

R · E · V · I · S · T · A

# indústria da água

PONTO DE VISTA

**RECURSOS HÍDRICOS,  
PLANEAMENTO  
E ABASTECIMENTO PÚBLICO**

*António do Nascimento Pinheiro*

CONTROLO DE QUALIDADE

**CONTAMINAÇÃO DA RIA DE AVEIRO  
COM MERCÚRIO**

*M. E. Pereira*

*A. C. Duarte*

Trimestral • Ano 6 • Jul/Ago/Set 1997 • N.º 24 • 500\$00

# A ÁGUA E A BIOSFERA: (III)

## A Intersecção da Chuva pelas Cobertas Vegetais

Adélio A. S. C. Machado

Professor do Departamento de Química da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Na sequência do artigo anterior, em que se discutiu um dos processos mais importantes da interacção da vegetação com o ciclo da água, a transpiração, este artigo trata o segundo processo que constitui essa interacção, a chamada *intersecção* da chuva pelas cobertas vegetais. Depois de se apresentarem algumas definições básicas, descreve-se o modelo de Rutter para o tratamento das *perdas de intersecção* e discute-se brevemente a importância hidrológica destas.

### A INTERSECÇÃO E AS PERDAS DE INTERSECÇÃO

Chama-se *intersecção* à retenção da chuva nas cobertas vegetais, de onde uma parte se evapora directamente para a atmosfera sem atingir o solo. Esta fracção da precipitação evaporada directamente da cobertura constitui as chamadas *perdas de intersecção*, que são uma parte significativa da evapotranspiração na maioria das regiões. Embora caia fora do âmbito do presente artigo, deve referir-se aqui que a intersecção tem também um efeito significativo na composição da água da chuva que atinge o solo: apesar desta contactar as folhas e outros constituintes da cobertura apenas durante um intervalo de tempo curto, a água dissolve sólidos depositados nas superfícies das plantas a partir do ar (deposição seca) e lixívia componentes das próprias folhas (nomeadamente, substâncias orgânicas). Estas alterações de composição podem ter consequências na erosão do solo e na qualidade das águas superficiais (nascentes, rios, etc.). Em certas condições, a vegetação pode retirar água directamente das nuvens e do nevoeiro, aumentando assim o fluxo de água entrada no respectivo balanço para a região; neste caso, chama-se ao fenómeno *intersecção positiva* (ou *precipitação oculta*).

A intersecção da chuva e a intersecção da neve são fenómenos algo diferentes. No caso da intersecção da neve, a maioria da água cai para o solo como sólido ou após fusão; como a fracção sublimada para a atmosfera é muito baixa, os efeitos hidrológicos da intersecção da neve

são limitados e, por isso, este fenómeno não será aqui considerado.

As perdas de intersecção dependem fundamentalmente de dois factores: (I) a natureza da vegetação e seu estado de desenvolvimento, caracterizado pelo índice folha-área (que foi definido no artigo anterior desta série, *A Água e a Biosfera (II), A Transpiração das Plantas, RIA*, número 21, pág. 3 (1996); e (II) as características da precipitação (intensidade, duração, frequência e forma das chuvadas). A natureza da vegetação é frequentemente alterada pelo homem, por exemplo, por desflorestação para obtenção de madeira ou utilização agrícola do solo, o que tem consequências hidrológicas, tal como o aquecimento global (ver os artigos anteriores *A Água na Terra (I) A Importância da Água no Funcionamento do Planeta e (II) O Passado e o Futuro do Ciclo da Água, RIA*, números 10, pág. 8, e 11, pág. 6 (1994), respectivamente). Por isso, há presentemente muito interesse pela compreensão e modelagem das perdas por intersecção, para permitir avaliar o efeito no ciclo da água, a nível global e local, das referidas alterações de vegetação. Um problema crítico, por exemplo, é saber até que ponto as perdas de intersecção evaporadas da cobertura substituem a transpiração ou se lhe adicionam, já que esta última também é afectada pelas alterações naturais e antropogénicas da vegetação e tem influência no ciclo da água a nível local.

#### Esquema da intersecção e definição das perdas.

A intersecção é um fenómeno complexo, que pode ser representado simplifadamente pelo diagrama apresentado na Fig. 1. Este esquema envolve um conjunto de caudais que são definidos na Tabela 1. As definições referem-se a uma área de solo suficientemente grande para ser representativa da vegetação, isto é, que entre em consideração com os espaçamentos médios entre as árvores. Os símbolos representam volumes de água por unidade de superfície de solo e por unidade de tempo, sendo expressos nas dimensões de uma velocidade ( $LT^{-1}$ ). Só uma parte da *precipitação global* ( $P$ ) atinge

**TABELA 1**

**Caudais envolvidos na intersecção e relações entre eles**

Símbolo	Nome	Definição
P	Precipitação global	Precipitação medida acima da cobertura vegetal
Ps	Precipitação no solo	Precipitação que atinge o solo, quer directamente quer pingando da cobertura
Pt	Escorrimento pelos troncos	Água que atinge o solo escorrendo ao longo dos ramos e troncos
Ec	Perdas de intersecção na cobertura	Água evaporada directamente da cobertura
E1	Perdas de intersecção no lixo vegetal	Água evaporada dos resíduos vegetais (e plantas rasteiras) que recobrem o solo
Et	Perdas de intersecção totais	Soma das perdas de intersecção na cobertura e no lixo vegetal $Et = Ec + E1$
Pe	Precipitação efectiva (ou real)	Precipitação global menos as perdas de intersecção totais $Pe = P - Et$

o solo, directamente, ou caída da cobertura (Ps), ou por escorrimento pelos troncos (Pt); a outra parte é evaporada directamente da cobertura (Ec) ou dos resíduos de árvores (lixo vegetal) que recobrem o solo (E1), cuja soma constitui a evaporação total (Et). A parte da precipitação que atinge o solo e penetra neste é a *precipitação efectiva* (Pe).

Os caudais são relacionáveis por balanços materiais da água. O balanço do sistema global é:

$$P = Pe + Et \quad (1)$$

e o da evaporação

$$Et = E1 + Ec \quad (2)$$

Estas expressões conduzem às definições de precipitação efectiva e evaporação total apresentadas na Tabela 1.

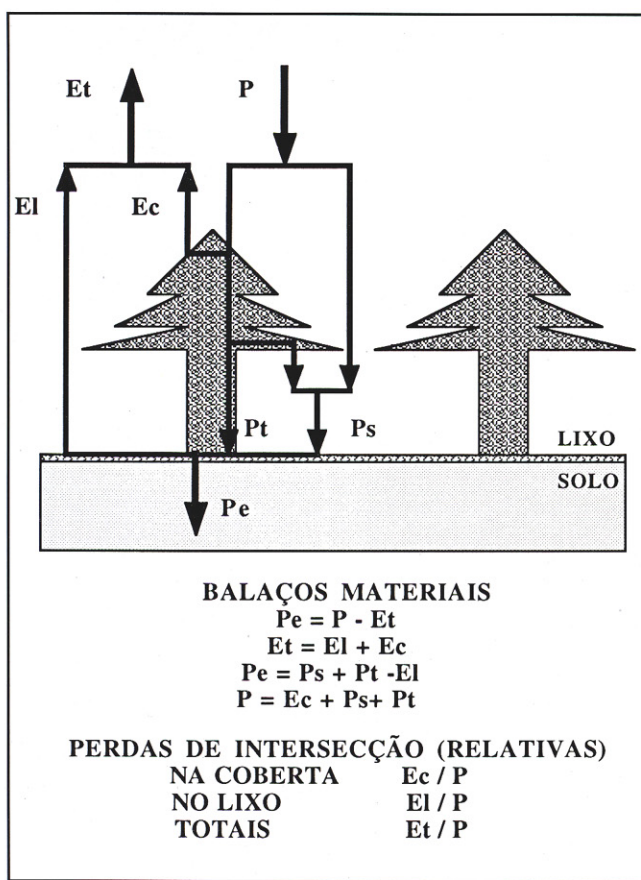


Fig. 1 – Esquema da intersecção (ver o significado dos símbolos na Tabela 1).

Outras duas relações importantes são obtidas pelos balanços materiais à superfície do solo (ao lixo vegetal).

$$Pe = Pt + Ps - El \quad (3)$$

e à cobertura

$$P - Ps = Pt + Ec \quad (4)$$

que conduz a

$$Ec = P - (Ps + Pt) \quad (5)$$

As perdas de intersecção na cobertura, em valor relativo, são dadas pela razão  $Ec/P$ . Semelhantemente, as perdas de intersecção no lixo vegetal e totais são dadas, respectivamente, pelas razões  $El/P$  e  $Et/P$ .

### Medição das perdas de intersecção.

As perdas de intersecção não podem ser medidas directamente, mas podem ser avaliadas usando a expressão (5), isto é, subtraindo à

precipitação global a precipitação no solo e o escoamento pelos troncos ou caules (o caudal de escoamento é, em geral, muito menor que o caudal de precipitação no solo). Como a medição de qualquer destas grandezas é imprecisa, devido à complexidade dos sistemas e à variabilidade espacial e temporal quer da chuva, quer do vento, quer da vegetação, os resultados são grosseiros e não extrapoláveis para sistemas ou estações diferentes dos medidos.

Os resultados obtidos em diversos períodos de chuva para uma dada zona são, em geral, tratados por regressão linear, conduzindo a relações do tipo

$$Y = a\gamma P + b\gamma \quad (6)$$

em que  $P$  é precipitação global, e  $Y$  é um dos outros caudais envolvidos na intersecção,  $Ps$ ,  $Pt$ ,  $Ec$ ,  $El$  ou  $Et$ , definidos na Tabela 1 (os poucos estudos de determinação de  $El$  conduzem a valores entre  $0,02P$  e  $0,05P$ ). Por exemplo, para diversos tipos de pinhal (nos Estados Unidos) obteve-se um resultado médio, para  $Y = Ps + Pt$ , traduzido por (caudais em cm)

$$Ps + Pt = 0,978 P - 0,051 \quad (7)$$

Uma vez determinados os parâmetros empíricos  $a\gamma$  e  $b\gamma$ , a partir do conhecimento do regime de precipitação, sazonal ou anual, podem-se estimar os caudais cumulativos, por estação ou por ano, pela expressão

$$\sum Y = a\gamma \sum P + b\gamma n \quad (8)$$

em que  $n$  é o número de períodos de chuva e os somatórios indicam caudais cumulativos por estação ou por ano. Para o caso do pinhal, admitindo que  $El = 0,04P$ , a expressão dada acima conduz a

$$\sum Pe = \sum (Ps + Pt - El) = 0,938 \sum P - 0,051n \quad (9)$$

ou seja

$$\sum Pe / \sum P = 0,938 - 0,051(n / \sum P) \quad (10)$$

Esta expressão mostra que a fracção de precipitação efectiva diminui com o número de períodos de chuva,  $n$ , e que o aumento da fracção de precipitação efectiva com a precipitação global se atenua à medida que esta cresce (ver a Fig. 2).

Em estudos deste tipo raramente foi determinado paralelamente o índice folha-área, pelo que é impossível avaliar o alcance da aplicabilidade das relações obtidas. Em consequência, estas só podem ser usadas com confiança para as zonas em que foram obtidas e não podem ser aplicadas na previsão dos efeitos das alterações na vegetação.

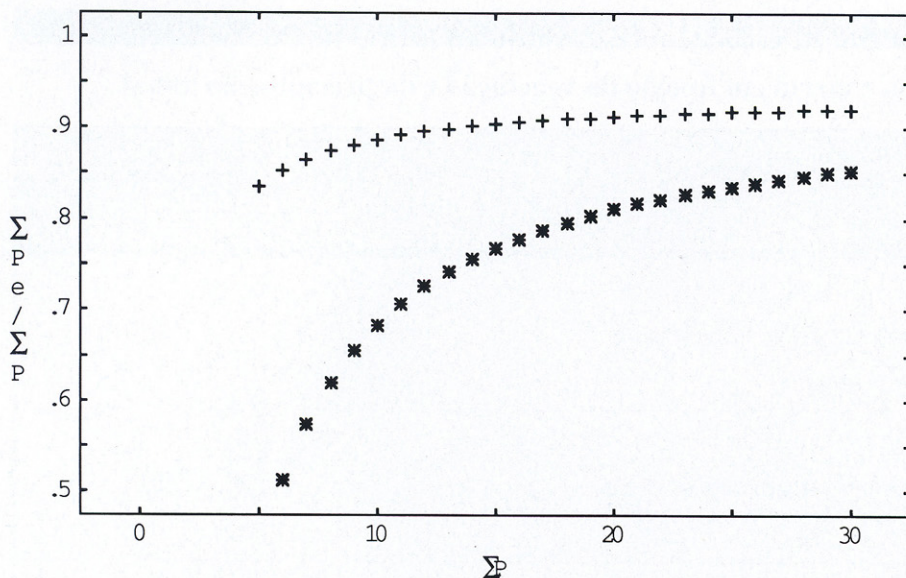


Fig. 2 - Variação da fracção de precipitação efectiva,  $\Sigma P_e/\Sigma P$ , com a precipitação global,  $\Sigma P$ , em função do número de períodos de chuva,  $n=10$  (+), 59 (\*).

uma a três horas). Os reservatórios são alimentados pela precipitação,  $P(t)$ , e esvaziados por evaporação,  $E(t)$ , e por escoamento,  $D(t)$ , sendo todos estes caudais variáveis no tempo. O caudal de alimentação do reservatório da cobertura é dado por  $(1 - p - p_t) P(t)$ ; semelhantemente, o caudal de alimentação remanescente,  $pP(t)$ , atinge directamente o solo.

Quando a quantidade de água na cobertura,  $C(t)$ , excede a capacidade do respectivo reservatório,  $S$ , ocorre evaporação da canópia,  $E(t)$ , sendo o respectivo fluxo calculado pela equação de Penman,  $EP(t)$  (equação 13 do artigo anterior desta série, *A Água e a Biosfera (II) A Transpiração das Plantas*, RIA, número 21, pág. 3 (1996); quando  $C(t) < S$ , o fluxo de evaporação é reduzido na proporção  $C(t)/S$ , sendo dado por  $EP(t)C(t)/S$ . Usa-se a equação de Penman, e não a equação de Penman-Monteith

### MODELAÇÃO DAS PERDAS DE INTERSECÇÃO

Em consequência, por um lado, das limitações quanto ao alcance de aplicação das equações empíricas do tipo anteriormente apresentado, e, por outro, do interesse que há em simular as perdas de intersecção em modelos que permitam previsões, tem-se investigado o desenvolvimento de modelos conceptuais da intersecção. Na Fig. 3 esquematiza-se o modelo mais usado, devido originariamente a Rutter (1971). Este modelo envolve dois reservatórios, um referente à cobertura (folhas e ramos) e o outro aos troncos, que são caracterizados pelas respectivas capacidades, a *capacidade da cobertura*,  $S$ , e a *capacidade dos troncos*,  $S_t$  (ambas medidas em altura de coluna de água). Além destas duas grandezas, o modelo envolve outros dois parâmetros que reflectem a estrutura da vegetação: o *coeficiente de precipitação no solo*,  $p$ , definido como sendo a fracção de chuva que atinge o solo sem embater na cobertura; e o *coeficiente de penetração nos troncos*,  $p_t$ , a fracção de chuva que atinge os troncos (ambos estes parâmetros são adimensionais). O modelo calcula o balanço de água corrente nos dois reservatórios, cobertura (folhas e ramos) e troncos, segundo o esquema da figura, para intervalos de tempo fixos ( $\Delta t$ , em geral

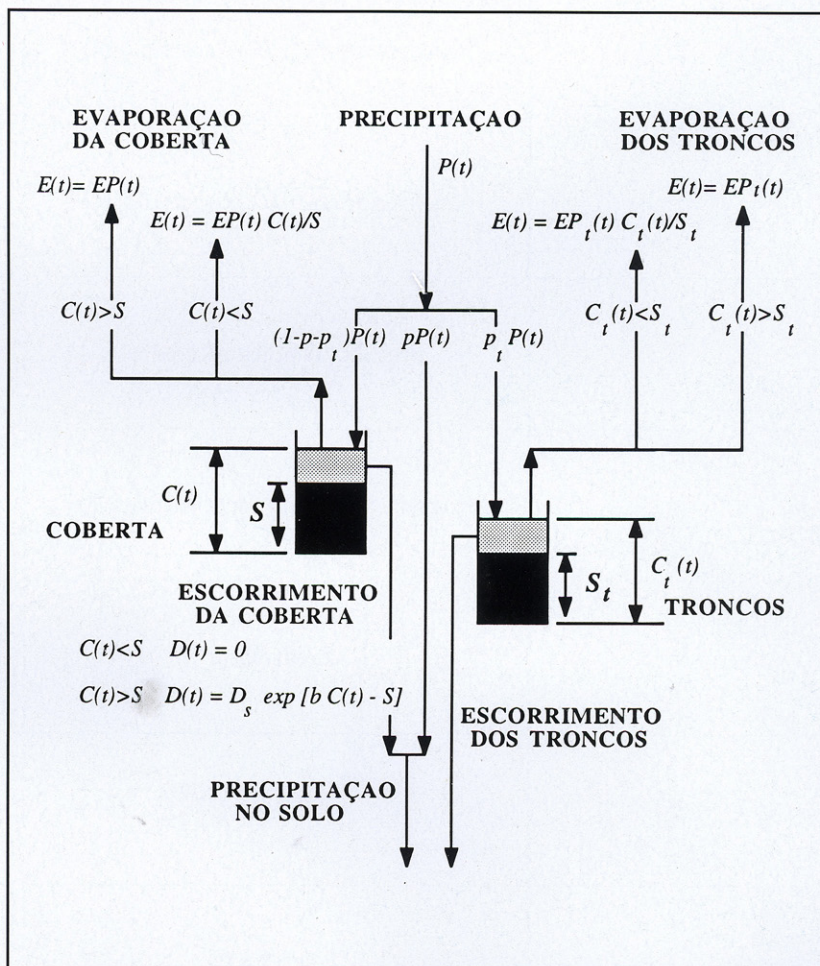


Fig. 3 - Modelo de Rutter para a intersecção (ver o significado dos símbolos no texto).

**TABELA 2**

**Perdas de intersecção na cobertura em função da vegetação e da precipitação anual**

Latitude (°)	Local/Vegetação	Precipitação anual (cm)	Ec/P
3	Manaus (Brasil)/Floresta tropical	281	0,09
10	Nigéria/Floresta em zona de savana		0,05
35	Carolina do Norte (EUA)/Pinhal (60 anos)	203	0,09
35	Carolina do Norte (EUA)/Pinhal (35 anos)	203	0,19
35	Carolina do Norte (EUA)/Pinhal (10 anos)	203	0,15
51	Hampshire (Inglaterra)/Carvalhal		0,18
51	Hampshire (Inglaterra)/Carvalhal (sem folha)		0,12
55	Escócia/Abeto	97	0,32
56	Escócia/Abeto	213	0,28
58	Escócia/Pinhal	64	0,42

(equação 12 do referido artigo), porque se trata de evaporação a partir de uma superfície e não de transpiração a partir dos estomas (a condutância da cobertura é considerada infinita,  $C_{cob} = \infty$ ). Em consequência, a velocidade de evaporação a partir da cobertura é superior à velocidade de transpiração nas mesmas condições, particularmente para florestas, em que os efeitos de rugosidade na eficiência da transferência turbulenta de massa se traduzem em valores elevados da condutância atmosférica,  $C_{at}$ .

Quanto ao escoamento, quando a quantidade de água na cobertura é inferior à capacidade do respectivo reservatório  $C(t) < S$ , o fluxo de escoamento é nulo. Quando  $C(t) > S$ ,  $D(t)$  é calculado pela expressão

$$D(t) = D_s \exp [b (C(t) - S)] \quad (11)$$

em que as constantes  $D_s$  e  $b$  são determinadas por via empírica ( $b = 37$  e  $D_s = 3,17 \times 10^{-5} S$ , quando  $C(t)$  e  $D_s$  em cm/s).

Os parâmetros que definem a estrutura da cobertura são determinados a partir de expressões de regressão expressas pela equação (6). Por exemplo,  $p_i$  e  $S_i$  são, respectivamente, o declive e a ordenada na origem da recta  $P_t = P_t(P)$ ;  $p$  é o declive da recta  $P_s = P_s(P)$  para chuvas fracas, insuficientes para molhar a cobertura. A determinação de  $S$  é mais complexa; para florestas, conduz a valores tipicamente no intervalo 0,07 a 0,11 cm.

O modelo de Rutter para a intersecção foi testado com êxito em situações diversas. O modelo exige trabalho de campo para determinar os parâmetros de estrutura da cobertura e dados meteorológicos finos (à escala da hora) para calibração.

### IMPORTÂNCIA HIDROLÓGICA DAS PERDAS DE INTERSECÇÃO

As perdas de intersecção na cobertura variam muito com o tipo de vegetação e o regime climatérico, mas, para as florestas, são quase sempre significativas, atingindo vulgarmente 10 a 30% da precipitação global ou mesmo mais (ver a Tabela 2). Mais difícil é avaliar até que ponto estas perdas ocorrem cumulativamente ou em substituição das perdas de água por transpiração, o que depende de muitos factores, que são função da natureza da cobertura e do regime hidrológico. Nas estações frias em que a actividade vegetativa das plantas é reduzida, é de esperar que as perdas de intersecção ocorram cumulativamente às de transpiração. Na estação de crescimento, a água de intersecção evaporar-se-á de preferência à água nos estomas.

Em florestas, a velocidade de evaporação da água de intersecção é várias vezes superior à de transpiração nas mesmas condições, pelo que as perdas de intersecção só em pequena parte são compensadas pela supressão invernal da transpiração. As zonas de vegetação rasteira têm condutâncias atmosféricas muito inferiores às florestas e as respectivas perdas de intersecção são comparáveis às perdas por transpiração;

neste caso, a redução de transpiração compensa uma parte significativa da evaporação devida a intersecção, e esta não contribui muito para um aumento da evapotranspiração.

Segundo foi demonstrado por diversos estudos, a desarborização das florestas aumenta os caudais hidrológicos nas respectivas áreas. A extensão deste efeito é aproximadamente proporcional à fracção de cobertura vegetal destruída. O fenómeno resulta da diminuição da evapotranspiração em consequência de várias causas que actuam paralelamente, umas directamente na evapotranspiração, outras a nível dos fenómenos de absorção de água do solo, nomeadamente: (I) diminuição do índice folha-área; (II) diminuição da evaporação directa da intersecção; (III) diminuição da altura da zona de raízes onde a água transpirada é extraída do solo pelas árvores; e (IV) decréscimo da densidade de raízes. Se os efeitos directos na evapotranspiração são difíceis de avaliar, como mostra a discussão neste artigo e no imediatamente anterior (*A Água e a Biosfera (II) A Transpiração das Plantas*, RIA, número 21, pág. 3 (1996)), as interações das plantas com o solo são ainda mais difíceis de estudar, e os resultados até agora obtidos são incipientes.

### CONCLUSÕES

O presente artigo procurou mostrar até que ponto é possível descrever a chamada intersecção da chuva pelas cobertas vegetais, uma componente importante das interações que ocorrem na interface solo - vegetação - atmosfera e que influencia marcadamente o ciclo da água. Tal como a transpiração das plantas (ver o artigo imediatamente anterior desta série), o conhecimento do fenómeno é ainda limitado, mesmo à escala local; por outro lado, como a relação entre a intersecção e a transpiração é subtil e complexa, levanta ainda muitas dúvidas, mesmo à referida escala local (por exemplo, uma floresta). Em conclusão, terá de ser desenvolvido muito trabalho adicional antes que se consiga descrever os dois fenómenos a maior escala, continental ou global, e dominar completamente o conhecimento sobre o papel da água nas interações solo - vegetação - atmosfera e sobre a influência destas interações no ciclo da água.

### Sugestões para Leitura Adicional

S.L.Digman, "Physical Hidrology", Macmillan, 1994

W.H.Schlesinger, "Biogeochemistry: An Analysis of Global Change", Academic, 1991