

## Capítulo 6 – Evaporação e evapotranspiração

### Introdução a Hidrologia de Florestas

A. **Introdução.** Em regiões temperadas 70% da precipitação evapora e apenas 30% vai para os aquíferos ou rios. A evaporação varia menos de ano para ano que a vazão dos cursos d'água.

1. Evapotranspiração ( $E_t$ ), é qualquer processo pelo qual a água da planta ou do solo passa ao estado de vapor (termo de C.W. Thornthwaite). Matematicamente:

$$E_t = T + I_t + E_s + E_0 \quad [6.1]$$

em que  $T$  é a transpiração,  $I_t$  é a evaporação de água interceptada (particularmente importante em florestas),  $E_s$  é a evaporação do solo e  $E_0$  é a evaporação de superfícies livres de água (rios, lagos, brejos,...).

2. Evapotranspiração Potencial ( $ET_p$ ) é a taxa de evaporação em condições de não limitação pelo estoque de água no solo. Serve apenas como uma referência para a evaporação máxima possível sob certas condições climáticas.

3. Transpiração ( $T$ ) é a evaporação d'água das células vivas dos tecidos vegetais, através dos estômatos (poros de respiração das plantas). Mesmo sendo um processo físico,  $T$  é o único componente de  $E_t$  sob controle fisiológico.

4. Evaporação d'água interceptada ( $I_t$ ) é a evaporação da água interceptada por folhas, galhos e tronco das árvores ( $I_c$ ), além de liteira e camadas de húmus ( $I_f$ ).

5. Evaporação do solo ( $E_s$ ) é a vaporização da água diretamente a partir da superfície mineral do solo. É uma fração pequena de  $E_t$  em florestas por falta de radiação e movimento do ar.

6. Evaporação de água em superfícies livres ( $E_0$ ) é a vaporização que ocorre em superfícies de água livres de cobertura vegetal. Numa superfície calma, é função da temperatura da água (que determina a pressão de vapor na superfície) e da pressão de vapor do ar em contato. Dalton (aprox. 1800) propôs a seguinte equação para  $E_0$ :

$$E_0 = Cu(e_0 - e_a) \quad [6.2]$$

em que  $u$  é a velocidade do vento,  $e_0$  é a pressão de vapor à superfície da água,  $e_a$  é a pressão de vapor do ar em contato e  $C$  é uma constante (que leva em conta a conversão de unidades). A evaporação da água de reservatórios representa uma perda muito significativa, sobretudo em áreas de clima árido e semi-árido.

Tanques de evaporação (Classe A) tem 1,22 m de diâmetro e uma coluna de água de 30 cm. Os tanques são mantidos nivelados sobre um suporte de madeira. Diferenças de temperatura fazem com que as leituras de  $E_0$  ou  $E_t$  sejam não confiáveis.

- B. **O processo físico de Evaporação.** Moléculas de água são compostas de 1 átomo de oxigênio e 2 de hidrogênio. Quando a temperatura aumenta, implicando num aumento da força molecular, moléculas perdem força de ligação (força de ligação do Hidrogênio) e escapam da superfície da água. Pode também haver alguma condensação de volta. Um suprimento constante de energia (calor) é necessário para manter o processo de evaporação líquida, que pararia sem tal suprimento.

1. Condições necessárias para sustentar evaporação: energia e disponibilidade de água.

Disponibilidade de energia. Parte da radiação de ondas curtas do sol é convertida em calor na superfície de folhas, lagos... Parte deste calor aquece a água aumentando a taxa de evaporação e parte é usado para aquecer o ar e outros materiais.

O calor usado para aquecer a matéria sem mudança de estado é denominado calor sensível ( $H+G$ , ver capítulo 2). Quando o ar aquecido se desloca, ele transfere energia (energia advectiva,  $H$ ). Evaporação elevada de oásis é um exemplo (outro exemplo são áreas irrigadas no vale do São Francisco).

A topografia e a elevação do sol afetam a disponibilidade de energia. A figura 6.1 mostra como a radiação solar (teórica) varia ao longo do ano para encostas de diferentes orientações (hemisfério norte, mostrando grandes diferenças no inverno). A difusão de radiação por nuvens tende a reduzir estas diferenças).

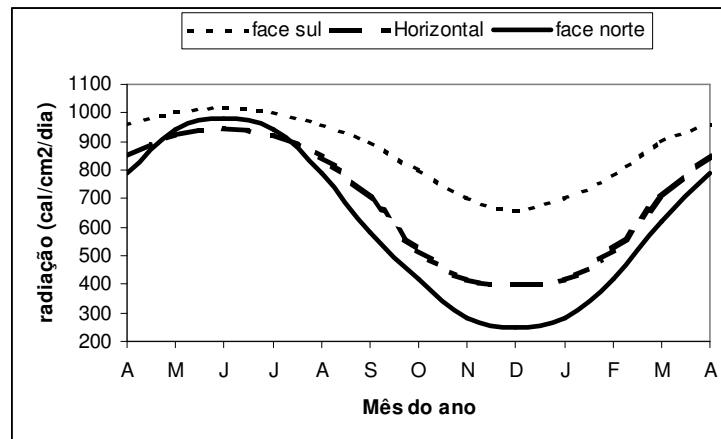


Figura 6.1. Efeito do ângulo solar na radiação total diária de ondas curtas.

Parte da radiação solar é convertida em energia mecânica que provoca os ventos, produzindo uma camada de mistura turbulenta de ar e vapor nas proximidades da superfície. Esta camada aumenta a eficiência da aplicação da energia disponível para evaporação da água, uma vez que previne a saturação do ar e mantém elevado gradiente de vapor na superfície evaporante.

O termo disponibilidade de água não se aplica apenas à quantidade de água presente mas também a sua disponibilidade para evaporação. Depende da superfície e rugosidade da superfície. O mesmo vale para água no solo e na planta.

- C. **Evaporação de solo nu.** Existem duas formas de transporte de umidade do solo até a superfície:

Fluxo de filme d'água que ocorre sob gradiente de potencial matricial até a zona em que a evaporação ocorre. O movimento se torna negligenciável a medida que a umidade se aproxima do PMP.

Fluxo de vapor ocorre a partir da zona em que ocorre evaporação até a superfície. Temperatura e gradientes de pressão de vapor movem água em direção à superfície. Embora muito lento, o fluxo de vapor poder secar solos de regiões desérticas até grandes profundidades.

D. **Evaporação de água interceptada.** Processo de interceptação de água acima da superfície mineral.

*Estoque interceptado* é a quantidade de água retida por tecidos vivos e não vivos de plantas.

*Interceptação perdida pelo dossel ( $I_C$ )* é a quantidade perdida diretamente por evaporação.

*Precipitação no solo ( $P_t$ )* é a fração da precipitação total que cai no solo.

*Fluxo no tronco ( $P_s$ )* é a fração que escoia pelos galhos e troncos.

*Interceptação perdida pela cobertura do solo ( $I_f$ )* é a fração evaporada da cobertura do solo antes de atingir a fração mineral.

*Perda total por interceptação ( $I_t$ )* é a fração total evaporada da água retida por material vivo e morto de plantas.

Na Inglaterra, onde chove regularmente em pequena intensidade pode-se perder até 38% da chuva na forma de interceptação. Interceptação depende da intensidade da chuva, da densidade da cobertura vegetal, do intervalo entre precipitações.

1. Os fatores que afetam a disponibilidade de água no processo de interceptação são:

Aspectos da vegetação – Índice de Área Foliar, liteira, variações sazonais, natureza da superfície (rugosidade, repelência, absorvidade da liteira, arranjo das folhas e galhos).

Aspectos meteorológicos – número e intervalo entre eventos de precipitação, intensidade da chuva, velocidade do vento durante e depois da chuva

2. A disponibilidade de energia para evaporação ( $R$  e  $H$  transportado por vento) é a chave do entendimento da perda rápida de água interceptada neste processo. Velocidade do

vento (turbulência) também altera a eficiência do processo de transferência de energia para a superfície evaporante.

3. O efeito da interceptação na transpiração é controverso. Partes mais altas do dossel podem estar secas e transpirando enquanto partes mais baixas e no interior do dossel podem estar molhadas e em processo de evaporação. De qualquer modo,  $T + I_t$  não podem usar mais energia que a disponível na superfície das plantas.
4. Medição da perda por interceptação. É óbvio que:

$$I_t = I_c + I_f$$

A interceptação pela liteira é medida por pesagem sucessiva de amostras. Em base anual é da ordem de 3-5 % da precipitação anual. A figura 6.2 mostra um experimento de interceptação no campo.

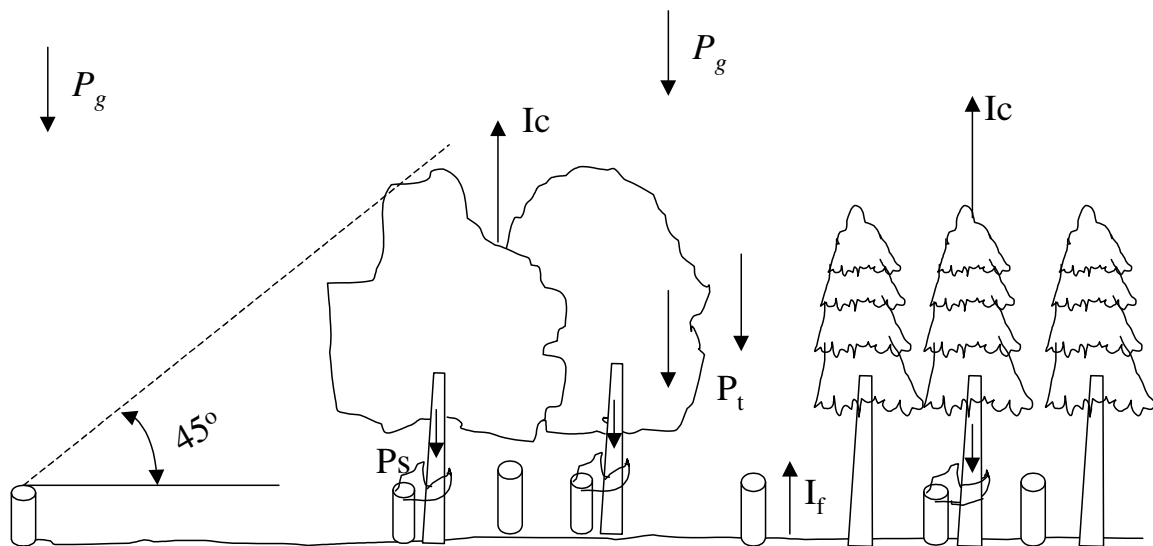


Figura 6.2. Medição da interceptação pelo dossel ( $I_c$ ) e liteira ( $I_f$ ). São necessários em torno de 10 coletores para medir a água que atravessa o dossel ( $P_t$ ) para se obter a mesma precisão da medida de uma área aberta ( $P_g$ , ângulo de  $45^\circ$  em relação ao topo das árvores).  $P_s$  é em torno de 1-2% de  $P_g$  (hidrologicamente desprezível).

E. **Transpiração.** É um processo passivo (em condições potenciais) de evaporação através dos estômatos. Energia radiante (e sensível) provoca a vaporização de camadas finas de água em torno das células do parênquima, provocam a difusão do vapor através dos estômatos e transportam o vapor para longe pela turbulência. A perda d'água cria um déficit hídrico nas células, implicando em potenciais negativos no xilema (em ordem de grandeza muito superiores ao gravitacional) que provocam a sucção d'água do solo através das raízes. A força motora do movimento são os potenciais hídricos muito baixos que se desenvolvem no ar não saturado na circunvizinhança das folhas (Figura 6.3).

1. As plantas interferem no processo apenas pelo controle fisiológico de abertura/fechamento dos estômatos. Os seguintes fatores, interrelacionados de forma complexa e não claramente compreendida, afetam o fechamento e abertura dos estômatos:

*Déficit de água nas células-guarda.*

*Concentração de CO<sub>2</sub> e pH no interior das células das folhas*

*Qualidade e intensidade de luz*

*Temperatura da folha (termoperiodismo)*

*Duração do dia (fotoperiodismo)*

*Estímulo mecânico das folhas pelo vento.*

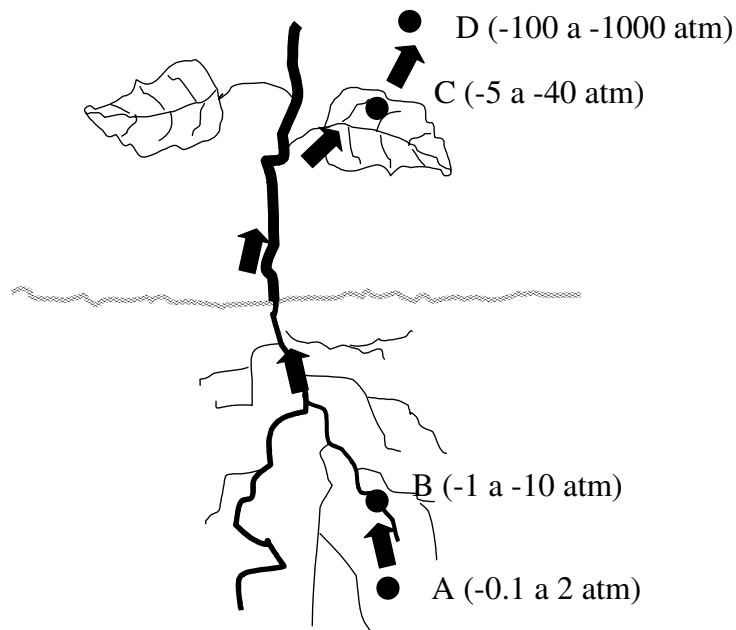


Figura 6.3. Esquema do movimento de água no sistema-solo-planta-atmosfera, em condições ótimas de desenvolvimento.

Sem os estômatos a difusão de  $\text{CO}_2$  do ar para as folhas seria muito lenta e as taxas de fotossíntese seriam incompatíveis com o crescimento observado das plantas. Com os estômatos abertos, entretanto, perde-se água excessivamente, razão pela qual se diz que a transpiração é um mal necessário. O resfriamento da superfície das folhas (mecanismo de dissipação de calor) é o efeito físico mais importante da transpiração.

2. Em plantas, define-se o Potencial de Água da Planta,  $\Psi_p$ , como a soma entre os potenciais osmótico (potencial exercido pelos solutos presentes no interior da membrana permeável à água do protoplasma) e de pressão (+ quando a célula está túrgida e – quando está em processo de plasmólise). O potencial total, em energia por peso (dimensão L), é:

$$\Psi = \Psi_p + Z \quad [6.8]$$

3. Movimento de água nas plantas. Analogia da lei de Ohm:

$$q = A \frac{1}{r} \frac{\Delta\Psi}{L} \quad [6.9]$$

A resistência total é a soma das resistências, de forma que a condutividade hidráulica  $K$  em florestas pode ser representada por:

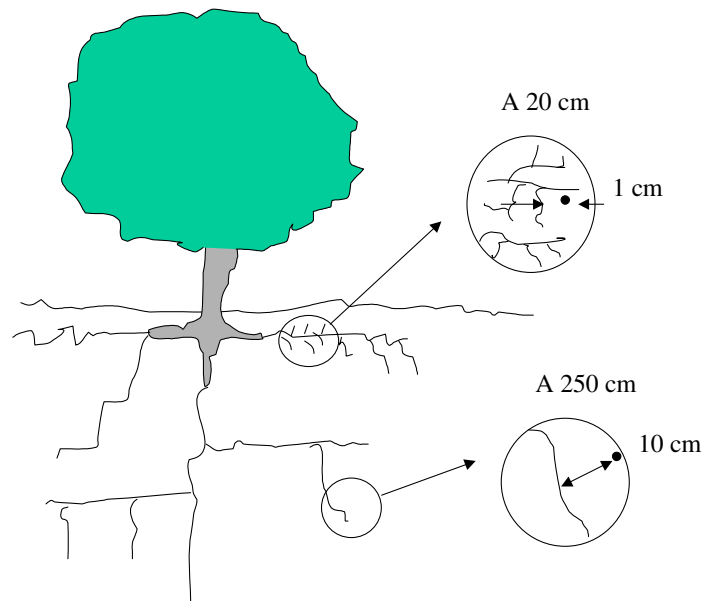
$$K = \frac{1}{r} = 1/r_{solo} + 1/r_{raiz} + 1/r_{tron\ cos} + 1/r_{stoma} + 1/r_{ar} \quad [6.10]$$

As resistências do complexo solo-planta mudam rapidamente e não são praticamente mensuráveis. A única forma de se medir a transpiração é através da pesagem periódica da perda d'água em vasos selados ou em lisímetros. Em florestas, a melhor estimativa é através do balanço de água em microbacias, acoplados com experimentos de interceptação e medidas de umidade do solo.

Exemplo: Suponha que uma árvore possua a distribuição de raízes do esquema abaixo. A 20 cm, a distância média entre partículas d'água do solo e as raízes é 1 cm. A 250 cm é 10 cm. Vamos supor também que:

	A 20 cm	A 250 cm
Área de raízes/volume do solo	120 cm <sup>2</sup> /unidade	1 cm <sup>2</sup> /unidade
$K$ do solo ( $-I/r$ )	0,001 cm/h	0,01 cm/h
$-P$ do solo	-11000 cm	-100 cm
$-\Psi_p$ das raízes	-12000 cm	-12000 cm
Distância média da raiz mais próxima	1 cm	10 cm





nestas condições temos que:

$$q_{20} = (120\text{cm}^2)(0,0001\text{cm/hr})[-11000\text{cm} - (-12000\text{cm})]/1\text{cm}$$

$$= 12\text{cm}^3 / \text{hr} \text{ absorvido por unidade de volume de solo}$$

$$q_{250} = (1\text{cm}^2)(0,01\text{cm/h})[-100\text{cm} - (-12000\text{cm})]/10\text{cm}$$

$$= 12\text{cm}^3 / \text{hr} \text{ absorvido por unidade de volume de solo}$$

ou seja, a mesma quantidade de água é absorvida pelas raízes (por unidade de volume de solo) nos dois níveis.

Este exemplo ilustra o quanto é difícil estimar água disponível para plantas de raízes profundas, e como as raízes de árvores evoluíram para absorver água e nutrientes nas camadas mais superficiais do solo e a maior umidade das camadas mais profundas.

4. Disponibilidade de água e de energia na transpiração. IAF ( $L^2/L^2$ ) e densidade de raízes ( $L^2/L^3$ ) constituem índices de disponibilidade de água e de energia.

Fatores energéticos associados à transpiração são:

*Aquecimento radiativo* da biosfera pelo sol e energia refletida e re-irradiada por nuvens, solo, ar, árvores. A temperatura das folhas aumenta mas o gradiente em relação ao ar é

muito pequeno. Entretanto, o gradiente de pressão de vapor aumenta muito em função do decréscimo da pressão de vapor com o aumento da temperatura.

*Advecção* provoca aumento da turbulência provocando aumento ou diminuição da temperatura das folhas, mudanças no potencial hídrico e estimulando o fechamento dos estômatos.

Fatores hídricos associados à transpiração são:

*Perda de água* provoca aumento do potencial osmótico das células foliares aumentando a força motora ( $\Delta\Psi/L$ ) dos galhos para as folhas estimulando o fechamento dos estômatos ao mesmo tempo que tende a aumentar a sucção d'água.

*Déficits de água nos galhos e raízes* aplicam maior sucção na superfície das raízes, produzindo maior absorção pelo solo.

*Déficits hídricos nas camadas de solo em torno das raízes finas* induzem a migração de água em direção às raízes para camadas mais profundas. Ao meio-dia de uma dia quente, a interface raízes-solo é a maior impedância a absorção, translocação e transpiração. Durante a noite, a umidade migra em direção às raízes, aumentando  $K(\theta)$ , favorecendo uma rehidratação rápida das plantas antes do amanhecer (condição em que o potencial de água na folha está em equilíbrio com o solo).

5. Medição de transpiração. Medidas pontuais em vasos impermeáveis e selados foram realizadas para várias espécies, mas a extrapolação para o campo não pode ser realizada. Entre os métodos estão:

Lisímetros

Medição da variação da umidade do solo em talhões (no campo)

Tendas plásticas para balanço de vapor (saída-entrada)

Corte e pesagem instantânea de galhos (talos) para estimativa de taxa de perda nos primeiros minutos

Medidas de fluxo nos vasos transportadores (não são quantitativas).

Análise dos gradientes e fluxos de vapor sobre áreas extensas (verificação difícil)

Análise do balanço de energia nos stands (difícil de verificar)

Numa bacia hidrográfica pode-se realizar o balanço de água (equação [6.11]), tomando-se a média de vários anos para se ter uma aproximação da transpiração (considerando desprezíveis os valores de  $E_0$  e  $E_s$ ). Usando dados de várias bacias dos montes Apalaches (EUA) tem-se:

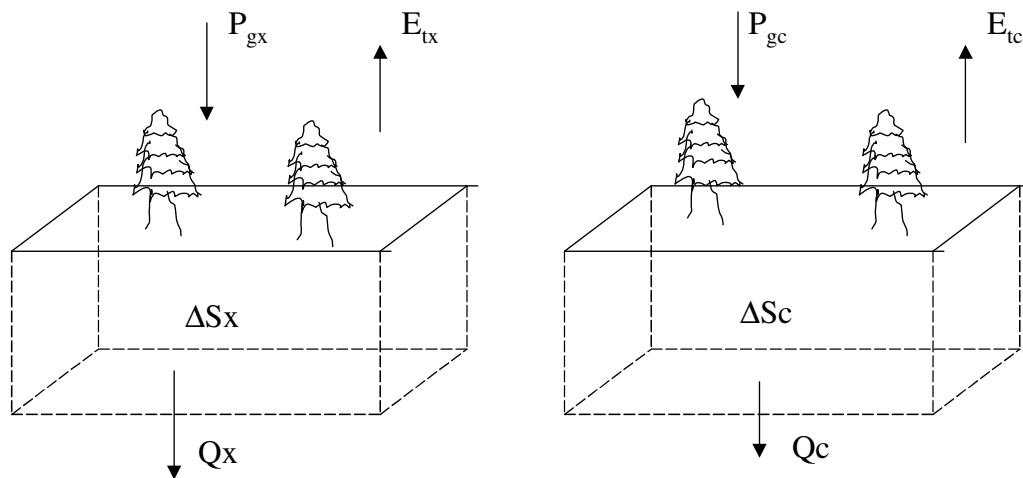
$$T = P_g - Q - I_t - \Delta S \quad [6.11]$$

$$T = 150\text{cm} - 70\text{cm} - 18\text{cm} - 0\text{cm} = 62\text{cm de transpiração.}$$

6. **Estimando evapotranspiração.** Os métodos disponíveis se baseiam na equação [2.1]

$$(P_g = E_t + Q + \Delta S):$$

1. Lisímetros
2. Plots pareados de umidade do solo de acordo com o esquema abaixo



$$E_{tx} = P_{gx} - Q_x - \Delta S_x$$

$$E_{tc} = P_{gc} - Q_c - \Delta S_c$$

considerando que  $P_g$  e  $Q$  são idênticos, temos que:

$$E_{tx} - E_{tc} = \Delta S_c - \Delta S_x$$

Durante um período de calibração, medidas de umidade do solo são utilizadas para testar a hipótese  $E_{tx} - E_{tc} = 0$ . A seguir aplica-se um anti-transpirante no plot  $x$  (um

tratamento) de forma que a umidade do solo aumenta de um valor mensurável e testa-se a hipótese acima novamente.

3. Balanço de água em bacias de drenagem. Permite uma medição direta através da solução da equação [2.1] para  $E_t$ , em que os termos do lado direito podem ser medidos:

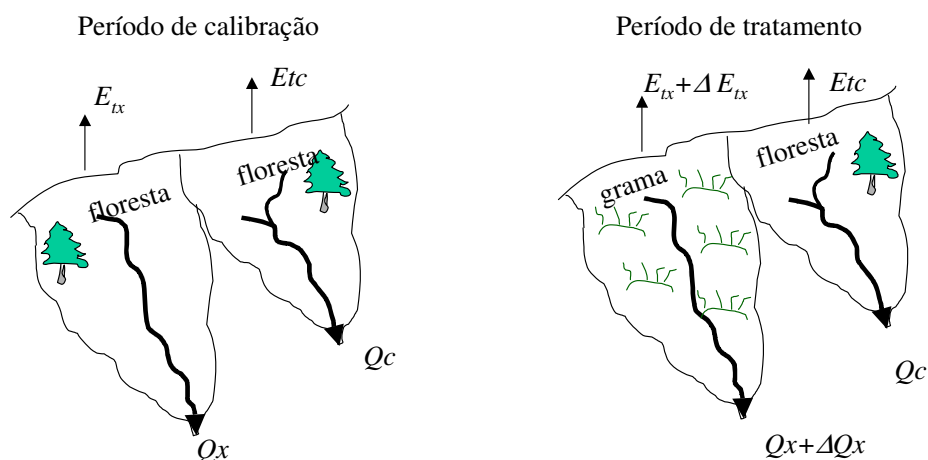
$$E_t = P_g - Q - \Delta S$$

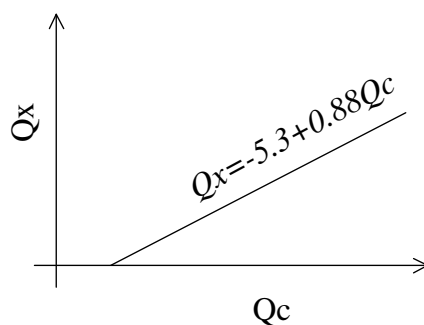
Tomando-se a média de vários anos a variação de estoque tende para 0. Se houver mudança no uso da terra, a estimativa de  $E_t$  torna-se imprecisa.

4. Método das microbacias pareadas. Visa principalmente medir diferenças de  $E_t$  entre dois tipos ou mais de cobertura, pelo uso de duas microbacias próximas e de tamanho similar, num esquema experimental como o que segue:

	Bacia X	Bacia C
Período de calibração	Sem mudança	Sem mudança
Período de tratamento	tratamento	Sem mudança

$P_g$  e  $Q$  são medidos nas duas bacias e o termo  $(\Delta S_c - \Delta S_x)$  tende para 0 numa base anual. O sucesso do método baseia-se na alta correlação que existe entre  $Q_c$  e  $Q_x$  quando a cobertura é a mesma. Tal correlação é estabelecida durante o período de calibração, resultando numa equação prognóstica.





$Q_x$ (cm/ano)	$Q_c$ (cm/ano)	$Q_x$ (cm/ano)	$Q_c$ (cm/ano)	$Q_x_{est}$	$Q_x - Q_{x_{est}}$
50,8	63,5	61	50,8	39,4	21,6
30,5	40,6	48,3	40,6	30,5	17,8
59,7	73,6	61	61	48,3	12,7
				Soma	52,1
				$\Delta E_{tx} =$	52,1 cm/ 3 anos
					= 17,4 cm/ano

Considera-se que as mudanças de  $Q_x$  são devidas ao tratamento, ou seja, mudanças em  $E_t$  quando a floresta foi substituída por vegetação rasteira (grama), visto que as condições meteorológicas são as mesmas para as duas microbacias.