta condição representa o deflúvio produzido principalmente pelo escoamento base das microbacias. Para fluxos superiores a 6,0 mm as curvas apresentam uma inclinação bastante acentuada, refletindo, conforme SEARCY (1959) explica, uma contribuição significativa do escoamento direto sobre o fluxo diário. Para 10% a 15% do tempo de fluxo, os valores máximos diários do deflúvio da microbacia B superam os da microbacia D, indicando uma maior proporção do volume de escoamento direto na primeira microbacia.

Figura 28. Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D para o período anual.

A contribuição do escoamento de base para o deflúvio diário das duas microbacias durante o período seco (Figura 29) é significativamente maior quando comparada com a contribuição do período úmido (Figura 30). Cerca de 92% do tempo de todo o fluxo corresponde ao escoamento de base; apenas 8% do tempo deve-se ao escoamento direto das microbacias. Ao contrário do período úmido, no qual a participação do escoamento direto é superior na microbacia B, as duas áreas apresentam uma frequência de ocorrência igual para os grandes fluxos diários.

Um resumo das principais características das curvas de duração de fluxo é apresentado na Tabela 7.

O deflúvio médio diário das microbacias B e D para o período seco são 3,4 mm e 3,8 mm respectivamente, equivalendo a 32,9% e 44,5% do tempo de

escoamento. Os respectivos deflúvios medianos para o mesmo período são 2,7 mm e 3,3 mm, correspondendo a 50% do tempo de fluxo. Para o período úmido as médias são ligeiramente superiores, com valores iguais a 4,7 mm e 4,8 mm, isto é 42,5% e 45,7% do tempo de escoamento. As medianas são 3,1 mm e 3,6 mm, respectivamente.

Estes valores são bastante significativos. Uma comparação com os resultados encontrados por SCARDUA (1994) na microbacia Tinga, reflorestada com eucaliptos, permite afirmar que as microbacias B e D apresentam elevado fluxo de escoamento diário. Enquanto o deflúvio médio diário na primeira bacia é de apenas 1,5 mm, a microbacia D possui um fluxo 2,9 vezes superiores a este, isto é, 4,3 mm. Ainda, este fluxo permanece bastante alto por todo o ano, com o escoamento médio diário no período seco sendo de 3,8 mm. O deflúvio mediano, que equivale a 50% do tempo na curva de duração de fluxo, corresponde a 1,3 mm na microbacia Tinga. Já na microbacia D, o montante é muito maior, de 3,4 mm. Também, o deflúvio mediano no caso da microbacia D é praticamente o mesmo, seja no período seco ou no período úmido, isto é da ordem de 3,0 mm.

Os resultados, significativamente dispares entre as duas localidades, deve-se, dentre outros fatores, ao regime pluviométrico distinto entre as áreas e às taxas de evapotranspiração.

Enquanto em Itatinga a precipitação média anual é de apenas 1635 mm, na microbacia D a média é de 2158 mm. Por outro lado, as perdas evaporativas são amplamente superiores na microbacia Tinga, da ordem de 1084 mm anuais, contra apenas 603 mm em Cunha.

Assim, o elevado índice pluviométrico, associado a reduzidas perdas evaporativas, proporcionam às microbacias de Cunha elevada quantidade de água armazenada no solo, com uma gradual liberação para os cursos d'água durante todo o ano.

Figura 29. Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D para o período seco.

Figura 30. Curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D para o período úmido.

Tabela 7. Valores característicos das curvas de duração de fluxo do deflúvio diário das microbacias B e D.

Período	Microbacia	Média	Mediana	Deflúvio diário	
				Máximo	Mínimo
mm					
Seco	B	3,4	2,7	93,9	1,1
	D	3,8	3,3	54,9	1,3
Úmido	B	4,7	3,1	114,3	1,2
	D	4,8	3,6	133,1	1,7
Total	B	4,0	2,9	114,3	1,1
	D	4,3	3,4	133,1	1,3

4.3. Escoamento direto

As Figuras 31 e 32 contém os hidrogramas das microbacias B e D provocados por precipitações ocorridas nos dias 27 de janeiro de 1987 e 15 de fevereiro de 1988, respectivamente.

Os hidrogramas mostram que as duas microbacias apresentam a elevação quase que imediata do deflúvio em função das chuvas. Mostram também, o retorno rápido do deflúvio às vazões próximas das descargas

registradas no início dos eventos, não ultrapassando 20 horas após o princípio da hidrógrafa.

Assim, é uma característica das duas microbacias a saída de um grande volume de água do deflúvio num curto espaço de tempo, durante e imediatamente após as chuvas.

As chuvas ocorridas no dia 27, num total de 84,5 mm e 99,5 mm, proporcionaram escoamento direto de 46,9 mm e 22,2 mm nas microbacias B e D, respectivamente. Para o evento do dia 15, precipitações de 39,5 mm e 46,5 mm, geraram escoamento direto de 15,1 mm na microbacia B e 5,7 mm na microbacia D.

Desta forma, precipitações ligeiramente inferiores na microbacia B provocaram escoamento direto 2 a 3 vezes maiores que àqueles verificados na microbacia D.

A razão entre o escoamento direto e o escoamento total das microbacias B e D para os hidrogramas do dia 27 são 0,85 e 0,74, respectivamente. Para o dia 15 os valores deste coeficiente são 0,77 e 0,60. Assim, uma elevada proporção do deflúvio total deixam as bacias como escoamento direto.

O quociente entre o escoamento direto e a precipitação para os dois eventos foram 0,56 e 0,38 para a microbacia B e 0,22 e 0,12 para a microbacia D.

Estes valores indicam que a microbacia B responde mais intensamente às chuvas, onde até 56% da precipitação deixa a bacia na forma de escoamento direto, contra 22% para a microbacia D.

As tendências acima mostradas pelos dois hidrogramas são confirmadas para o conjunto de hidrógrafas analisado neste estudo, como é mostrado a seguir.

Figura 31. Hidrogramas das microbacias B e D ocorridos no dia 27 de janeiro de 1987.

Figura 32. Hidrogramas das microbacias B e D ocorridos no dia 15 de fevereiro de 1988.

O gráfico da Figura 33 inclui os valores percentuais do escoamento direto em relação ao fluxo total do deflúvio das duas microbacias. Observa-se que para 70% dos eventos amostrados o componente escoamento direto da microbacia B é proporcionalmente maior que o da microbacia D, isto é, o escoamento direto contribui com uma parcela maior para a geração do deflúvio na microbacia B que na microbacia D.

Figura 33. Contribuição percentual do escoamento direto para o escoamento total das microbacias B e D.

Algumas relações entre o escoamento direto das duas microbacias estão representadas nas Figuras 34 e 35.

Independentemente da época do ano, seca ou chuvosa, a microbacia B apresenta, em geral, valores de escoamento direto superiores aos da microbacia D, indicando que uma maior quantidade de água do deflúvio deixa a primeira bacia pelo escoamento rápido quando da ocorrência das chuvas.

Figura 34. Relação entre o escoamento direto das microbacias B e D no período seco

Figura 35. Relação entre o escoamento direto das microbacias B e D no período úmido.

A relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação que o gerou acentua que as microbacias possuem, de fato, um comportamento bastante diferenciado quanto a resposta hidrológica. Por exemplo, chuvas de até 50 mm que ocorrem durante o período seco na microbacia B provocam escoamento direto numa faixa de 10% a 35% da precipitação (Figura 36). Para a microbacia D este percentual raramente ultrapassa o valor de 10% (Figura 37). Para o período úmido isto é ainda mais evidente. Enquanto a microbacia B apresenta inúmeros eventos com percentuais do escoamento direto em relação a precipitação variando entre 30% a 60% (Figura 38), o escoamento direto da microbacia D raramente ultrapassa o valor de 30% da precipitação (Figura 39).

O volume de escoamento direto das microbacias B e D relaciona-se linearmente com a precipitação de acordo com as equações abaixo, sendo a representação gráfica destas relações mostrada nas Figuras 40 e 41.

$$EdB = -7,5078 + 0,4853.(PB) \quad (r^2 = 0,9217); e$$

$$EdD = -10,5387 + 0,4340.(PD) \quad (r^2 = 0,7985)$$

Figura 36. Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia B no período seco.

Figura 37. Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia D no período seco.

Figura 38. Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia B no período úmido.

Figura 39. Relação percentual entre o volume do escoamento direto e a precipitação da microbacia D no período úmido.

Figura 40. Representação gráfica da regressão linear entre a precipitação e o escoamento direto da microbacia B.

Figura 41. Representação gráfica da regressão linear entre a precipitação e o escoamento direto da microbacia D.

O fator de resposta médio das microbacias B e D, estimados a partir dos 88 hidrogramas, são 0,23 e 0,12, respectivamente. Isto é, o fator de resposta da microbacia B é duas vezes superior ao fator de resposta da microbacia D.

O valor ora estimado para a microbacia D é igual ao calculado por FUJIEDA et al. (1993), a partir de dados anuais de precipitação e de escoamento direto, ou seja, 0,115. Para a microbacia B, o fator de resposta médio estimado no presente trabalho é ligeiramente superior ao obtido por FUJIEDA e colaboradores, que foi de 0,180.

A partir desta observação, pode-se avaliar que, em média, um montante de 11% das precipitações que alcançam a microbacia D deixam a mesma de forma bastante rápida, em poucas horas ou em 2 a 3 dias. Por sua vez, entre 18% e 22% das precipitações deixam a microbacia B num intervalo de tempo bastante curto.

As áreas mínimas de contribuição do escoamento direto (MCA) para as duas bacias experimentais foram calculadas e representadas graficamente em função da quantidade de precipitação. Verifica-se o incremento das áreas produtoras de escoamento direto com o aumento das precipitações.

Durante o período seco, para o maior número de eventos chuvosos, não mais que 6 ha da microbacia D produzem escoamento rápido (Figura 42). A área de contribuição da bacia pode chegar a 37,5% da sua superfície, isto é, 21,0 ha. Na microbacia B, para o mesmo período, é comum que 7 a 11 ha da superfície determinem o escoamento direto, sendo que até 60% da área (23,5 ha) pode produzir a resposta rápida da bacia (Figura 43).

Na estação das chuvas as áreas que contribuem para a resposta rápida das bacias são mais significativas. As porções de terreno passíveis de formação do escoamento rápido na microbacia D representam até 60% da sua superfície total, sendo bastante freqüente que 11 a 16 ha da área participem na formação do hidrograma (Figura 44). Por outro lado, é muito comum que 11 a 18 ha da

microbacia B, correspondendo de 30% a 49% da superfície, proporcionem produção deste componente do deflúvio. Até 60% da microbacia (22 ha) pode gerar o deflúvio durante e imediatamente as chuvas (Figura 45).

O incremento das superfícies produtoras do escoamento direto observado entre os períodos seco e úmido deve-se, em parte, às condições de umidade antecedentes dos solos e ao volume de precipitação, como mencionado por HIBBERT & TROENDLE (1988).

A Tabela 8 contém a distribuição de frequência das precipitações dos eventos que provocaram os hidrogramas e também do total de precipitação ocorrido nos cinco dias anteriores ao evento, que pode ser adotado como um indicador das condições de umidade do solo nas microbacias.

Pode-se verificar que no período úmido as chuvas são de uma maior magnitude que no período seco. No primeiro caso, apesar de concentradas nas classes de precipitação entre 0 e 60 mm, há uma série de eventos com valores bastante superiores a estes. Por outro lado, no período seco 92% dos eventos concentram-se nas duas primeiras classes.

Do ponto de vista das condições de umidade dos solos, as microbacias encontram-se normalmente com maiores teores de umidade nas épocas de chuva que no restante do ano. Por exemplo, para 38% dos hidrogramas ocorridos na estação seca não há qualquer chuva nos cinco dias que antecedem os episódios. Por outro lado, apenas 6% dos eventos que ocorreram na estação úmida não têm chuvas nos cinco dias precedentes aos hidrogramas.

Figura 42. Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia D em função da precipitação no período seco.

Figura 43. Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia B em função da precipitação no período seco.

Figura 44. Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia D em função da precipitação no período úmido.

Figura 45. Área mínima de contribuição do escoamento direto da microbacia B em função da precipitação no período úmido.

Tabela 8. Distribuição de frequência das precipitações que provocaram os hidrogramas da microbacia B e das precipitações antecedentes.

Precipitação do evento			Precipitação antecedente		
Classe (mm)	Freq.	Freq. relativa	Classe (mm)	Freq.	Freq. relativa
Período seco					
0 - 30	14	0,56	- (*)	10	0,38
30 - 60	9	0,36	> 0 - 20	6	0,23
60 - 90	0	0	20 - 40	4	0,15
90 - 120	1	0,04	40 - 60	5	0,19
120 - 150	0	0	60 - 80	0	0
150 - 180	0	0	80 - 100	0	0
180 - 210	0	0	100 - 120	0	0
210 - 240	1	0,04	120 - 140	0	0
240 - 270	0	0	140 - 160	0	0
270 - 300	0	0	160 - 180	0	0
			180 - 200	1	0,04
Período úmido					
0 - 30	33	0,52	- (*)	4	0,06
30 - 60	19	0,30	> 0 - 20	22	0,35
60 - 90	5	0,08	20 - 40	14	0,22
90 - 120	3	0,05	40 - 60	7	0,11
120 - 150	2	0,03	60 - 80	10	0,16
150 - 180	0	0	80 - 100	2	0,03
180 - 210	1	0,02	100 - 120	1	0,02
210 - 240	0	0	120 - 140	1	0,02
240 - 270	0	0	140 - 160	1	0,02
270 - 300	1	0,02	160 - 180	0	0
			180 - 200	1	0,02

(*) - não houve chuva nos cinco dias que antecederam ao evento.

Os valores de área mínima de contribuição da microbacia D aqui estimados, são superiores aos 2,5 ha de terrenos situados ao longo dos canais, os quais mantêm-se permanentemente saturados e que, conforme FUJIEDA et al. (1993), são preponderantes na geração da resposta hidrológica desta microbacia às chuvas. Assim, outras superfícies devem também contribuir ativamente para a produção do escoamento direto.

As informações de ocorrência de: 1) redução da condutividade hidráulica entre os horizontes A e B do solo na base de vertentes, potencialmente indutora de fluxo subsuperficial de água na camada limite entre ambos horizontes; 2) fluxo lateral de água na interface de horizonte argiloso com o horizonte argilo-siltoso cuja macroporosidade é reduzida; 3) de fluxo lateral de água em zonas de contato da rocha mãe com o material de alteração e; 4) a presença de ressurgência de água subsuperficial em setores de vertentes côncavas, explicam, dentre as possíveis causas, a proporção bastante grande da área da microbacia D capaz de produzir escoamento direto.

O comportamento diferenciado da resposta hidrológica das microbacias B e D deve-se às condições fisiográficas distintas das duas áreas.

Um dos aspectos que concorrem para que a microbacia B apresente maior escoamento direto relaciona-se à inclinação de suas vertentes. Analisando os mapas de declividade das duas áreas, é possível verificar que na microbacia D os terrenos de maior inclinação, com declividades superiores a 25°, estão bastante dispersos na bacia, localizados principalmente nas porções mais elevadas, próximos aos divisores topográficos. Por outro lado, os terrenos mais íngremes da microbacia B encontram-se mais concentrados, ocupando desde as porções mais elevadas da bacia até áreas do terço inferior de vertentes. Em decorrência deste fato, é possível supor que há nesta bacia grandes extensões de terrenos contíguos com solos pouco profundos, localizados desde o topo até regiões mais próximas ao canal principal da bacia. Esta condição, sem dúvida, deve favorecer para que

os fluxos de água subsuperficial e superficial contribuam mais significativamente para o escoamento direto da microbacia B. Além disto, a presença de rupturas de declividade nestas vertentes, de declividades acentuadas para declividades mais brandas e também de rupturas de forma dos terrenos, tendem a reduzir a velocidade de fluxo do escoamento subsuperficial, provocando a saturação do solo, delimitando áreas potencialmente saturadas geradoras de escoamento superficial.

Também, os trabalhos de reconhecimento de campo, efetuados na microbacia B por FURIAN⁸, mostraram áreas extensas com solos pouco profundos e afloramentos de rochas alteradas nas porções inferiores da bacia, com o próprio canal fluvial principal escoando em grandes extensões sobre a rocha mãe. Ao contrário da microbacia D, que possui uma ampla planície aluvial com solos hídromórficos e aluviais, não foi observado a presença deste tipo de formação na microbacia B. Assim, enquanto as áreas próximas ao canal de deflúvio da microbacia B tendem a se saturar mais rapidamente e por conseguinte contribuir para a resposta rápida à uma dada chuva, as porções inferiores da microbacia D, principalmente no terço inferior de sua calha, tendem a armazenar mais água, liberando-a de forma mais lenta.

Ainda, alguns trechos da microbacia B em grandes altitudes, possuem terrenos cujos solos pouco desenvolvidos estão freqüentemente saturados e, portando, são potencialmente geradores de escoamento superficial saturado.

Considerando que o substrato rochoso da microbacia B é semelhante ao da microbacia D, isto é, migmatito, e que os mesmos solos são encontrados nas duas bacias, todos estes fatos expostos indicam que há uma propensão para que a microbacia B tenha uma dinâmica hídrica onde o escoamento direto seja mais significativo que na microbacia D.

⁸ FURIAN, S. M. (USP. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, São Paulo) Comunicação Pessoal, 1996.

Comparativamente a outros resultados, como os encontrados por SCARDUA (1994), as microbacias B e D apresentam a resposta hidrológica às chuvas, bem como área mínima de contribuição, significativamente maiores, conforme Tabela 9.

Tabela 9. Fatores de resposta e áreas mínimas de contribuição das microbacias experimentais D e Tinga.

Microbacia	Fator de resposta (escoamento direto / precipitação)			Área mínima de contribuição (ha)	
	máximo	mínimo	médio	máxima	mínima
Tinga	0,05	0,01	0,02	3,40	0,70
D	0,62	0,01	0,12	34,40	0,67

Com uma superfície de 68,2 ha a microbacia Tinga apresenta área de contribuição do escoamento direto que pode ser 10 vezes menor que a microbacia D. O fator de resposta médio da microbacia Tinga, estimado a partir de 29 hidrogramas, é 5 vezes inferior ao fator de resposta da microbacia D.

Esta grande diferença entre as duas bacias deve-se às precipitações e às características fisiográficas das áreas.

Como afirmado anteriormente, a região de Cunha apresenta índice pluviométrico bastante superior ao da localidade de Itatinga. Enquanto a precipitação média de todos os eventos analisados por SCARDUA (1994) foi apenas 31 mm, a média das precipitações da microbacia D foi 47 mm, sendo o valor máximo para cada uma das áreas igual a 105,8 mm e 306,5 mm, respectivamente.

Quanto às características fisiográficas, a microbacia D possui maior declividade, com encostas escarpadas, que podem alcançar até 97% de inclinação, além de solos pouco profundos e presença de afloramentos rochosos. A microbacia Tinga, por sua vez, apresenta relevo ondulado a suavemente ondulado, com terrenos de declividades bastante reduzidas, entre 10% a 15% , além de solos mais profundos.

Os fatores de resposta médio das microbacias B e D estão entre os maiores registrados em várias localidades.

O elevado índice pluviométrico, mais a presença de solos permeáveis não muito profundos, com transição abrupta de porosidade entre horizontes, estabelecidos sobre rochas graníticas de difícil decomposição, situados em terrenos declivosos com rupturas de inclinações acentuadas, imprimem às microbacias hidrográficas de Cunha uma grande capacidade de geração de escoamento direto, em grande parte devido ao fluxo subsuperficial lateral da água do solo.

Como o escoamento direto é responsável pela saída rápida de água de uma microbacia, além do transporte de materiais em suspensão como os sedimentos, deve ser salientado que tais bacias são bastantes susceptíveis às mudanças de uso do solo, devendo ser cuidadosamente manejadas, quando for o caso, para que não ocorra um incremento adicional da já bastante elevada resposta hidrológica.

4.4. Pico de vazão

As curvas de frequência relativa acumulada das taxas de pico de vazão das microbacias B e D, para os períodos seco e úmido, estão representadas nas Figuras 46 e 47.

Os picos de vazão de ambas as áreas não ultrapassam o valor de 25 l/s para 50% de todos hidrogramas.

Durante o período seco a média dos picos para a microbacia B é de 67 l/s, contra 50 l/s da microbacia D. Para o período úmido a microbacia D apresenta média de 147 l/s, contra 116 l/s na microbacia B.

Para a maior parte dos eventos, os picos de vazão da microbacia B tendem a superar os picos da microbacia D. No período seco, 70 % dos hidrogramas apresentaram valores maiores; no período úmido o percentual é da ordem de 60%.

Das características físicas das bacias hidrográficas apresentadas na Tabela 3 que podem influenciar as taxas de pico de vazão, apenas as áreas das bacias são significativamente diferentes. Porém, sendo a superfície da microbacia D maior que a da microbacia B, a primeira bacia deveria proporcionar maiores taxas de pico de vazão, o que não ocorre na maioria das vezes.

Um possível fator que deve predominar sobre as taxas de pico de vazão, fazendo com que para a maior parte dos hidrogramas a descarga máxima da microbacia B seja superior à da microbacia D, é o mesmo fator que influencia a quantidade de escoamento direto, ou seja, as extensas áreas contíguas de terrenos com declividades elevadas que existem na microbacia B e os solos mais rasos próximos a rede de drenagem desta área.

Percentual do pico de vazão excedendo a uma dada magnitude.

Figura 46. Curvas de frequência relativa acumulada das taxas de pico de vazão das microbacias B e D no período seco.

Percentual do pico de vazão excedendo a uma dada magnitude.

Figura 47. Curvas de frequência relativa acumulada das taxas de pico de vazão das microbacias B e D no período úmido.

Apesar da predominância dos picos de vazão da microbacia B sobre a microbacia D, os maiores picos de vazão registrados no período ocorreram na segunda área. Enquanto a microbacia D apresentou quatro eventos com valores superiores a 3500 l/s, sendo o valor máximo de 6426 l/s, a microbacia B teve um único evento desta magnitude, sendo de apenas 3746 l/s. Estes eventos foram influenciados pela maior quantidade de precipitação ocorrida na microbacia D em relação a microbacia B, uma vez que a intensidade das precipitações nas duas áreas foram bastante próximas (Tabela 10).

Ainda analisando esta tabela, constata-se que os maiores eventos foram resultados de chuvas de grande quantidade e intensidade e com a ocorrência de chuvas expressivas nos cinco dias que antecederam aos hidrogramas, fazendo com que os solos ficassem mais úmidos e, portanto, mais suscetíveis a geração dos picos mais expressivos.

A partir da plotagem dos dados de pico de vazão contra as quantidades das precipitações e as intensidades das chuvas que provocaram 88 hidrogramas, tem-se uma idéia da relação entre estes parâmetros hidrológicos das duas bacias hidrográficas, conforme as Figuras 48, 49, 50 e 51.

Os picos de vazão das microbacias B e D relacionam-se linearmente com as precipitações e as intensidades das chuvas conforme as equações:

$$PvB = -350,2738 + 7,4400.(PB) + 20.2586.(IB) \quad (r^2 = 0,7228)$$

$$PvD = -672,1609 + 10,6656.(PD) + 30,2408.(ID) \quad (r^2 = 0,4549)$$

Tabela 10. Características das precipitações que provocaram os maiores picos de vazão nas microbacias B e D.

Data	Microbacia	Q (l/s)	P (mm)	I (mm/h)	Pt (mm)
27/01/87	D	3593	99,5	39,5	71,0
	B	1810	84,5	45,5	70,5
01/02/88	D	6427	173,5	39,6	37,5
	B	2452	139,5	40,3	48,0
06/03/89	D	4662	55,0	31,3	55,0
	B	513	31,0	21,8	48,5
16/01/92	D	5065	306,5	55,5	17,0
	B	3746	282,5	49,0	11,0

Q = pico de vazão; P = precipitação; I = intensidade da precipitação no intervalo de 1 hora; Pt = total de precipitação nos 5 dias antecedentes ao hidrograma.

Figura 48. Relação entre as quantidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia B.

Figura 49. Relação entre as quantidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia D.

Figura 50. Relação entre as intensidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia B.

Figura 51. Relação entre as intensidades das precipitações e os picos de vazão da microbacia D.

4.5. Equações de predição (calibragem)

4.5.1. Deflúvio anual

O modelo que melhor ajusta as relações entre as duas microbacias para a calibragem do deflúvio anual é do tipo linear simples. A equação de predição é apresentada abaixo.

$$Q_aB = 0,9452. (Q_aD)$$

Sua representação gráfica é mostrada na Figura 52.

Figura 52. Relação entre o deflúvio anual das microbacias B e D.

A equação satisfaz as premissas estabelecidas para a inclusão da variável de predição, com o coeficiente de regressão apresentando elevado nível de significância (Tabela 11).

Também, o coeficiente de determinação (r^2) mostra-se bastante elevado, indicando que 99% da variação do deflúvio anual é quantificada pela equação.

O erro padrão de estimativa obtido para o modelo é reduzido, de apenas 63,0 mm, um valor que corresponde a somente 4,3% do deflúvio médio anual medido na microbacia B (1473 mm). Este é claramente um bom indicativo de que se conseguiu uma precisão satisfatória para a equação de calibragem do deflúvio anual, conforme explicitado por REIGNER (1964).

Tabela 11. Características estatísticas da equação de predição do deflúvio anual.

Coef. determinação (r^2)	Variável de predição	Valor de t	Nível de significância
0,9985	Q _a D	58,0140	0,0000

A Figura 53, que mostra a relação dos valores do deflúvio observados da microbacia B com os valores estimados, confirma o bom ajuste da equação, onde as 6 observações utilizadas estão dentro do limite de predição de 0,05 exigido pelo modelo.

O resíduo absoluto máximo determinado não passa de 90 mm, correspondendo a apenas 5,3% do deflúvio estimado da microbacia B (Figura 54).

Figura 53. Relação entre os valores do deflúvio anual observados e os estimados da microbacia B.

Figura 54. Relação entre os valores do deflúvio anual estimados da microbacia B e os resíduos.

Os baixos valores dos resíduos e também do erro padrão de estimativa obtidos, são adequados para que a equação possa ser usada na avaliação de uma eventual alteração na microbacia B sobre a produção hídrica anual. Porém, algumas considerações devem ser feitas sobre a calibragem do deflúvio anual das microbacias.

Os dados hidrológicos dos seis anos da microbacia D utilizados no estudo, fazem parte de um conjunto maior de registros já feitos, que totaliza 12 anos. Neste universo mais amplo, houve a ocorrência de um ano atípico (ano hídrico de 1984/85), excessivamente úmido, com uma precipitação total no período de 3088 mm, que resultou num deflúvio anual de 2722 mm. Este fato é revelador de que o modelo de predição do deflúvio anual estabelecido no presente trabalho não abrange a variação total das chuvas e, conseqüentemente, do deflúvio anual, que podem vir a ocorrer nas microbacias experimentais. Assim, a equação determinada no período deve restringir-se a representar os anos hídricos cuja precipitação varie entre 1815 a 2552 mm, isto é, para um universo de dados disponível até o momento que corresponde a 92% dos valores anuais obtidos na microbacia D.

4.5.2. Deflúvio mensal

Com a finalidade de se ter equações de predição para avaliar alterações do deflúvio mensal para os períodos seco e úmido separadamente, as observações foram divididas de acordo com a época do ano e então submetidas à análise de regressão. Também obteve-se o modelo considerando os dados do ano hídrico conjuntamente (período total).

Os três modelos selecionados são lineares múltiplos. A contribuição da precipitação mensal como variável de predição é significativa para os três casos. As equações obtidas são:

$$\text{período seco: } Q_m B = 0,1769. (P_m D) + 0,7110. (Q_m D)$$

$$\text{período úmido: } Q_m B = -14,7479 + 0,2198. (P_m D) + 0,7220. (Q_m D)$$

$$\text{período total: } Q_m B = 0,1867. (P_m D) + 0,6957. (Q_m D)$$

A Tabela 12 apresenta um resumo das principais características estatísticas das equações.

Não mais que 4% da variação do deflúvio mensal da microbacia B deixa de ser quantificada pelas equações, conforme indicado pelos respectivos coeficientes de determinação (r^2). O erro padrão de estimativa para as três regressões são praticamente iguais, estando em torno de 15 mm, não ultrapassando o valor de 12,7% da média (período seco).

A contribuição de cada variável de predição na definição do modelo do deflúvio mensal para o período total, pode ser constatada por intermédio da comparação do coeficiente de determinação e do erro padrão de estimativa entre o modelo linear simples, usando apenas o deflúvio da microbacia D, e o modelo linear múltiplo, acrescido da variável precipitação. A regressão simples gera um r^2 de 0,9757, sendo o erro padrão de estimativa igual a 21,7 mm. Com a introdução da precipitação no modelo o valor de r^2 sobe para 0,9884 e o erro padrão de estimativa é reduzido para 15,1 mm.

Comportamento semelhante é observado para os modelos definidos para os períodos seco e úmido. Os valores de r^2 para a regressão linear simples e para a

regressão múltipla, para o período seco são 0,9734 e 0,9856, respectivamente. Os valores do erro padrão de estimativa são 18,5 mm e 13,6 mm, respectivamente. Para a estação úmida, os valores do coeficiente de determinação para os modelos linear simples e linear múltiplo são 0,9130 e 0,9578, respectivamente. A inclusão da variável precipitação faz com que o erro padrão de estimativa seja reduzido de 23,0 mm para 15,7 mm.

Tabela 12. Características estatísticas das equações de predição do deflúvio mensal.

Período	Coef. determ. (r^2)	Erro padrão estimativa	Variável de predição	Valor de t	Nível significância
Total	0,9884	15,1	P_mD	8,7230	0,0000
			Q_mD	21,7972	0,0000
Seco	0,9856	13,6	P_mD	5,5537	0,0000
			Q_mD	19,1173	0,0000
Úmido	0,9578	13,7	P_mD	6,0989	0,0000
			Q_mD	11,3336	0,0000

Os gráficos das Figuras 55, 56 e 57 mostram que praticamente todos os valores observados do deflúvio mensal da microbacia B estão incluídos no intervalo de predição de 0,05, exigido pelas regressões.

Figura 55. Relação entre os valores do deflúvio mensal observados e os estimados da microbacia B para o período total.

Figura 56. Relação entre os valores do deflúvio mensal observados e os estimados da microbacia B para o período seco.

Figura 57. Relação entre os valores do deflúvio mensal observados e os estimados da microbacia B para o período úmido.

Da mesma forma que para o deflúvio anual, as equações determinadas para o deflúvio mensal apresentam reduzidos erro padrão de estimativa, podendo assim ser empregadas na avaliação de alterações na microbacia B.

4.5.3. Escoamento direto

As variáveis de predição selecionadas para comporem a equação de estimativa do escoamento direto são a precipitação e o escoamento direto da microbacia D. O modelo que melhor ajusta os dados é:

$$\text{LogEdB} = 0,3382.(\text{LogPD}) + 0,5570.(\text{LogEdD})$$

A aplicação do logaritmo nas variáveis decorre da necessidade da transformação dos dados, verificada pela análise gráfica da distribuição dos resíduos versus os valores estimados pela equação de predição (Figura 58). Para que as observações possam ser utilizadas na forma original pelas quais foram obtidas, é necessário que os resíduos do modelo estejam distribuídos ao acaso, o que não ocorre. Com a transformação logarítmica, consegue-se este tipo de distribuição, conforme Figura 59.

A equação de predição determinada explica praticamente 95% da variação do escoamento direto da microbacia B para o período de calibragem, Tabela 13.

Figura 58. Distribuição dos resíduos versus os valores estimados do escoamento direto da microbacia B a partir de dados não transformados.

Figura 59. Distribuição dos resíduos versus os valores estimados do escoamento direto da microbacia B a partir de dados transformados em logaritmo.

Tabela 13. Características estatísticas da equação de predição do escoamento direto.

Coef. determinação (r^2)	Variável de predição	Valor de t	Nível de significância
0,9542	PD	9,7766	0,0000
	EdD	8,3949	0,0000

A relação entre valores observados de escoamento direto da microbacia B e os valores estimados pelo modelo de calibragem, revela que apenas 3 pontos amostrados excedem o limite de predição de 0,05, indicando um ajuste bastante satisfatório da equação obtida (Figura 60).

Figura 60. Relação entre o logaritmo do escoamento direto observado e o estimado da microbacia B.

Porém, o modelo apresenta um erro padrão de estimativa bastante elevado. Na forma não logarítmica seu valor é de 8,9 mm, correspondendo a 65% do escoamento médio da microbacia B (13,6 mm). Isto deve ocorrer em função da alta variabilidade que há entre o volume de escoamento direto e também entre as precipitações das microbacias.

Assim, a adoção do modelo para a avaliação dos efeitos de um tratamento experimental sobre o escoamento direto da microbacia B pode ser

prematura, prestando-se basicamente para eventos de grande magnitude, sendo interessante fazer uma amostragem mais ampla de hidrogramas para a determinação de uma equação que represente as correlações entre as duas bacias.

4.5.4. Pico de vazão

As variáveis de predição utilizadas no modelo para estimativa da taxa de pico de vazão constam da Tabela 14. Além do pico de vazão, a equação inclui a quantidade da precipitação da microbacia D.

A equação que relaciona o pico de vazão da microbacia B com as variáveis selecionadas é:

$$\text{LogPvB} = 0,8294. (\text{LogPD}) + 0,4260. (\text{LogPvD})$$

Igualmente ao escoamento direto, há a necessidade de transformação dos dados para a forma logarítmica.

Pela equação obtida, 97% da variação da descarga da microbacia B pode ser quantificado.

A relação entre valores observados do pico de vazão da microbacia B e os valores estimados pela equação obtida na calibragem, indica que apenas 4 pontos da curva excedem o limite de predição de 0,05, mostrando ajuste satisfatório do modelo (Figura 61).

O erro padrão de estimativa da equação de calibragem do pico de vazão, já na forma não logarítmica, é bastante elevado (280,9 l/s), correspondendo a 84%

do pico de vazão médio da microbacia B (333,3 l/s). Portanto, seria interessante também que o período de calibragem das bacias fosse estendido, com o intuito de se determinar um modelo mais adequado para a predição desta característica.

Tabela 14. Características estatísticas da equação de predição do pico de vazão.

Coef. determinação (r^2)	Variável de predição	Valor de t	Nível de significância
0,9656	PvD	3,5807	0,0006
	PD	5,0577	0,0000

Figura 61. Relação entre o logaritmo do pico de vazão observado e o estimado da microbacia B.

5. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões puderam ser tiradas do presente estudo, conduzido no período de outubro de 1986 a setembro de 1992:

1) As microbacias apresentam comportamento semelhante quanto ao balanço hídrico anual. A média de 6 anos para os componentes precipitação, deflúvio e evapotranspiração são, respectivamente: **microbacia B** - 2012 mm, 1473 mm e 539 mm; **microbacia D** - 2158 mm, 1555 mm e 603 mm. As microbacias são conservativas quanto ao consumo de água. Em comparação com outras florestas de clima tropical, a evapotranspiração anual da vegetação de mata atlântica do local é normalmente inferior;

2) As microbacias apresentam um regime de descarga bastante regular durante todo o ano hídrico. Em média, a produção de água no período das chuvas supera em apenas 10% a produção hídrica no período mais seco. O escoamento base é o principal componente do fluxo diário de água dos rios para aproximadamente 90% do tempo na curva de duração de fluxo das microbacias; a contribuição do escoamento direto para o deflúvio diário restringe-se a cerca de 10% de todo o tempo do escoamento, normalmente para fluxos superiores a 6 mm/dia;

3) Há uma diferença marcante entre a resposta hidrológica das microbacias devido às precipitações, em função da época do ano. No período das

chuvas a proporção de escoamento direto é superior à verificada no período mais seco. As áreas geradoras de escoamento direto nas duas bacias aumentam com a passagem da estação seca para a estação úmida e também com o incremento das chuvas. Embora pouco comum, até aproximadamente 60% da superfície das bacias contribuem para a produção do escoamento direto;

4) O volume de escoamento direto da microbacia B, em geral, supera o da microbacia D. Uma maior proporção da superfície da primeira bacia contribui para o escoamento rápido comparativamente à microbacia D. Para a maior parte das chuvas do período seco, não mais que 10% da microbacia D produz escoamento direto, enquanto na microbacia B, de 20% a 30% da superfície gera escoamento rápido. No período das chuvas, é bastante freqüente que 30% da microbacia D participe na formação do hidrograma, enquanto 30% a 50% da área da microbacia B usualmente produz este componente do deflúvio;

5) As taxas de pico de vazão das microbacias B e D são geralmente reduzidas, não ultrapassando 25 l/s para 50% dos hidrogramas. Os picos de vazão da microbacia B tendem a ser maiores que os da microbacia D, embora as taxas máximas sejam superiores na microbacia D;

6) Embora haja carência de informações detalhadas dos solos da microbacia B, há evidências de que a resposta hidrológica às chuvas mais intensa nesta bacia, é decorrente, principalmente, da presença de grandes extensões de solos rasos localizados em terrenos de grande inclinação, concentrados desde as partes mais elevadas até as porções inferiores das vertentes da microbacia;

7) As equações de predição das características do deflúvio, determinadas ao nível de significância de 0,05, são:

Deflúvio anual: $Q_aB = 0,9452. (Q_aD)$

Deflúvio mensal:

- período seco: $Q_mB = 0,1769. (P_mD) + 0,7100. (Q_mD)$

- período úmido: $Q_mB = -14,7479 + 0,2198. (P_mD) + 0,7220. (Q_mD)$

- período total: $Q_mB = 0,1867. (P_mD) + 0,6957. (Q_mD)$

Escoamento direto: $\text{LogEdB} = 0,3382.(\text{LogPD}) + 0,5570.(\text{LogEdD})$

Pico de vazão: $\text{LogPvB} = 0,8294.(\text{LogPD}) + 0,4260.(\text{LogPvD})$

Frente aos resultados obtidos, as seguintes considerações sobre as futuras pesquisas nas microbacias são feitas.

Estudos específicos sobre o processo de evapotranspiração da vegetação florestal de Mata Atlântica na região de Cunha devem ser empreendidos, uma vez que o consumo total de água da mesma apresenta-se bastante reduzido. Uma avaliação da influência ou não dos frequentes nevoeiros sobre a evapotranspiração deve ser considerada.

Também a quantificação da precipitação horizontal, resultado da retenção da água dos densos nevoeiros que interagem com a floresta, como componente da entrada de água para as microbacias, merece esforços nas pesquisas envolvendo o balanço hídrico.

Com relação a calibragem das microbacias experimentais B e D, os modelos do escoamento direto e do pico de vazão apresentam elevado erro padrão de estimativa, prejudicial para a avaliação de um tratamento experimental. Portanto, deve ser feita a inclusão de mais observações na tentativa de melhorá-los. O período de calibragem deve ser estendido por mais alguns anos, para que se possa amostrar uma amplitude maior de observações do deflúvio anual.

Algumas recomendações visando o manejo das bacias hidrográficas da região de Cunha devem ser destacadas.

O elevado rendimento hídrico das microbacias hidrográficas, aliado a um regime hidrológico dos rios bastante estável durante todo o ano, demonstram que a região deve ser considerada estratégica do ponto de vista de suprimento de água para o Vale do Paraíba. Esforços para a conservação da floresta natural e para a recuperação das áreas já degradadas devem ser empreendidos.

Como as áreas de geração do escoamento direto das microbacias hidrográficas com vegetação florestal natural podem corresponder a até mais da metade da superfície das bacias, a retirada da vegetação deve ser evitada. Porém, quando necessária, deve ser feita de maneira extremamente criteriosa. As zonas ripárias devem ser mantidas intactas. Regiões onde os solos são frequentemente saturados, como as concavidades do terreno para as quais convergem as linhas de fluxo, e locais de solos de pouca profundidade, devem ser submetidos a um manejo especial tal que as condições naturais de infiltração da água no solo não sejam drasticamente alteradas. Deve-se evitar intervenções durante o período das chuvas.

Qualquer programa de recuperação dos recursos hídricos da região deve levar em conta estas áreas, indentificando-as e conhecendo sua dinâmica nos períodos úmido e seco. As mesmas são prioritárias para a restauração e a manutenção dos processos hidrológicos das microbacias.

Os estudos referentes aos mecanismos de geração do escoamento direto nas microbacias experimentais devem ser intensificados e aprofundados, uma vez que os conhecimentos obtidos podem ser a chave para o manejo das bacias hidrográficas da região, visando a obtenção de água com quantidade e qualidade desejáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V. de; SHIMOMICHI, P.Y. Qualidade da água e dinâmica dos nutrientes em bacia hidrográfica recoberta por floresta de Mata Atlântica. **Revista do Instituto Florestal**, v. 5, n. 1, p. 1 - 20, jul. 1993.
- BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, p. 3 - 23, 1982.
- BOSCH, J.M.; SMITH, R.E. The effect of afforestation of indigenous scrub forest with Eucalyptus on streamflow from a small catchment in the Transvaal, South Africa. **South African Forestry Journal**, n. 150, p. 7-17, Sept. 1989.
- BRECHTEL, H. M.; BALÁZS, A.; KILLE, K. Natural correlation of streamflow characteristics from small watersheds in the forest research area of Krofdorf - results of a paired watershed calibration. In: SYMPOSIUM OF HYDROLOGY RESEARCH BASINS, Bern, 1982. **Proceedings**. Bern,: 1982. p. 291-300.

- BREN, L.J.; PAPWORTH, M. Early water yield effects of conversion of slopes of a eucalypts forest catchment to radiata pine plantation. **Water Resources Research**, v. 27, n. 9, p. 2421-2428, Sept. 1991.
- BROOKS, K. N.; FFOLLIOTT, P.F.; GREGERSEN, H.M.; THAMES, J.L. **Hydrology and the management of watersheds**. Ames: Iowa State University Press, 1991. 392 p.
- BRUIJNZEEL, L. A. Evaluation of runoff sources in a forested basin in a wet monsoonal environment: a combined hydrological and hydrochemical approach. In: HYDROLOGY OF HUMID TROPICAL REGIONS WITH PARTICULAR REFERENCE TO THE HYDROLOGICAL EFFECTS OF AGRICULTURE AND FORESTRY PRACTICE, Hamburg, 1983. **Proceedings**. International Association of Hydrological Sciences, 1983. p. 165-174. (Publication, 140).
- BRUIJNZEEL, L.A. **Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review**. Amsterdam: Free University Amsterdam / UNESCO, Humid Tropics Programme Publication, Free University, 1990. 224p.
- CARVALHO, J.L. de; CICCIO, V. de; FUJIEDA, M. Algumas propriedades físicas dos solos na bacia hidrográfica experimental "D" no Núcleo Cunha - SP. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2., São Paulo, 1992. **Anais**. São Paulo: Revista do Instituto Florestal, 1992. p. 753-759.

- CARVALHO, W.A.; PANOSO, L.A.; PFEIFER, R.M.; ROSSI, M.
Levantamento de reconhecimento detalhado dos solos do Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha, SP (Bacia "D"). **Revista do Instituto Florestal**, v. 2, n. 2, p. 127-155, dez. 1990.
- CHANG, M. **Laboratory notes forest hydrology**. Texas: School of Forestry - Stephen F. Austin State University, 1982. 203 p.
- CICCO, V. de; EMMERICH, W.; FARIA, A.J.; FUJIEDA, M.. Projeto de pesquisas hidrológicas em floresta natural na Reserva Estadual de Cunha - determinação do balanço hídrico. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS. A INFLUÊNCIA DAS FLORESTAS NO MANEJO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS, 11., Curitiba, 1984. **Anais**. Curitiba: EMBRAPA/PNPF, 1985a. p.135-142.
- CICCO, V. de; FARIA, A.J.; ARCOVA, F.C.S.; SHIMOMICHI, P.Y.
Determinação do balanço hídrico com emprego de bacia hidrográfica experimental em mata natural secundária. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS E SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS EM REGIÕES METROPOLITANAS, 6., São Paulo, 1985. **Anais**. São Paulo: Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1985b. p.234-246.
- CICCO, V. de; ARCOVA, F.C.S.; SHIMOMICHI, P.Y.; FUJIEDA, M.
Interceptação das chuvas por floresta natural secundária de Mata Atlântica - SP. **Silvicultura em São Paulo**, v. 20 / 22, p. 25-30, 1986/88.

- CICCO, V. de; ARCOVA, F.C.S.; SHIMOMICHI, P.Y. Estimativa da evapotranspiração em bacia hidrográfica com floresta natural secundária de Mata Atlântica - São Paulo. **Revista do Instituto Florestal**, v. 1, n. 2., p. 43-54, dez. 1989.
- CICCO, V. de; FUJIEDA, M. Pesquisa em manejo de bacias hidrográficas em São Paulo. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2., São Paulo, 1992. **Anais**. São Paulo: Revista do Instituto Florestal, 1992. p. 808-815.
- DE BIASI, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. **Geomorfologia**, n. 21., p. 8-13. 1970.
- DICKINSON, W.T.; WHITELEY, H. Watershed areas contributing to runoff. In: SYMPOSIUM ON THE RESULTS OF RESEARCH ON REPRESENTATIVE AND EXPERIMENTAL BASINS, Wellington, 1970. **Proceedings**. International Association of Hydrological Sciences, 1972. p. 12-26. (Publication, 96).
- FEDERER, C.A. Measuring forest evapotranspiration - theory and problems. In: ESCHNER, A.R.; BLACK, P.E., ed. **Readings in forest hydrology**. New York: MSS Information Corporation, 1975. p. 159-184.
- FRANKEN, W.; LEOPOLDO, P.R. Relações entre fluxos de água subterrânea e superficial em bacia hidrográfica caracterizada por cobertura florestal amazônica. **Acta Amazônica**, v. 16/17, n. único, p. 253-262, 1986/1987.

- FUJIEDA, M.; KUDOH, T.; MASHIMA, Y. Hydrological processes in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. In: HYDROLOGY OF WARM HUMID REGIONS, Yokohama, 1993. **Proceedings**. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, 1993. p. 43-51. (Publication, 216).
- FURIAN, S.M. Estudo geomorfológico do escoamento superficial em parcelas experimentais no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha / SP. Um esboço metodológico. São Paulo, 1987. 187p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- FURIAN, S.M.; PFEIFER, R.M. Levantamento de reconhecimento do meio físico do Núcleo Cunha, SP. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, v.40, n. 2, p. 183-193, dez. 1986.
- GOLDING, D.L. Calibration methods for detecting changes in streamflow quantity and regime. In: THE INFLUENCE OF MAN ON THE HYDROLOGICAL REGIME WITH SPECIAL REFERENCE TO REPRESENTATIVE AND EXPERIMENTAL BASINS, Helsinki, 1980. **Proceedings**. International Association of Hydrological Sciences, 1980. p. 3-7. (Publication, 130).
- HARR, R. D.; LEVNO, A.; MERSEREAU, R. Streamflow changes after logging 130-year-old douglas fir in two small watersheds. **Water Resources Research**, v. 18, n. 3, p. 637-644, Jun. 1982.

- HELVEY, J. D. Watershed behaviour after forest fire in Washington. In: IRRIGATION AND DRAINAGE DIVISION SPECIALITY CONFERENCE, Colorado, 1973. **Proceedings**. American Society of Civil Engineers, 1973. p. 403-421.
- HEWLETT, J. D. **Principles of forest hydrology**. Athens: The University of Georgia Press, 1982. 183 p.
- HEWLETT, J. D.; HELVEY, J. D. Effects of forest clear-felling on the storm hydrograph. **Water Resources Research**, v. 6, n. 3, p. 768-782, Jun. 1970.
- HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1., Pennsylvania, 1965. **Proceedings**. Oxford: Pergamon Press, 1967, p. 275-290.
- HEWLETT, J.D.; LULL, H.W.; REINHART, K.G. In defence of experimental watersheds. **Water Resources Research**, v. 5, n. 1, p. 306-316, Feb. 1969.
- HIBBERT, A.R.; TROENDLE, C.A. Streamflow generation by variable source area. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY Jr., D.A., ed. **Forest hydrology and ecology at Coweeta**. New York: Springer-Verlag, 1988. cap. 8, p. 111-127.
- HORNBECK, J.W.; PIERCE, R.S.; FEDERER, C.A. Streamflow changes after clearing in New England. **Water Resources Research**, v. 6, n. 4, p. 1124-1131, Aug. 1970.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. **Report of implementation design survey on the japanese technical cooperation project for the forestry research in São Paulo, Brazil.** s.l., 1980. 284p.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. **Synthetic report of the japanese technical cooperation project for the forestry research in São Paulo, Brazil.** s.l., 1986. 555p.

LEE, R. **Forest hydrology.** New York: Columbia University Press, 1980. 349 p.

LEITÃO FILHO, H.F. Aspectos taxonômicos das florestas do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSENCIAS NATIVAS, 1., Campos do Jordão, 1982. **Anais.** São Paulo: Silvicultura em São Paulo, 1982. p. 197-206.

LIMA, W.P. de. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas.** Piracicaba: ESALQ / Depto. Silvicultura, 1986. 242 p.

LIMA, W.P. de. **Impacto ambiental do eucalipto.** 2 ed. São Paulo: EDUSP, 1993. 301 p.

NEWSON, M.D.; CALDER, I.R. Forest and water resources: problems of prediction on a regional scale. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 24, p. 283-298, 1989.

- PRANDINI, F.L.; AVILA, I.G.; LEITE, C.A.G.; SANTOS, M.T.N. O uso e ocupação do solo no Alto Paraíba (I). Contribuição ao conhecimento de sua evolução. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 1., Campos do Jordão, 1982. **Anais**. São Paulo: Silvicultura em São Paulo, 1982. p. 1929-1935.
- REIGNER, I.C. **Calibrating a watershed by using climatic data**. Upper Darby: U.S. Forest Service Research, Northeastern Forest Experiment Station, 1964. 45p. (Paper NE, 15).
- REINHART, K.G. Calibration of five small forested watersheds. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 38, n. 5, p. 933-936, Oct. 1958.
- REINHART, K.G. Watershed calibration methods. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1., Pennsylvania, 1965. **Proceedings**. Oxford: Pergamon Press, 1967, p. 715-723.
- ROTHACHER, J. Increases in water yield following clear-cut logging in the pacific northwest. **Water Resources Research**, v. 6, n. 2, p. 653-658, Apr. 1970.
- SAMRAJ, P.; SHARDA, V.N.; CHINNAMANI, S.; LAKSHMANAN, V.; HALDO RAI, B. Hydrological behaviour of the Nilgiri sub-watersheds as affected by bluegum plantations, part 1. The annual water balance. **Journal of Hydrology**, v. 103, p. 335-345, 1988.

- SCARDUA, F.P. Caracterização hidrológica de uma microbacia hidrográfica da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, ESALQ/USP. Piracicaba, 1994. 94p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- SEARCY, J.K. **Flow-duration curves**. Washington: Geological Survey Water, 1959. 33 p.. (Paper 1542-A).
- SHIMIZU, T. Forest watershed experiments in Japan. **JARQ**, v. 16, n. 4, p. 281-286, 1983.
- SMITH, R.E.; BOSCH, J.M. A description of the Westfalia catchment experiment to determine the effect on water yield of clearing the riparian zone and converting an indigenous forest to a eucalypt plantation. **South African Forestry Journal**, v. 151, p. 26-31, Dec. 1989.
- SWIFT Jr., L.W.; CUNNINGHAM, G.B.; DOUGLAS, J.E. Climatology and Hydrology. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY Jr., D.A, ed. **Forest hydrology and ecology at Coweeta**. New York: Springer-Verlag, 1988. cap. 3, p. 35-55.
- SWINDEL, B.F.; DOUGLAS, J.E. Describing and testing nonlinear treatment effects in paired watershed experiments. **Forest Science**, v. 30, n. 2, p. 305-313, 1984.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of technology, 1955. 86 p. (Publications in Climatology).

TOEBES, C.; OURYVAEV, V. **Representative and experimental basins: an international guide for research and practice.** UNESCO, 1970. 348p.

WARD, R.C. On the response to precipitation of headwater streams in humid areas. **Journal of Hydrology**, v. 74, p. 171-189, 1984.

WATERLOO, M.J. **Water and nutrient dynamics of *Pinus caribaea* Plantation forests on former grassland soils in Southwest Viti Levy, Fiji.** Amsterdam: Vrije Universiteit Amsterdam, 1994. 478p.

WHITEHEAD, P.G.; ROBINSON, M. Experimental basin studies - an international and historical perspective of forest impact. **Journal of Hydrology**, v. 145, p. 217-230, 1993.