

POR

Michel Molinier¹, Pierre Audry², Jean Claude Leprun³

RESUMO -- Este trabalho pretende estabelecer um modelo de simulação vertical da infiltração a partir do estudo detalhado dos caracteres dos solos e da análise da dinâmica da água dentro dos mesmos, através de medições de perfis neutrônicos e tensiométricos sob chuvas naturais e simuladas. Nesta finalidade foram efetuados estudos, com escala métrica, em um local agrupando três tipos de solos brunos não cálcicos e vertisols. Os dados e resultados coletados levaram a conhecer melhor a influência do solo e da vegetação sobre a infiltração e, logo, o escoamento; e assim definir um esquema de funcionamento desses solos brunos representativos de cerca de 15% do Nordeste semi-árido. A partir desse esquema, evidenciando os diferentes fluxos de água, foi possível definir cada componente do modelo vertical. Além de simular o escoamento, a infiltração e as drenagens, a modelagem deve ser capaz de simular o efeito de escala. Por isso, é preciso interligar esses modelos verticais por leis de transferências laterais, integrando os resultados obtidos na bacia experimental de Sumé onde existe um conjunto de parcelas e bacias hidrográficas de 100m² a 10km².

INTRODUÇÃO

As técnicas de irrigação no Nordeste ainda são pouco espalhadas exceto nas áreas irrigadas graças aos açudes públicos do DNOCS. A valorização das terras desta região não será possível sem uma grande divulgação dessas técnicas, mas, para que os resultados das mesmas não se tornem catastróficos (salinização dos solos ou esgotamento das reservas de águas antes do final do crescimento das culturas), é preciso conhecer melhor a estrutura dos solos e a necessidade de água das plantas, permitindo assim aplicar de modo adequado as doses de irrigação e de lixiviação.

Com o fim de evitar aqueles inconvenientes há que se avaliar o balanço hídrico daquelas culturas através de medições de campo. Esse trabalho, desenvolvido na bacia experimental de Sumé no Sertão da Paraíba, pretende dar um primeiro passo no alcance desse objetivo graças à modelagem dos diferentes componentes do ciclo hidrológico em função dos parâmetros do ecossistema estudado.

A metodologia consiste, primeiro, em identificar os fluxos (escoamento, infiltração e drenagem) gerados por uma chuva

(simulada ou natural) caindo sobre um solo de superfície, de constituição e de manejo conhecido; esses últimos (tamanho da área, pedologia, geologia, cobertura vegetal) serão os parâmetros do modelo. Depois da identificação, a modelagem permitirá quantificar aqueles fluxos e assim avaliar o balanço hídrico através da calibração do modelo.

DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO E METODOLOGIA

Dispositivo experimental

O dispositivo experimental é o mesmo daquele já descrito anteriormente por Molinier, Galvão e Gomes (1987) nos solos brunos não cálcicos vérticos da bacia experimental de Sumé (PB), com algumas modificações no que diz respeito às microparcelas de 1m². Basicamente esse dispositivo inclui:

- 4 microparcelas de 0.5 a 1ha (2 com solos desmatados e 2 sob caatinga)
- 9 parcelas de 100m² com vários tipos de manejo de solo e de cobertura vegetal
- 11 microparcelas de 1m² entre as quais 7 permitiram o estudo do escoamento superficial e da infiltração em função da umidade prévia do solo e da cobertura vegetal e 4 delas, instaladas em 1988 dentro de uma parcela maior de 750m² (30m x 25m) localizada sobre uma vertente, foram utilizadas para a caracterização de uma toposequência e a identificação dos fluxos.

Metodologia

Os estudos sob chuvas simuladas com um minissimulador de chuva -Molinier (1985)-, tensiômetros e medições neutrônicas da umidade do solo permitiram:

- estabelecer relações entre a lâmina escoada (LE), a pluviometria (P) e a umidade prévia dos solos antes da chuva, umidade representada por um índice pluviométrico (IP)
- conhecer melhor a intensidade da infiltração através da camada superficial do solo;
- analisar a dinâmica interna chegando assim a identificar os diversos fluxos dentro do solo e tornando possível a descrição de um esquema de funcionamento desses solos brunos não cálcicos.

Ao mesmo tempo, os estudos sob chuvas naturais nas microparcelas de 1ha, nas parcelas de 100m² e também nas microparcelas de 1m² permitiram comparar os resultados obtidos com os achados sob chuvas simuladas e assim estabelecer o mesmo tipo de relações $LE=f(P,IP)$ para cada área estudada destacando, portanto, o papel da superfície e da vegetação sobre o escoamento e a infiltração.

A última etapa foi a organização de um modelo simulando os fluxos (escoamento, infiltração, drenagens verticais e laterais) determinados por ocasião da análise da dinâmica interna.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

Nº : 30940 u 1

Cote : B

¹ Pesquisador hidrologo, ORSTOM (Instituto Francês de Pesquisa Científica para o Desenvolvimento em Cooperação)-UFPE, Recife, PE.

² Diretor de pesquisa, pedólogo, ORSTOM-CNPq, Recife, PE.

³ Diretor de pesquisa, pedólogo, ORSTOM-EMBRAPA, Brasília, DF.

- Na zona de estudo o tipo de solo dominante é o solo bruno não cálcico vértico apresentando o perfil médio seguinte :
- horizonte A de 20 cm de espessura, bruno acizentado, textura franco-areno-argilosa fase pedregosa com estrutura poliédrica a cúbica e porosidade média;
 - de 20 a 70 cm um horizonte B bruno, textura franco-argilo-arenosa, estrutura cúbica a prismática até maciça com uma porosidade muito fina;
 - de 70 a 90 cm um horizonte (B)C de textura areno-argilosa oriundo de um gnaíse com anfibólito.

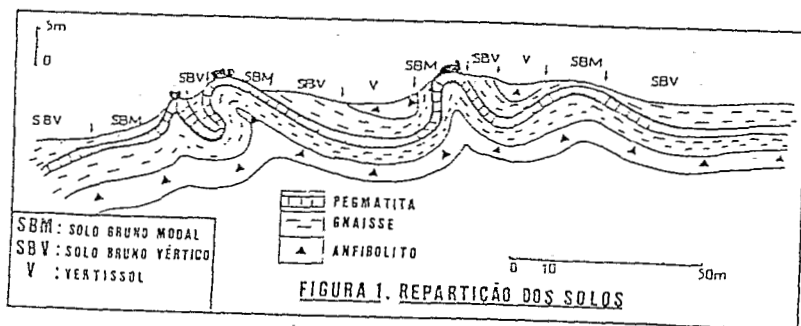
A passagem aos outros solos

Nas pequenas depressões, o horizonte A perde suas características e o B invade o perfil apresentando caracteres mais vérticos. O solo é mais profundo (até 1 metro) e a rocha, de textura mais fina, é do tipo anfibólito.

Ao contrário, em cima das vertentes, o solo torna-se bruno modal, pouco espesso e pedregoso (50-70 cm) e pode chegar até o litossol : o horizonte B desaparece, o A invade o perfil e passa diretamente ao C. A rocha é do tipo pegmatita com quartzo e feldspato.

As consequências da litodependência

A sucessão das rochas da superfície para o fundo corresponde geralmente à ordem decrescente da dureza e resistência à alteração, isto é : pegmatita quartzítica feldspática, gnaíse com anfibólito, anfibólito; mas as sucessões são muito diversificadas por causa da tectônica atormentada. A Figura 1 apresentando um perfil de 200 metros de comprimento, mostra as camadas paralelas das rochas (a espessura é da ordem decimétrica) com uma estrutura muito falhada e pregueada.



Do ponto de vista morfológico isso ocasiona também uma grande diversificação e, especialmente, explica que entre os tipos brunos vérticos e os brunos modais onde o B argiloso é quase inexistente, tem toda uma série de solos intermediários brunos não vérticos tendo um B mais o menos diferenciado.

em cada escala de superfície, as consequências da estreita dependência dos horizontes e dos solos de um lado, e da morfologia de outro lado, em relação à estrutura geológica e à natureza dos solos:

- nas vertentes onde os solos brunos vérticos são dominantes, cada ocorrência de pegmatita será marcada por uma saliência topográfica e a aparição de solos brunos modais, enquanto as micro-depressões correspondem geralmente a uma rocha básica mais alterável e aos vertissols;
- acontecerá a mesma coisa nas bacias hidrográficas : os cimos correspondem a uma ossatura da rocha dura, e a parte alta das vertentes terão uma maior proporção de solos brunos modais.

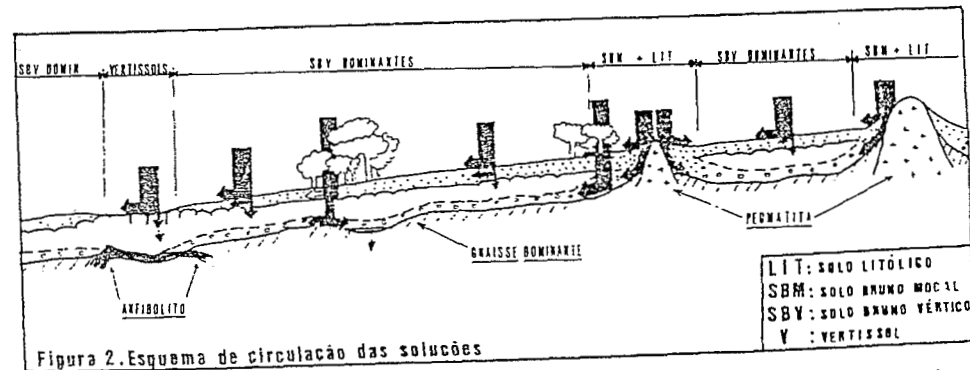
IDENTIFICAÇÃO DOS FLUXOS

Sistema de circulação

Neste sistema onde as diferenciações são fortes, contrastadas e rápidas, agrupamos esquematicamente os horizontes em duas grandes classes:

- os horizontes porosos e permeáveis. Trata-se, de um lado, dos horizontes A dos solos brunos não vérticos e da totalidade dos solos, pouco desenvolvidos passando aos solos litólicos, correspondentes à alteração da pegmatita e, de outro lado, das arenas de alteração do gnaíse. Estes horizontes têm uma fraca capacidade de armazenamento, mas são os condutores do sistema.
- os horizontes B compactos, pouco permeáveis. Trata-se dos horizontes B vérticos. A proporção importante de argila granulométrica e o grande poder de contração e expansão em sua massa fazem com que essas camadas fiquem pouco permeáveis, mas com a possibilidade de reter grandes quantidades de água quando molhadas.

Combinando esses caracteres com a organização espacial descrita acima, chegamos ao esquema de funcionamento da Figura 2.



Pode-se acrescentar que o estudo da mineralogia dos solos indica um estado pouco desenvolvido o que constitui um argumento a favor do funcionamento atual do sistema como proposto no esquema da Figura 2, onde os únicos meios confinados são as pequenas depressões de vertissols. O sistema todo funciona em sistema aberto : os horizontes A exportam e os horizontes B têm um comportamento intermediário.

Relações chuva escoamento -- O dispositivo de medições (microparcelas de 1m², parcelas de 100m² e microbacias de 1ha) permitiu estudar o escoamento em três escalas de superfície sobre solo nu e sob cobertura vegetal. Molinier, Galvão e Gomes (1987) apresentaram, com os primeiros resultados obtidos, uma relação dando a lâmina escoada (LE) em função da chuva (P) e do logaritmo de um índice de umidade (IP) representando o estado de umedecimento do solo antes da chuva responsável da cheia. A relação dando esse índice é de forma exponencial:

$$IP_n = (IP_{n-1} + P_{n-1}) * \exp(-at) \quad (1)$$

Agora com um maior acervo de dados, sobretudo nas microparcelas de 1m², essas relações foram aperfeiçoadas e têm as seguintes formas:

$$LE = a.P + b.IP + c \quad [\text{solos desmatados}] \quad (2)$$

$$LE = \alpha.P + \beta.P.IP + \Gamma.IP + \delta \quad [\text{solos sob caatinga}] \quad (3)$$

A tabela 1 apresenta os valores dos diferentes coeficientes para cada uma das três superfícies estudadas sobre solos brunos não cálcicos verticais, desmatados e com cobertura de caatinga; e a Figura 3 dá a representação gráfica dessas relações para os 5 casos estudados e 2 índices de umidade (50: seco e 300: úmido).

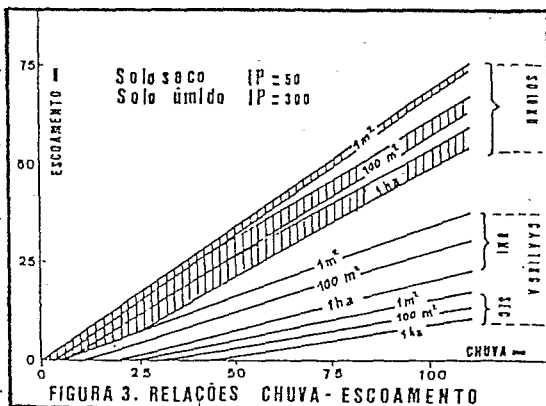


FIGURA 3. RELAÇÕES CHUVA-ESCOAMENTO

Os coeficientes a, b, c, α , β , Γ , δ são diretamente função da superfície correspondente. Assim, pode-se calcular o valor da lâmina escoada (LE) em função da chuva responsável, do índice de umidade (IP) e do logaritmo da superfície (logS) por meio das relações seguintes:

$$\text{solo nu: } LE = 0,69.P - (0,033.P - 0,003.IP). \log S + 0,010.IP - 5 \quad (4)$$

$$\text{caatinga: } LE = 0,165.P + 0,00064.P.IP + 0,0116.IP - 5,26 - \log S (P/129 + P.IP/16000 + IP/784 + 0,42) \quad (5)$$

Essas relações ajudarão na calibração do modelo, pelo menos o que diz respeito ao escoamento superficial.

Tabela 1. Valores dos coeficientes das relações $LE=f(P, IP, S)$

	Solos nus			Solos sob caatinga			
	a	b	c	α	β	Γ	δ
1m ²	0.691	0.009	-3.1	0.165	0.00064	0.0116	-5.26
100m ²	0.605	0.016	-4.5	0.149	0.00052	0.0090	-6.10
1ha	0.558	0.020	-7.9	0.134	0.00039	0.0065	-6.94

Papel da vegetação -- O estudo do comportamento das superfícies de 100m² e 1ha efetuado desde 1982, e os resultados obtidos recentemente sobre microparcelas de 1m², evidenciam o papel da vegetação sobre o escoamento. O gráfico da Figura 4 apresenta os valores do escoamento sob caatinga em função do escoamento sobre solo nu para a mesma chuva e em condições comparáveis de umidade prévia do solo.

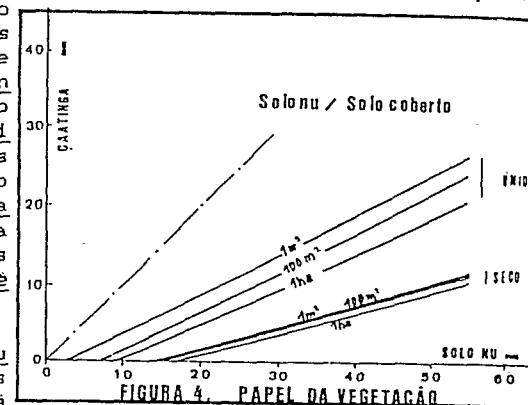


FIGURA 4. PAPEL DA VEGETAÇÃO

Observa-se que a redução do escoamento é mais acentuada quando o solo está mais seco. De fato, com um solo seco a influência da vegetação sobre a infiltração é preponderante. Mas quando os solos estão muito úmidos, essa influência diminui e o horizonte A, aproximando-se da saturação, torna-se um dos fatores principais limitando a infiltração.

Além disso, o gráfico da Figura 4 mostra que, nas microbacias de 1ha, os solos sob caatinga retêm os 10 a 20 primeiros milímetros (conforme ao estado de umedecimento dos solos) que escoam nas microparcelas desmatadas. Depois, os mesmos só reterão, por ocasião das chuvas fortes, entre 60 e 80% da parte superior a aqueles 10 ou 20 primeiros milímetros.

Dinâmica interna

Em conclusão, dentro do solo, observou-se os fluxos apresentados a seguir.

Infiltração superficial -- Já vimos no item anterior que em cada escala de superfície, a cobertura vegetal aparece como o fator determinante do escoamento. Na realidade o mecanismo em ação é a degradação da estrutura superficial do solo quando a superfície não é protegida do impacto direto das chuvas com fortes intensidades. Os experimentos de campo mostraram que o horizonte A não se comporta somente como um simples reservatório que se encha, mas que suas relações com os horizontes contíguos, para os quais ele transmite os fluxos, são também determinante.

As transferências de A para B e C -- No que diz respeito aos solos brunos modais sem horizonte B textural e dos solos litólicos, a infiltração progride com rapidez até a base do solo. Estes solos constituem zonas de infiltração preferencial sobretudo quando são cobertos de vegetação.

No caso de solos brunos verticais, os fenômenos são muito mais complicados. As transferências verticais de A para B muito lentas enquanto o horizonte A não está perto da saturação. A redistribuição de A em proveito de B, e dentro do B, é também muito lento. Esta dinâmica bem contrastada entre A e B leva, com uma chuva suficiente, o horizonte A à saturação criando condições de drenagem lateral. Portanto, essa diferenciação do perfil é um

dos fatores importantes do funcionamento hídrico superficial desses solos. A ausência de vegetação aumenta este efeito desviando uma grande parte das circulações para o escoamento. Pode também acontecer alguns curto-circuitos do B: a água chega na base do B sem molhá-lo. A heterogeneidade dos solos, a presença de raízes, as fendas, etc... explicam a existência de um sistema de vias de circulação rápida muito diversificado.

As drenagens -- A existência de drenagens oblíquas nas condições experimentais foi confirmada graças à comprovação da presença de lençóis dentro da alteração. Esses lençóis escoam cada vez que a topografia interna faz aparecer um gradiente hidráulico. Entretanto, é muito difícil avaliar esse termo. Ao fechar o balanço hídrico, constatou-se a existência de perdas, as vezes de mais da metade da chuva. Mas esse termo inclui também a drenagem oblíqua devida aos efeitos de bordura que são mais importantes quando a parcela é menor.

Pode também existir uma drenagem vertical na base do solo, a respeito do qual não se tem nenhum dado. Tudo indica que é fraco e localizado, em relação à heterogeneidade e a estrutura falhada do embasamento rochoso.

QUANTIFICAÇÃO DOS FLUXOS

Modelo resultante

O esquema de funcionamento da Figura 2 permitiu estabelecer um modelo vertical de infiltração apresentado na Figura 5. Cada horizonte principal (A: superficial, B: vértico, C: alteração) é simbolizado por um reservatório com entradas e saídas correspondentes aos vários fluxos identificados anteriormente.

Cada reservatório tem

uma capacidade máxima :	H _{Max}
uma capacidade mínima :	H _{min}
um conteúdo atual :	H ₋

Só o reservatório superficial pode transbordar dando uma parte ES2 do escoamento superficial que vai se juntar ao ES1 vindo da parte da chuva escoando logo depois de atingir o solo. ES1 depende dos coeficientes A e V. Este último coeficiente, simbolizando o efeito da cobertura vegetal e do estado de superfície do solo, permite dividir a chuva em duas partes: uma que vai dar o escoamento rápido ES1 e outra que vai para o reservatório superficial.

Reservatório superficial : A -- Esse reservatório tem duas entradas: uma, em cima, alimentada diretamente pela chuva e o escoamento superficial (ES_{entrada}) do módulo situado logo a montante (I1) e outra em baixo sendo o escoamento subsuperficial (EBA_{entrada}), em cima do horizonte vértico, vindo do módulo vertical localizado logo a montante do modelo (ou módulo) atual. Por ocasião da calibração do modelo sobre uma superfície elementar (1m²) esse fluxo será estimado igual ao fluxo de saída (EBA_{saída}).

O reservatório A tem cinco saídas:

- uma em cima e pelas raízes dando uma parte da evapotranspiração

real (ETR),

- uma em baixo para alimentar o reservatório inferior (I2),
- uma lateral que dá o escoamento subsuperficial (EBA_{saída}) quando o horizonte vértico limita a infiltração (I2),
- uma, em cima, por transbordamento, quando o horizonte A é perto da saturação,
- uma última (VP), indo diretamente para a alteração. Trata-se de uma via de circulação preferencial, particular e temporária (fendas do horizonte vértico quando seco, escoamento preferencial ao longo das raízes...).

Reservatório do horizonte vértico : B -- O abastecimento deste reservatório vem, de um lado diretamente do horizonte superficial (I2), de outro lado de uma parte da drenagem subsuperficial (I4) antes da mesma sair do módulo. As duas saídas alimentam a ETR em cima e o horizonte C por infiltração.

No caso dos solos brunos modais, quando não há o horizonte B, o coeficiente SBM (igual a 1) permite desviar o fluxo I2 diretamente para o último reservatório.

Reservatório da alteração : C -- A entrada principal deste reservatório é I3 vindo de B quando SBM=0, ou I2 e I4 de A quando SBM=1. Mas há em também duas outras entradas: quando existem as vias de circulação preferencial procedendo de A e as drenagens oblíquas dos lençóis temporários da alteração (EBC_{entrada}). A saída principal (EBC_{saída}) é aquela que vai dar esses lençóis e a drenagem oblíqua. Finalmente, pode haver algumas infiltrações profundas fora do módulo

Calibração do módulo sobre 1m²

Atualmente o modelo está em fase de calibração sobre as microparcelas de 1m² em solos brunos vérticos e não vérticos, com e sem cobertura vegetal.

O problema principal é a determinação da transferência da água do horizonte A para o horizonte B (função f1), e do horizonte B para a alteração C (função f2). Por enquanto essas funções estão testadas com relações exponenciais do tipo :

$$I2 = HS * \exp(-K1) \quad (6)$$

Mas, na realidade, K1 e K2 sendo coeficientes de condutividade do solo, seria melhor utilizar as relações K(θ) da condutividade hidráulica K em função da umidade volumétrica θ. Uma experimentação de campo pelo método da "drenagem interna", permitiu estabelecer (Molinier e al - 1988), por tratamento estatístico, as relações K(θ) e H(θ) da tensão em função da umidade volumétrica. Mas, por causa da heterogeneidade dos solos, a precisão obtida não é suficiente para introduzir esses valores no modelo, exceto, talvez, para o horizonte A onde é possível aplicar a relação do tipo Brooks e Corey (1964) :

$$K = K_r \left[\frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_r} \right]^B \quad (7)$$

onde θ_s e θ_r são parâmetros de calibração que podem ser assimilados com a unidade volumétrica a saturação, ou unidade volumétrica residual. Os valores de cada um dos parâmetros e coeficientes da relação são os seguintes :

$$28.0 \leq \theta_s \leq 37.5$$

$$5 \leq \theta_r \leq 20$$

$$5.0 \text{ E-}6 \leq K_r \leq 1.0 \text{ E-}5$$

$$-5.5 \leq B \leq -3.0$$

Para uma melhor precisão, uma determinação da condutividade hidráulica, sobre pequenos cilindros está em andamento no laboratório. Os resultados esperados permitirão escolher um coeficiente K para cada horizonte e assim calibrar melhor o modelo.

A evapotranspiração real (ETR) sendo um fenômeno bastante estável, é ligada à evapotranspiração potencial (ETP) por um coeficiente de redução K_c dependente do teor de água do solo. Portanto, a determinação desse coeficiente depende do estado de umedecimento do horizonte no qual vai ser calculada a ETR. Já vimos, anteriormente, que cada reservatório é definido por dois parâmetros característicos e o teor de água atual. No caso do horizonte superficial temos a capacidade máxima (H_{Max}), a capacidade mínima (H_{Min}) ou ponto de murchamento e quantidade atual de água (H_A). Pode-se acrescentar mais um parâmetro, a capacidade de campo (H_{Acpo}) cujo o valor é incluído entre H_{Max} e H_{Min} . O coeficiente K_c depende desses quatro valores característicos do reservatório. No final, para calcular a ETR do reservatório superficial foi escolhida a seguinte forma :

$$\text{quando } H_A \geq H_{Acpo} \text{ ---> } ETR = ETP \quad (8)$$

$$\text{quando } H_A \leq H_{Acpo} \text{ ---> } ETR = ETP \frac{H_A - H_{Min}}{H_{Acpo} - H_{Min}} \quad (9)$$

Considerando que os valores H representam diversos estados do teor de água no solo, a equação de continuidade permite escrever, na ausência de drenagem :

$$ETR = dH/dt \quad (10)$$

Finalmente, combinando com a relação (9), a equação da evolução da ETR tem uma forma exponencial :

$$ETR = ETP * \exp \left[- \frac{1}{H_{Acpo} - H_{Min}} \int_{t_c}^t ETP dt \right] \quad (11)$$

O termo da função exponencial corresponde ao valor do coeficiente "a" da equação (1) dando o índice de chuva IP escolhido para representar a umidade prévia dos solos. Ele permite ajustar melhor o valor do escoamento em função das condições iniciais de umedecimento dos solos.

Os horizontes B dos solos vérticos contribuem também à evapotranspiração. As relações para avaliá-la são semelhantes às definidas para o horizonte A. Mas, como a contribuição do B é bem menor do que a do A, admitiu-se que a repartição da ETR entre A e B fica nas proporções de 80/20.

Extensão do modelo a superfícies maiores

Depois de calibrar o modelo vertical nas superfícies de $1m^2$ (módulo elementar das microparcelas) em cada tipo de solo, do litólico ao vertisol, a interconexão desses módulos entre si deve permitir simular o efeito de escala, isto é a diminuição da lâmina escoada (LE) quando aumenta a superfície, como foi apresentada acima (ver Figuras 3 e 4). Para isso cada área maior será dividida em zonas de características físicas homogêneas (solo, vegetação, declividade), onde será aplicado o modelo de simulação vertical já calibrado anteriormente, considerando a contribuição da zona a montante. Isso supõe que a simulação seja feita de cima para baixo, cada módulo integrando as saídas do módulo imediatamente a montante. Os primeiros testes serão feitos nas parcelas de $100m^2$ para as quais os solos são pouco heterogêneos, só variando o caráter mais o menos vértico do horizonte B. Se os resultados forem satisfatórios o método será aplicado às microbacias.

CONCLUSÃO

Este modelo vertical tem a vantagem de representar os principais componentes do balanço hídrico determinados a partir de um estudo muito detalhado dos solos brunos da região de Sumé. É o resultado direto de um esquema de funcionamento correspondente à realidade física das observações de campo, em particular na identificação dos diversos fluxos através das medições conjuntas do potencial (tensiômetros) e do teor de água do solo (sonda de neutrons) sob chuvas simuladas e naturais.

O modelo ainda está em fase de calibração, mas o trabalho de pesquisa efetuado até agora melhorou bastante o conhecimento desse tipo de solo, representativo de cerca de 15% do Nordeste semi-árido. Uma das principais conclusões é que a irrigação dos solos vérticos é possível quando são tomadas algumas precauções indispensáveis. O problema é saber qual é a possibilidade de eliminar, por drenagem, os sais trazidos pelas águas de irrigação. O esquema de circulação apresentado na Figura 2, e a conclusão mostrando que o sistema é aberto, constituem uma resposta positiva. Mas a permeabilidade fraca (da ordem de 0.5 mm/hora) do solo sugere que as doses de irrigação sejam bem ajustadas e as frequências das regas moderadas para não encharcar o solo por muito tempo. Pela mesma razão, é preferível aplicar uma grande dose de lavagem em vez de muitas pequenas. Essas soluções de lavagem serão despejadas na base da alteração (C) quando a permeabilidade e a declividade são suficientes; no caso contrário é melhor não irrigar.