



UMA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA INFILTRAÇÃO SUPERFICIAL EM MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL DIÁRIO DE SOLOS

Manuel MENDES OLIVEIRA

Geólogo, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel: (+351) 21 844 3436, moliveira@lnec.pt.

RESUMO

A infiltração superficial define-se como toda a água que em sentido descendente atravessa a fronteira entre o meio superficial e o *solo*.

Apresenta-se uma metodologia de cálculo da infiltração superficial com base na resolução do modelo de infiltração de Philip. Este modelo é corrido para estudar a infiltração em doze tipos diferentes de solos e considerando diferentes valores de teores de humidade no solo, precipitações e distribuição da precipitação. Os resultados obtidos são analisados e são ajustadas equações lineares. Estas equações são utilizadas para estimar a infiltração superficial em função do tipo de solo, do teor de humidade inicial e do valor da precipitação diária.

A metodologia de cálculo do processo de infiltração superficial apresentada foi desenvolvida para a execução do balanço hídrico sequencial diário tendo em vista a caracterização da recarga das águas subterrâneas.

Palavras-chave: infiltração superficial, águas subterrâneas, modelos numéricos, recarga, balanço hídrico.

1. INTRODUÇÃO

A infiltração superficial (I_s [L^3] ou [L]) define-se como toda a água que em sentido descendente atravessa a fronteira entre o meio superficial e o *solo*. A infiltração superficial constitui um processo do ciclo hidrológico, cuja relação com os restantes processos do ciclo pode ser visualizada na Figura 1.

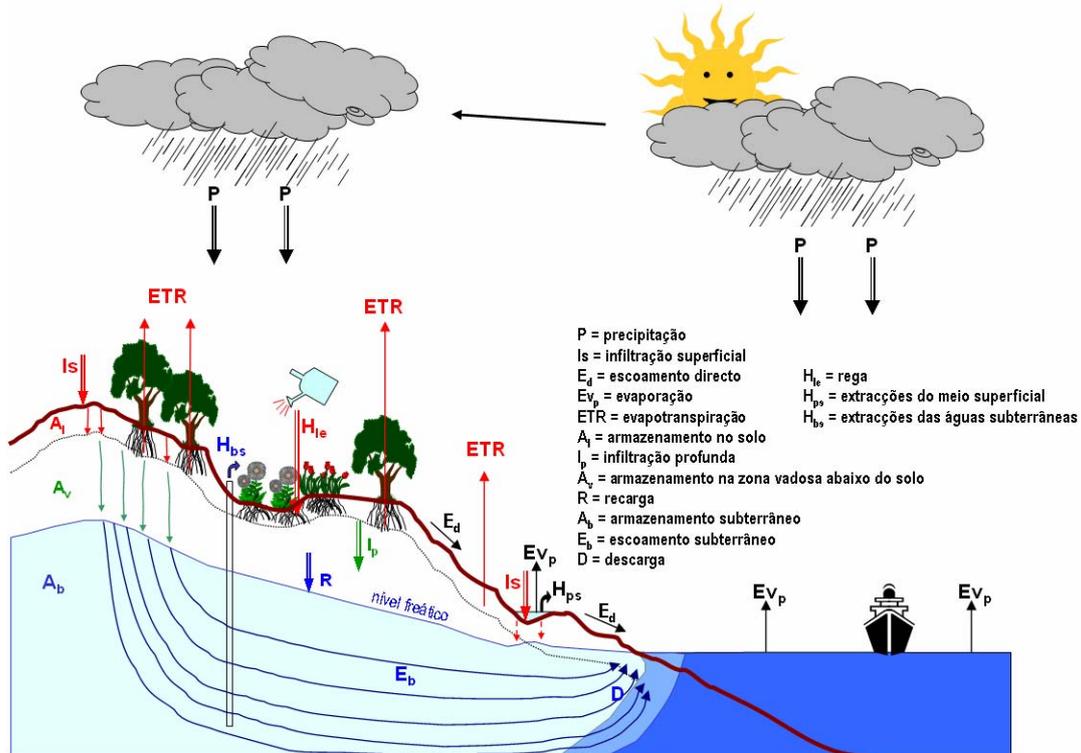


Figura 1 – A infiltração superficial no ciclo hidrológico

A infiltração superficial pode dar-se directamente pelo contacto da água de precipitação no solo, pode provir da água armazenada em rios ou lagos, ou pode resultar da água que penetra através da vegetação ou que escorre pelos seus troncos.

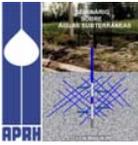
A metodologia que agora se apresenta para o cálculo da infiltração superficial baseia-se em OLIVEIRA (2004) e foi desenvolvida com o intuito de calcular a recarga de águas subterrâneas por balanço hídrico sequencial diário. Este método, na sua forma mais simples, utiliza a equação:

$$R = P - E_d - ETR - \Delta A_s \quad \text{Eq. 1}$$

onde R é a recarga, P é a precipitação, E_d o escoamento directo, ETR a evapotranspiração real (a partir do solo) e ΔA_s a variação do armazenamento de água no solo entre o final do dia e o início do dia. Na formulação apresentada, a diferença $P - E_d$ representa a infiltração superficial, que é o tema desta publicação.

Considere-se o caso de uma parcela de um terreno. A quantidade de água que atinge o solo pode: (1) infiltrar-se na superfície do solo; ou (2) ficar retida à superfície (poças de água), no caso da taxa de precipitação ser superior à capacidade de infiltração do solo ou de ser uma zona de descarga de águas subterrâneas; ou (3) escoar à superfície, no caso da capacidade de armazenamento à superfície estar esgotada. No caso de ficar retida à superfície pode também haver evaporação da água armazenada.

A infiltração superficial pode ser estimada em condições controladas através de lisímetros. Pode ser calculada através de balanço hídrico se se caracterizarem os outros termos do balanço; por exemplo LOBO FERREIRA (1981) utilizou no seu modelo de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ



a metodologia do *Soil Conservation Service* dos E.U.A. para o cálculo do escoamento directo através do número característico de escoamento, calculando a infiltração superficial pela diferença $P - Ed$. A infiltração superficial também pode ser calculada por modelação do próprio processo de infiltração superficial. É este procedimento que se apresenta seguidamente.

Esta acção de divulgação insere-se no estudo do Plano de Investigação Programada do LNEC para 2005-2008 "Metodologias para caracterização da exploração, gestão e desenvolvimento sustentável, quantitativo e qualitativo, dos recursos hídricos subterrâneos" (Proc. 0607/11/16253).

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO SUPERFICIAL

O processo de infiltração superficial encontra-se descrito em numerosos livros de hidrologia, apresentando-se uma síntese desenvolvida a partir de LENCASTRE e FRANCO (1984). Quando se dá uma chuvada, o solo começa por absorver a água. A partir de uma certa altura da chuvada, o solo já não é capaz de receber mais água, fica saturado na sua camada mais superficial e começa-se a formar escoamento directo. A quantidade de água que o solo é capaz de absorver ao longo do tempo define a capacidade de infiltração (I_{s_c}). A capacidade de infiltração varia com o material do solo, com o teor de humidade do solo e com a ocupação do solo. Durante uma chuvada, com o decorrer do tempo, o teor de humidade do solo vai aumentando e a capacidade de infiltração vai diminuindo, tendendo o seu valor mínimo para a condutividade hidráulica vertical do solo.

A ocupação do solo também condiciona a capacidade de infiltração: um solo exposto, principalmente se constituído por materiais mais argilosos, encontra-se muito susceptível à compactação pela água da chuva, pelo que a sua capacidade de infiltração pode ficar muito reduzida; ao contrário, um solo com uma cobertura vegetal encontra-se muito mais protegido desse efeito. A formação de crostas e a sua influência na capacidade de infiltração tem sido estudada por diversos autores (por exemplo RAWLS e BRAKENSIEK, 1989; MUALEM e ASSOULINE, 1996).

Também o ar que preenche os espaços vazios tem que ser desalojado quando se dá a infiltração, o que pode induzir uma diminuição da capacidade de infiltração. Outros factores que afectam a capacidade de infiltração são a compactação pelo homem e animais (diminui), a lavra de terrenos (aumenta), a ocorrência de geada (diminui) ou a variação da viscosidade dinâmica da água devido à mudança da temperatura ($3\%/^{\circ}\text{C}$, a capacidade de infiltração aumenta com o aumento da temperatura da água porque a viscosidade dinâmica diminui e a condutividade hidráulica aumenta – estas variações normalmente não são consideradas nas águas subterrâneas).

A capacidade de infiltração ao longo do tempo pode ser aproximada por fórmulas empíricas ou recorrendo a modelos de infiltração que resultam da resolução da equação de escoamento na zona vadosa utilizando diferentes técnicas ou condições de fronteira. No primeiro grupo encontra-se a fórmula empírica de Horton (LENCASTRE e FRANCO, 1984). No segundo grupo RAWLS e BRAKENSIEK (1989, p. 287) referem os seguintes modelos: Green-Ampt, Philip, Morel-Seytoux e Khanji, Smith-Parlange. Estes modelos foram derivados considerando que o solo se encontra sempre saturado à superfície, o que pode acontecer passado um tempo desde o início da chuvada. Até ocorrer esse tempo toda a água de precipitação se infiltra (capacidade de infiltração infinita); após esse tempo a água infiltra-se de acordo com a capacidade de infiltração.

Os modelos utilizam parâmetros dos solos que RAWLS e BRAKENSIEK (1989) estimam a partir da textura, da capacidade de troca catiónica e do teor em matéria orgânica do solo. Apresenta-se o modelo de PHILIP (1957, *in* LENCASTRE e FRANCO, 1984; RAWLS e BRAKENSIEK, 1989):

$$I_{s_c}(t) = 0,5 \cdot s \cdot t^{-0,5} + A \quad \text{Eq. 2}$$

onde I_{s_c} (cm/h) é a capacidade de infiltração, A (cm/h) é um parâmetro próximo da condutividade hidráulica saturada (não havendo outra indicação, pode-se assumir igual) e s (cm/h) é a capacidade de absorção/adsorção do solo, que pode ser estimada por (RAWLS e BRAKENSIEK, 1989):



$$s = [2.(H_0 + H_f).(n - \theta_i). K_s]^{0,5} \quad \text{Eq. 3}$$

onde H_0 (cm) é a espessura da água armazenada na superfície do solo, n é a porosidade¹, θ_i é o teor de humidade inicial¹, K_s (cm/h) é a condutividade hidráulica vertical saturada, H_f (cm) é a sucção da frente de humedecimento. RAWLS e BRAKENSIEK (1989) estimam H_f (cm) a partir das propriedades do solo de acordo com a seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} \ln H_f = & 6,5309 - 7,32561.\phi_a + 0,001583.C^2 + 3,809479.\phi_a^2 \\ & + 0,000344.S.C - 0,049837.S.\phi_a + 0,001608.S^2.\phi_a^2 \\ & + 0,001602.C^2.\phi_a^2 - 0,0000136.S^2.C - 0,003479.C^2.\phi_a - 0,000799.S^2.\phi_a \end{aligned} \quad \text{Eq. 4}$$

sendo S a % em peso de areia, C a % em peso de argila (sendo que % de areia + % de argila + % de silte perfazem 100 %) e ϕ_a a porosidade do solo corrigida do ar aprisionado. ϕ_a pode ser calculado a partir da equação (ALBERTS *et al.*, 1995):

$$\phi_a = n . \left\{ 1 - [3,8 + 0,00019.C^2 - 0,0337.S + 0,126.CEC.C + MO.(S/200)^2] / 100 \right\} \quad \text{Eq. 5}$$

onde CEC é a razão entre a capacidade de troca catiónica da argila (CEC_c) e o teor de argila (C) e MO é a % de matéria orgânica. CEC_c pode ser estimado a partir de (ALBERTS *et al.*, 1995):

$$CEC_c = CEC_{solo} - MO.(1,42 + 1,70.d_h) \quad \text{Eq. 6}$$

sendo CEC_{solo} a capacidade de troca catiónica determinada para o solo (meq/100 g) e d_h a espessura do horizonte do solo (m).

A condutividade hidráulica vertical saturada, K_s , também pode ser estimada a partir das propriedades do solo (RAWLS e BRAKENSIEK, 1989):

$$\begin{aligned} \ln K_s = & 19,52348.n - 8,96847 - 0,028212.C + 0,00018107.S^2 \\ & - 0,0094125.C^2 - 8,395215.n^2 + 0,077718.S.n - 0,00298.S^2.n^2 \\ & - 0,019492.C^2.n^2 + 0,0000173.S^2.C + 0,02733.C^2.n \\ & + 0,001434.S^2.n - 0,0000035.C^2.S \end{aligned} \quad \text{Eq. 7}$$

Nesta equação K_s vem dado em cm/h, C e S são expressos em % e a equação é válida para 5% < C < 60% e 5% < S < 70%.

A apresentação destas equações justifica-se porque este tipo de informação sobre os solos existe publicada em SROA (1973) para parte de Portugal Continental.

O volume total de água infiltrada obtém-se integrando a Eq. 2 para o tempo desde que a infiltração se dá com a superfície do solo saturada:

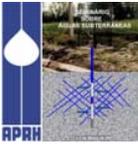
$$I_s = s . t^{0,5} + A . t \quad \text{Eq. 8}$$

onde I_s (cm) é a infiltração superficial acumulada.

O tempo necessário para se dar a saturação do solo à superfície (t_p) é dado por (CHOW *et al.*, 1988):

¹ Os parâmetros teor de humidade, porosidade, capacidade de campo ou ponto de emurchecimento permanente, são expressos em termos volumétricos (volume de água / volume de rocha)

² A areia refere-se às partículas de solo com granulometria entre 2 e 0,05 mm e a argila às partículas com dimensão inferior a 0,002 mm. As análises de solos feitas em Portugal normalmente consideram como areia as partículas com dimensão entre 2 e 0,02 mm (por exemplo dados apresentados em SROA, 1973), distinguindo entre areia grossa (entre 2 e 0,2 mm) e areia fina (entre 0,2 e 0,02 mm). Para fazer o reajustamento dos dados Portugueses para os utilizados nas equações apresentadas, utiliza-se uma relação empírica que consiste em tirar da percentagem total de areia (areia grossa + areia fina), 40 % da areia fina (Costa, 1991).



$$t_p = \frac{s^2 \cdot (i - A/2)}{2 \cdot i \cdot (i - A)^2} \quad \text{Eq. 9}$$

equação válida para $i > A$ sendo i a intensidade da precipitação.

A Eq. 8 pode ser utilizada para calcular o volume total de água infiltrada (considerando também a água que se infiltra antes de haver a saturação à superfície do solo), se o parâmetro t dessa equação for acrescentado do tempo t_o calculado por (CHOW *et al.*, 1988):

$$t_o = \frac{1}{4A^2} \cdot \left(\sqrt{s^2 + 4 \cdot A \cdot i \cdot t_p} - s \right)^2 \quad \text{Eq. 10}$$

O comportamento que é dado pela aplicação deste modelo baseia-se no pressuposto que a zona vadosa (ou pelo menos o seu topo – a zona do solo) constitui um meio homogéneo. Uma vez que este tipo de comportamento é definido em função da frente de humedecimento, se se tiver um meio estratificado, as condições de propagação desta frente são alteradas e a capacidade de infiltração pode seguir outro andamento. Neste caso o processo de infiltração superficial pode ser previsto utilizando modelos numéricos de escoamento na zona vadosa.

3. ESTUDO DA INFILTRAÇÃO SUPERFICIAL

O estudo da infiltração superficial foi feito com o modelo de Philip. Utilizaram-se seis valores de precipitação diária: 12 mm/d, 24 mm/d, 36 mm/d, 48 mm/d, 60 mm/d e 72 mm/d. Estes valores pretendem representar as quantidades de precipitações diárias que podem ocorrer em Portugal, embora seja possível ter valores superiores a 72 mm/d num dia. Estes valores de precipitação foram considerados distribuídos de forma diferente ao longo do dia, tendo-se considerado as seguintes situações: (1) distribuídos uniformemente ao longo do dia – intensidade de precipitação $i = P / 24$; (2) concentrados em duas horas – $i = P / 2$; (3) concentrados em uma hora – $i = P / 1$; (4) concentrados em meia hora – $i = P / 0,5$.

Para se poder considerar diferentes tipos de meios, que condicionam os valores de diversos parâmetros do modelo de Philip, utilizaram-se valores típicos para diferentes solos (classificados de acordo com a Figura 2), tal como apresentados em RAWLS e BRAKENSIEK (1989). O teor de humidade¹ inicial (θ_i) foi variado tendo em atenção os valores de ponto de emurchecimento permanente¹ (w_p), da capacidade de campo¹ (cc) e da porosidade do meio¹ (n); consideraram-se sete situações: (1) $\theta_i = w_p$; (2) $\theta_i = 0,5 \cdot w_p + 0,5 \cdot cc$; (3) $\theta_i = cc$; (4) $\theta_i = 0,5 \cdot cc + 0,5 \cdot n$; (5) $\theta_i = 0,25 \cdot cc + 0,75 \cdot n$, (6) $\theta_i = 0,1 \cdot cc + 0,9 \cdot n$ e (7) $\theta_i = n$.

O estudo assume que as características físicas do *solo* se mantêm constantes ao longo da profundidade por onde se distribui a água que se infiltra à superfície. Os parâmetros de entrada no modelo de Philip foram calculados a partir dos valores e parâmetros dependentes do material do *solo* apresentados no Quadro 1, pela aplicação das Eq. 2 a Eq. 9. Assumiu-se que a espessura da camada superior do *solo* (d_i) era de 50 cm, que o teor de matéria orgânica (MO) era de 1 %, e que a espessura de saturação do meio hídrico superficial (H_0) era de 1 mm.

Uma vez que se utilizaram 6 precipitações diárias, 4 distribuições de precipitação ao longo do dia, 12 materiais de solos diferentes e 7 valores de teor de humidade inicial, ao todo obtiveram-se resultados para 2016 situações diferentes. Os resultados obtidos podem ser consultados em OLIVEIRA (2004, 2006).

Estes resultados podem ser analisados de diversas formas: por tipo de *solo*, por precipitação, por teor de humidade inicial, etc. A título de exemplo representa-se no Quadro 2 e na Figura 3 os resultados obtidos para $P = 48$ mm/d. Os resultados obtidos são válidos apenas para as situações estudadas e com os condicionamentos inerentes ao modelo utilizado. Contudo permitem ter uma percepção da forma como o processo se desenrola. O Quadro 3 apresenta uma síntese, por material



do *solo* e teor de humidade inicial, relativamente ao número de casos em que se obteve $I_s = P$. Para as situações em que as diversas corridas forneceram $I_s < P$ apresenta-se o valor de P abaixo do qual I_s é sempre igual a P .

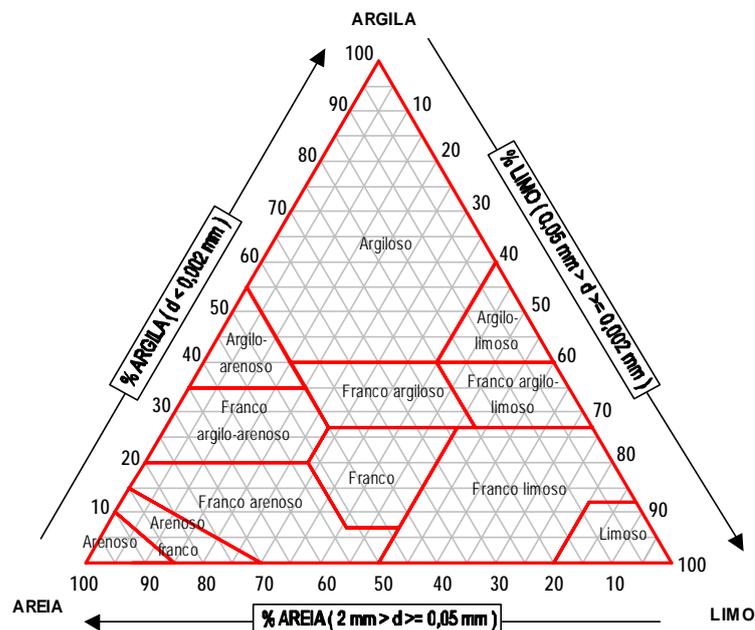


Figura 2 – Diagrama triangular para a classificação da textura do solo utilizada pelo Departamento de Agricultura dos EUA (adaptado de COSTA, 1991).

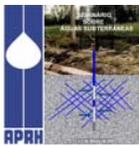
Quadro 1 – Material de *solo* e respectivos parâmetros para o cálculo da infiltração superficial de acordo com o modelo de Philip.

Textura →	Arenoso	Arenoso franco	Franco arenoso	Franco	Franco limoso	Franco argilo-arenoso	Franco argiloso	Franco argilo-limoso	Argilo-arenoso	Argilo-limoso	Argiloso	Limoso
%Argila	5	5	10	20	15	30	33	35	45	50	60	6
%Areia	90	80	60	40	20	60	33	10	50	5	20	6
%m.o.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
** n (%)	43,7	43,7	45,3	46,3	50,1	39,8	46,4	47,1	43	47,9	47,5	44,3
** cc (%)	9,1	12,5	20,7	27	33	25,5	31,8	36,6	33,9	38,7	39,6	29,7
** w_p (%)	3,3	5,5	9,5	11,7	13,3	14,8	19,7	20,8	23,9	25	27,2	7,2
** K_s (cm/h)	21	6,11	2,59	0,68	1,32	0,43	0,23	0,15	0,12	0,09	0,06	0,14
CTC _i (meq/100g)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

%Argila = % em peso de argila (partículas com dimensão inferior a 0,002 mm) relativamente ao peso da fracção inferior a 2 mm; %Areia = % em peso da areia (partículas com dimensão entre 2 e 0,05 mm) relativamente ao peso da fracção inferior a 2 mm; %m.o. = % em peso da matéria orgânica na fracção inferior a 2 mm; n = porosidade total; cc = capacidade de campo determinada a partir da água retida para uma sucção de 0,33 bar; w_p = ponto de emurchecimento permanente determinado a partir da água retida para uma sucção de 15 bar; K_s = condutividade hidráulica saturada; CTC_i = capacidade de troca catiónica total. Os parâmetros assinalados com ** foram extraídos de RAWLS e BRAKENSIEK (1989), excepto o do *solo* limoso que foi calculado de acordo com as equações apresentadas pelos mesmos autores, utilizando $S=6$, $C=6$, $MO=1$, $CEC = 10$, $d_h = 50$ cm).

De todo o conjunto de resultados obtidos, algumas observações que é possível fazer são:

- 1) a infiltração superficial é maior quando a precipitação ocorre distribuída ao longo do dia;
- 2) para o mesmo *solo*, a infiltração superficial é menor quando o teor de humidade inicial é maior;

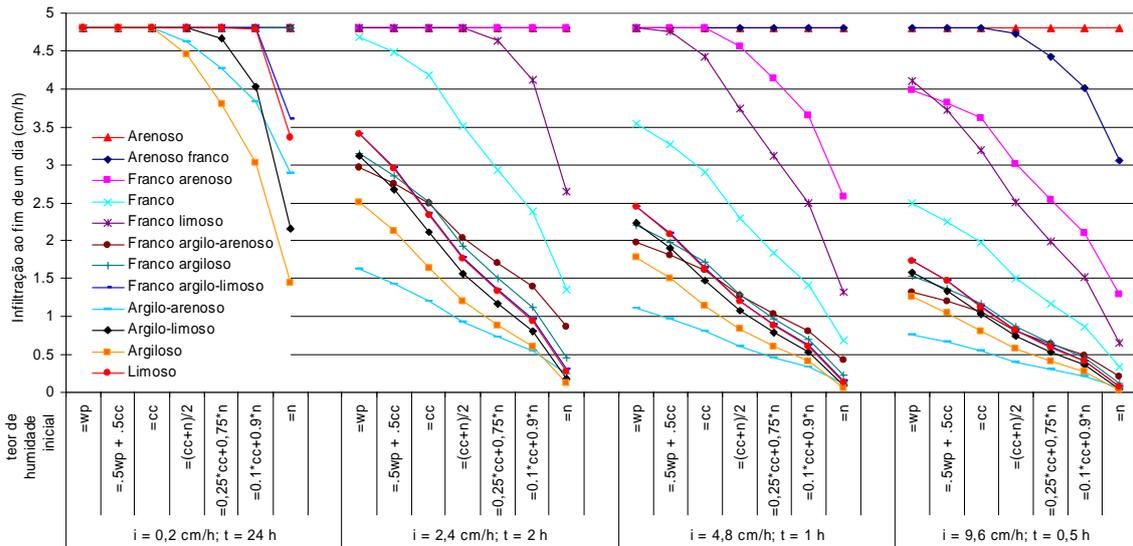
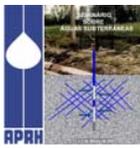


Quadro 2 – Infiltração superficial e tempo para se atingir a saturação do solo à superfície obtidos a partir do modelo de Philip para precipitação diária de 48 mm/d e considerando diferentes tipos de solo e diferentes distribuições da precipitação e do teor de humidade inicial do solo.

Textura →		Arenoso		Arenoso franco		Franco arenoso		Franco		Franco limoso		Franco argilo-arenoso		Franco argiloso		Franco argilo-limoso		Argilo-arenoso		Argilo-limoso		Argiloso		Limoso	
P	θ_i	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)	t_p (h)	I_s (cm)
$i = 0,2 \text{ cm/h}$ $t = 24 \text{ h}$	$=wp$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	711	4,8	53,9	4,8	156	4,8	66,5	4,8	519	4,8
	$=.5wp + .5cc$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	497	4,8	39,8	4,8	110	4,8	46,1	4,8	361	4,8
	$=cc$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	284	4,8	25,7	4,8	62,8	4,8	25,9	4,8	204	4,8
	$=(cc+n)/2$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	142	4,8	12,8	4,62	31,4	4,8	12,9	4,46	102	4,8
	$=0,25^*cc + 0,75^*n$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	71,0	4,8	6,42	4,27	15,7	4,66	6,47	3,80	51,0	4,8
	$=0,1^*cc + 0,9^*n$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	28,4	4,8	2,57	3,84	6,28	4,03	2,59	3,03	20,4	4,79
	$=n$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	--	4,8	0,00	3,60	0,00	2,88	0,00	2,16	0,00	1,44	0,00	3,36
$i = 2,4 \text{ cm/h}$ $t = 2 \text{ h}$	$=wp$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	1,45	4,68	9,96	4,8	0,29	2,97	0,42	3,15	0,54	3,40	0,09	1,62	0,45	3,11	0,28	2,50	0,55	3,40
	$=.5wp + .5cc$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	1,13	4,49	7,29	4,8	0,23	2,75	0,32	2,86	0,38	2,96	0,07	1,43	0,31	2,68	0,19	2,13	0,38	2,95
	$=cc$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	0,81	4,17	4,63	4,8	0,17	2,49	0,23	2,51	0,22	2,36	0,04	1,20	0,18	2,11	0,11	1,64	0,21	2,33
	$=(cc+n)/2$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	0,40	3,50	2,31	4,8	0,08	2,03	0,11	1,93	0,11	1,78	0,02	0,92	0,09	1,56	0,05	1,20	0,11	1,76
	$=0,25^*cc + 0,75^*n$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	0,20	2,94	1,16	4,64	0,04	1,70	0,06	1,51	0,05	1,35	0,01	0,72	0,05	1,16	0,03	0,89	0,05	1,33
	$=0,1^*cc + 0,9^*n$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	0,08	2,38	0,46	4,11	0,02	1,39	0,02	1,13	0,02	0,97	0,00	0,55	0,02	0,80	0,01	0,61	0,02	0,95
	$=n$	--	4,8	--	4,8	--	4,8	0,00	1,36	0,00	2,64	0,00	0,86	0,00	0,46	0,00	0,30	0,00	0,24	0,00	0,18	0,00	0,12	0,00	0,28
$i = 4,8 \text{ cm/h}$ $t = 1 \text{ h}$	$=wp$	--	4,8	--	4,8	1,45	4,8	0,27	3,55	1,14	4,8	0,06	1,98	0,10	2,21	0,13	2,45	0,02	1,11	0,11	2,23	0,07	1,78	0,13	2,45
	$=.5wp + .5cc$	--	4,8	--	4,8	1,22	4,8	0,21	3,26	0,84	4,76	0,05	1,81	0,07	1,98	0,09	2,09	0,02	0,97	0,08	1,90	0,05	1,50	0,09	2,09
	$=cc$	--	4,8	--	4,8	1,00	4,80	0,15	2,91	0,53	4,43	0,04	1,61	0,05	1,71	0,05	1,63	0,01	0,80	0,04	1,47	0,03	1,14	0,05	1,62
	$=(cc+n)/2$	--	4,8	--	4,8	0,50	4,55	0,08	2,30	0,27	3,74	0,02	1,27	0,03	1,28	0,03	1,21	0,01	0,60	0,02	1,07	0,01	0,83	0,03	1,19
	$=0,25^*cc + 0,75^*n$	--	4,8	--	4,8	0,25	4,14	0,04	1,84	0,13	3,12	0,01	1,03	0,01	0,98	0,01	0,90	0,00	0,46	0,01	0,79	0,01	0,61	0,01	0,89
	$=0,1^*cc + 0,9^*n$	--	4,8	--	4,8	0,10	3,64	0,02	1,42	0,05	2,50	0,00	0,81	0,01	0,70	0,01	0,63	0,00	0,34	0,00	0,53	0,00	0,41	0,01	0,61
	$=n$	--	4,8	--	4,8	0,00	2,59	0,00	0,68	0,00	1,32	0,00	0,43	0,00	0,23	0,00	0,15	0,00	0,12	0,00	0,09	0,00	0,06	0,00	0,14
$i = 9,6 \text{ cm/h}$ $t = 0,5 \text{ h}$	$=wp$	--	4,8	0,80	4,8	0,17	3,99	0,06	2,49	0,22	4,10	0,01	1,32	0,02	1,54	0,03	1,73	0,01	0,76	0,03	1,59	0,02	1,26	0,03	1,74
	$=.5wp + .5cc$	--	4,8	0,73	4,8	0,14	3,82	0,05	2,25	0,16	3,72	0,01	1,20	0,02	1,37	0,02	1,47	0,00	0,66	0,02	1,34	0,01	1,06	0,02	1,47
	$=cc$	--	4,8	0,66	4,8	0,12	3,62	0,03	1,97	0,10	3,20	0,01	1,06	0,01	1,17	0,01	1,13	0,00	0,54	0,01	1,03	0,01	0,80	0,01	1,13
	$=(cc+n)/2$	--	4,8	0,33	4,72	0,06	3,01	0,02	1,51	0,05	2,51	0,00	0,81	0,01	0,86	0,01	0,83	0,00	0,40	0,01	0,74	0,00	0,58	0,01	0,82
	$=0,25^*cc + 0,75^*n$	--	4,8	0,16	4,42	0,03	2,54	0,01	1,17	0,03	1,99	0,00	0,64	0,00	0,65	0,00	0,61	0,00	0,30	0,00	0,54	0,00	0,42	0,00	0,60
	$=0,1^*cc + 0,9^*n$	--	4,8	0,07	4,01	0,01	2,09	0,00	0,87	0,01	1,51	0,00	0,48	0,00	0,45	0,00	0,41	0,00	0,21	0,00	0,36	0,00	0,27	0,00	0,41
	$=n$	--	4,8	0,00	3,06	0,00	1,30	0,00	0,34	0,00	0,66	0,00	0,22	0,00	0,12	0,00	0,08	0,00	0,06	0,00	0,05	0,00	0,03	0,00	0,07

n = porosidade total; cc = capacidade de campo determinada a partir da água retida para uma sucção de 0,33 bar; wp = ponto de emurchecimento permanente determinado a partir da água retida para uma sucção de 15 bar; K_s = condutividade hidráulica saturada; P = precipitação; i = intensidade da precipitação; t = tempo de duração da precipitação com a intensidade i ; θ_i = teor de humidade inicial; t_p = tempo para se atingir a saturação do solo à superfície (hora); I_s = infiltração superficial (cm/d). Ver Nota ** no Quadro 1.

(adaptado de OLIVEIRA, 2004)



(in OLIVEIRA, 2004)

Figura 3 – Infiltração superficial obtida a partir do modelo de Philip para diferentes tipos de *solo* e para diferentes distribuições da precipitação e do teor de humidade inicial do *solo* (precipitação diária = 48 mm/d).

Quadro 3 – Síntese dos resultados obtidos pela corrida do modelo de Philip, para diferentes valores de teor de humidade inicial representando o número de situações para as quais a infiltração superficial é dada pela precipitação (independentemente do seu valor ou distribuição) e o valor mínimo de precipitação a partir do qual a infiltração superficial pode já não ser igual à precipitação

<i>solo</i>	número de casos com $I_s = P$							Valor mínimo de P (cm/d) para que $I_s < P$							
	total	$\theta_i = wp$	$\theta_i = 0,5wp + 0,5cc$	$\theta_i = cc$	$\theta_i = 0,5cc + 0,5n$	$\theta_i = 0,25cc + 0,75n$	$\theta_i = 0,1cc + 0,9n$	$\theta_i = wp$	$\theta_i = 0,5wp + 0,5cc$	$\theta_i = cc$	$\theta_i = 0,5cc + 0,5n$	$\theta_i = 0,25cc + 0,75n$	$\theta_i = 0,1cc + 0,9n$	$\theta_i = n$	
arenoso	168	24	24	24	24	24	24	--	--	--	--	--	--	--	
arenoso franco	147	22	22	22	21	21	20	19	6,0	6,0	6,0	4,8	4,8	4,8	3,6
franco-arenoso	111	18	18	17	16	15	14	13	3,6	3,6	3,6	3,6	2,4	2,4	2,4
franco	65	12	12	10	9	8	7	7	2,4	2,4	2,4	1,2	1,2	1,2	1,2
franco limoso	94	18	16	16	13	12	10	9	3,6	3,6	2,4	2,4	2,4	1,2	1,2
franco argilo-arenoso	49	8	8	7	7	7	6	6	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
franco argiloso	46	8	8	8	7	6	5	4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
franco argilo-limoso	42	10	8	7	6	4	4	3	2,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
argilo-arenoso	22	4	4	4	3	3	2	2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
argilo-limoso	32	8	8	6	4	3	2	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
argiloso	25	7	6	4	3	2	2	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
limoso	40	10	8	7	6	4	3	2	2,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Todos os solos	841	149	142	132	119	109	99	91	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Nota: por tipo de *solo* o total de casos possível é de 168 e por teor de humidade inicial e tipo de *solo* é de 24.

(in OLIVEIRA, 2004)



3) a infiltração superficial é no máximo igual à precipitação (considerando que não há inicialmente armazenamento à superfície) e no mínimo é igual ao produto da condutividade hidráulica saturada pelo tempo durante o qual ocorre precipitação;

4) num *solo* arenoso, a infiltração superficial é sempre dada pela precipitação (pelo que não se vai gerar escoamento directo).

4. CÁLCULO DA INFILTRAÇÃO SUPERFICIAL NO MODELO DE BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL DIÁRIO

Para o modelo de balanço hídrico sequencial só é conhecido a precipitação, o teor de humidade inicial e o material do *solo*. A Figura 4 mostra as relações entre estas variáveis e a infiltração superficial para as combinações estudadas.

Pretende-se encontrar uma relação que permita o cálculo directo da infiltração superficial, tendo em atenção que a distribuição da precipitação ao longo do dia não é um dado de entrada no balanço hídrico.

Seleccionam-se os n pares de (P, I_s) cuja precipitação é igual ou superior ao *valor mínimo de P para que $I_s < P$* (Quadro 3). Com os n pares de (P, I_s) calcula-se a regressão linear de I_s sobre P . Esta regressão linear é válida quando a precipitação é superior a uma precipitação limite (P_{lim}) acima da qual $I_s = a.P + b$ (sendo que $I_s < P$) e abaixo da qual $I_s = P$. O valor de P_{lim} é calculado pela intersecção das duas rectas $I_s = P$ e $I_s = a.P + b$; pelo que $P_{lim} = b / (1 - a)$.

Os valores de P_{lim} , a e b , assim como do coeficiente de correlação encontrado, são apresentados no Quadro 4. Os coeficientes de correlação encontrados são, por vezes, muito baixos, mas este procedimento permite dar um valor de infiltração superficial em função da precipitação.

Por este procedimento a infiltração superficial calcula-se por:

$$I_s = \begin{cases} P & \text{se } P \leq P_{lim} \\ a.P + b & \text{se } P > P_{lim} \end{cases} \quad \text{Eq. 11}$$

A infiltração superficial pode ser estimada no modelo de balanço hídrico sequencial diário em função da classe textural do solo presente e utilizando os valores de a e b apresentados no Quadro 4. Se o teor de humidade inicial (θ_i) não for um dos apresentados nesse Quadro, os parâmetros da equação de regressão linear são estimados considerando uma variação linear entre os parâmetros a e b das equações de regressão dos teores de humidade acima e abaixo mais próximos (θ_2 é o teor de humidade inicial acima, a_2 e b_2 são os parâmetros da correspondente equação de regressão tal como apresentados no Quadro 4, θ_1 é o teor de humidade inicial abaixo, a_1 e b_1 são os parâmetros da correspondente equação de regressão tal como apresentados no Quadro 4):

$$\left. \begin{cases} a_i = a_1 + \frac{(a_2 - a_1)}{(\theta_2 - \theta_1)} \cdot (\theta_i - \theta_1) \\ b_i = b_1 + \frac{(b_2 - b_1)}{(\theta_2 - \theta_1)} \cdot (\theta_i - \theta_1) \end{cases} \right\} \quad \text{Eq. 12}$$

Por exemplo a infiltração superficial de um *solo* argilo limoso com $\theta_i = 0,35.cc + 0,65.n = 44,7\%$, será dada por:

$$I_s = \begin{cases} P & \text{se } P \leq 1,00 \\ 0,203.P + 0,797 & \text{se } P > 1,00 \end{cases} \quad \text{Eq. 13}$$

Esta equação foi calculada utilizando as equações de regressão (Quadro 4) para $\theta_2 = 0,25.cc + 0,75.n = 45,6\%$ ($I_s = 0,182 \cdot P + 0,775$; $a_2 = 0,182$ e $b_2 = 0,775$) e para $\theta_1 = 0,5.cc + 0,5.n = 43,3\%$ ($I_s = 0,236 \cdot P + 0,832$; $a_1 = 0,236$ e $b_1 = 0,832$) e as Eq. 12 e Eq. 11, com $P_{lim} = b_i / (1 - a_i)$.

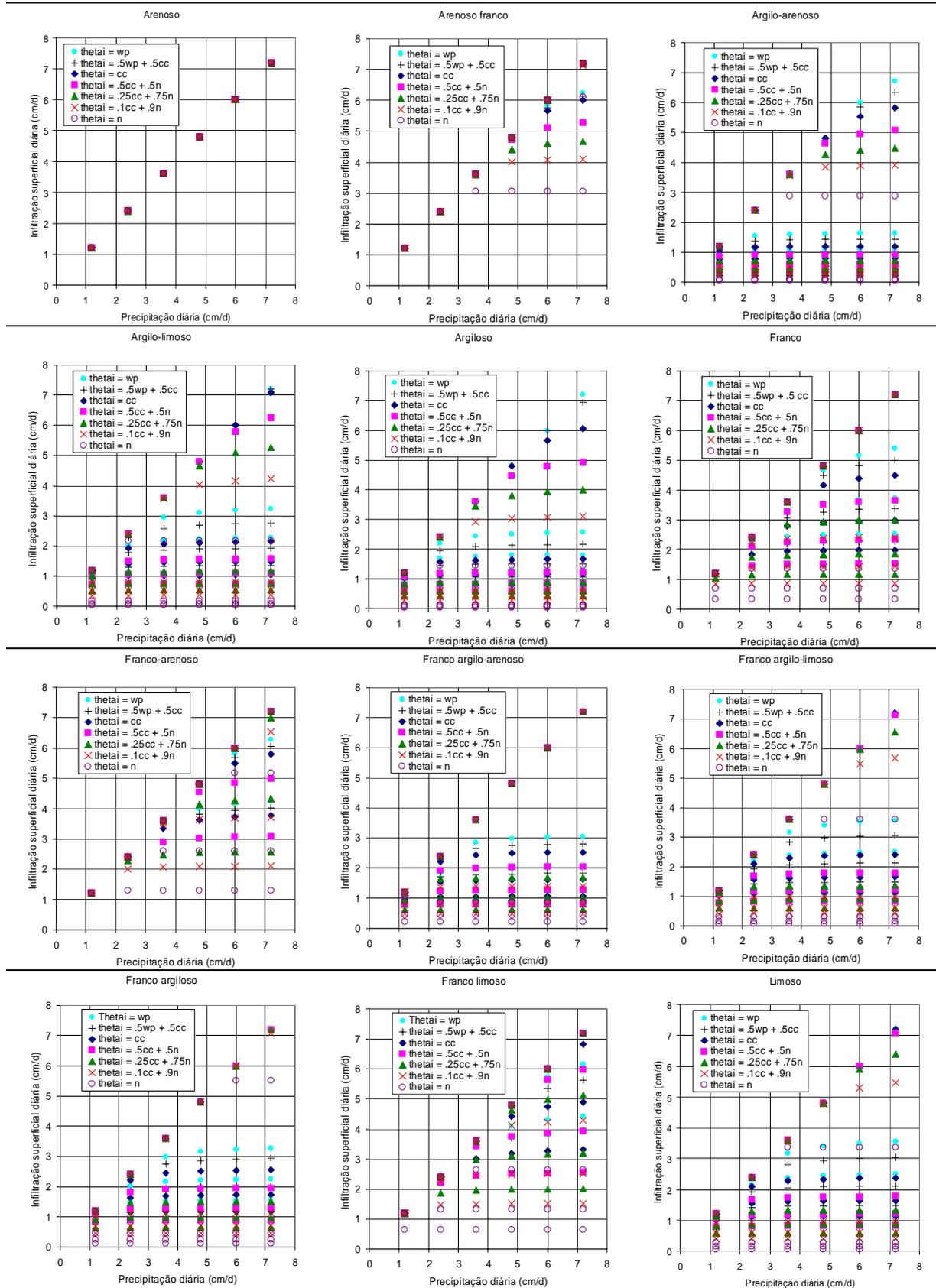
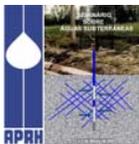
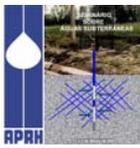


Figura 4 – Infiltração superficial em função da precipitação diária e do teor de humidade inicial do *solo* obtida a partir do modelo de Philip para diferentes distribuições da precipitação. (in OLIVEIRA, 2004)



Quadro 4 – Recta de regressão linear de I_s sobre P para os casos em que $P > P_{lim}$, em função da textura do solo e do teor de humidade inicial.

Textura	θ_i	Nº casos	P_{lim} (cm/d) [$=b/(1-a)$]	b em $I_s = aP + b$	a em $I_s = aP + b$	correlação (r)
Arenoso franco	$\theta_i = wp$	8	5,72	0,924	0,838	0,86
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	8	5,64	0,967	0,828	0,83
	$\theta_i = cc$	8	5,55	1,005	0,819	0,79
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	12	4,75	0,918	0,807	0,83
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	12	4,40	0,987	0,776	0,72
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	12	4,03	0,999	0,752	0,62
Argilo-arenoso	$\theta_i = n$	16	3,34	1,064	0,682	0,63
	$\theta_i = wp$	24	1,08	0,803	0,255	0,32
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	24	1,01	0,770	0,235	0,30
	$\theta_i = cc$	24	0,92	0,729	0,208	0,27
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	0,81	0,677	0,169	0,23
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	0,74	0,637	0,139	0,20
Argilo-limoso	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	0,67	0,598	0,109	0,17
	$\theta_i = n$	24	0,52	0,489	0,059	0,11
	$\theta_i = wp$	24	1,64	1,028	0,375	0,51
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	24	1,50	0,995	0,336	0,45
	$\theta_i = cc$	24	1,28	0,907	0,292	0,37
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	1,09	0,832	0,236	0,31
Argiloso	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	0,95	0,775	0,182	0,25
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	0,81	0,708	0,126	0,20
	$\theta_i = n$	24	0,47	0,459	0,029	0,07
	$\theta_i = wp$	24	1,44	0,973	0,323	0,43
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	24	1,31	0,928	0,289	0,38
	$\theta_i = cc$	24	1,15	0,883	0,231	0,31
Franco	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	1,00	0,834	0,166	0,25
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	0,87	0,772	0,115	0,20
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	0,73	0,682	0,070	0,14
	$\theta_i = n$	24	0,38	0,373	0,007	0,03
	$\theta_i = wp$	20	2,65	1,362	0,487	0,60
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	20	2,54	1,420	0,442	0,54
Franco arenoso	$\theta_i = cc$	20	2,40	1,465	0,390	0,47
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	1,67	1,010	0,394	0,53
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	1,48	0,978	0,340	0,44
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	1,27	0,894	0,298	0,37
	$\theta_i = n$	24	0,76	0,568	0,255	0,28
	$\theta_i = wp$	16	3,79	0,999	0,737	0,80
Franco argilo-arenoso	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	16	3,72	1,077	0,710	0,76
	$\theta_i = cc$	16	3,63	1,158	0,681	0,72
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	16	3,32	1,312	0,604	0,58
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	20	2,67	1,068	0,600	0,65
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	20	2,49	1,155	0,537	0,57
	$\theta_i = n$	20	2,14	1,268	0,407	0,40
Franco argilo-arenoso	$\theta_i = wp$	24	1,54	1,000	0,351	0,47
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	24	1,46	0,977	0,332	0,43
	$\theta_i = cc$	24	1,36	0,938	0,312	0,40
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	1,17	0,835	0,284	0,35
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	1,00	0,734	0,269	0,32
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	0,85	0,630	0,257	0,29
	$\theta_i = n$	24	0,50	0,376	0,250	0,27



Textura	θ_i	Nº casos	P_{lim} (cm/d) [= $b/(1-a)$]	b em $Is = aP + b$	a em $Is = aP + b$	correlação (r)
Franco argilo-limoso	$\theta_i = wp$	20	2,17	1,460	0,327	0,38
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	24	1,59	1,018	0,359	0,49
	$\theta_i = cc$	24	1,37	0,942	0,310	0,40
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	1,12	0,809	0,275	0,34
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	0,94	0,713	0,241	0,29
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	0,78	0,629	0,199	0,25
	$\theta_i = n$	24	0,54	0,491	0,093	0,15
Franco argiloso	$\theta_i = wp$	24	1,63	1,022	0,374	0,51
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	24	1,54	1,004	0,347	0,46
	$\theta_i = cc$	24	1,41	0,959	0,319	0,42
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	1,16	0,835	0,283	0,35
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	0,96	0,706	0,264	0,31
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	0,74	0,556	0,251	0,28
	$\theta_i = n$	24	0,44	0,357	0,191	0,22
Franco limoso	$\theta_i = wp$	16	3,85	1,007	0,738	0,82
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	16	3,67	1,191	0,676	0,73
	$\theta_i = cc$	20	2,90	0,998	0,655	0,77
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	20	2,67	1,254	0,531	0,62
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	20	2,45	1,377	0,437	0,50
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	1,73	0,985	0,432	0,56
	$\theta_i = n$	24	1,24	0,867	0,301	0,36
Limoso	$\theta_i = wp$	20	2,17	1,461	0,327	0,38
	$\theta_i = 0,5.wp + 0,5.cc$	24	1,59	1,017	0,358	0,48
	$\theta_i = cc$	24	1,36	0,939	0,309	0,40
	$\theta_i = 0,5.cc + 0,5.n$	24	1,11	0,810	0,271	0,33
	$\theta_i = 0,25.cc + 0,75.n$	24	0,94	0,721	0,234	0,29
	$\theta_i = 0,1.cc + 0,9.n$	24	0,79	0,644	0,189	0,24
	$\theta_i = n$	24	0,53	0,491	0,081	0,14

Nota: para o solo arenoso $Is = P$ (pelo que $a = 1$, $b = 0$)

(in OLIVEIRA, 2004)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A forma de cálculo da infiltração superficial apresentada tem a vantagem de considerar o teor de humidade inicial do solo, que tem que ser calculado para cada dia. Tem a desvantagem de as fórmulas terem sido desenvolvidas a partir de determinadas características do solo e distribuições de precipitações; se se tivessem utilizado outras distribuições as equações seriam diferentes. O cálculo de Is a partir das equações dá aproximações aos valores de Is ; é de esperar que nuns casos dê valores por defeito, noutros por excesso, embora a soma dos erros se deva compensar para um período grande de análise. Provavelmente, a maior desvantagem desta opção é que não considera a ocupação do solo, ou seja, pode-se ter uma ocupação do solo que impermeabilize mais o terreno mas se o solo considerado for o mesmo, a infiltração superficial é idêntica. Esta aproximação considera, ainda, um solo médio, com as propriedades referidas no Quadro 2, tendo que se optar por um desses solos para se caracterizar a infiltração superficial.

A metodologia apresentada considerou um solo homogéneo. Para a aplicação a situações reais, onde num solo se definem vários horizontes, OLIVEIRA (2004) assume que o horizonte que condiciona a infiltração superficial é o horizonte mais próximo da superfície, excluindo o horizonte Ap, que é um horizonte onde o solo se encontra remexido. O horizonte Ap só é considerado quando no perfil não se identificaram outros horizontes. Em OLIVEIRA (2004) apresenta-se uma tabela que relaciona a informação da Carta de Solos do IHERA à escala 1:25 000, complementada com diversas fontes de



informação sobre os perfis dos solos (SROA, 1970, 1973), com o material do horizonte mais superficial do solo. Utilizando esta tabela, e não havendo disponível informação mais pormenorizada sobre uma área em estudo, pode-se utilizar esta Carta dos Solos para caracterizar o horizonte mais superficial do solo. OLIVEIRA (2003, 2004, 2006) apresenta o cálculo da recarga dos sistemas aquíferos de Quarteira e de Albufeira-Ribeira de Quarteira, no Algarve, onde utiliza a metodologia apresentada para o cálculo da infiltração superficial.

BIBLIOGRAFIA

- ALBERTS, E.E.; NEARING, M.A.; WELTZ, M.A.; RISSE, L.M.; PIERSON, F.B.; ZHANG, X.C.; LAFLEN, J.M.; SIMANTON, J.R. (1995) – "*Chapter 7. Soil component*" in *USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP)*, NSERL Report No. 10. <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/docs/chap7.pdf> (em 2002-11-28).
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. (1988) – *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 572 pp.
- COSTA, J.B. (1991) - *Caracterização e Constituição do Solo*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 4ª Ed. Lencastre e Franco (1984).
- LOBO FERREIRA, J.P. (1981) – "*Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce (Lack) Hydrogeological Data*". Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp. 1981, Rotterdam, A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt e F.B.J. Barends). Também 1982, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória N° 582.
- MUALEM, Y.; ASSOULINE, S. (1996) – "*Soil sealing, infiltration and runoff*", in *Runoff, infiltration and subsurface flow of water in arid and semi-arid regions*, editado por Issar, A.S e Resnick, S.D., Kluwer Academic Publishers, pp. 131-181.
- OLIVEIRA, M.M. (2003) - *Cálculo da recarga dos sistemas aquíferos de Quarteira e de Albufeira-ribeira de Quarteira recorrendo a uma actualização (do modelo de balanço hídrico sequencial diário) que utiliza o coeficiente cultural dual na estimativa da evapotranspiração real*, Actas das Jornadas Luso-Espanholas "As Águas Subterrâneas no sul da Península Ibérica", Eds. Ribeiro, L.; Peixinho de Cristo, F.; Andreo, B.; Sánchez-Vila, X.; Faro, 23-26 Junho; pp. 135-146.
- OLIVEIRA, M.M. (2004) - *Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação*. Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 440 pp.
- OLIVEIRA, M.M. (2006) - *Uma metodologia para avaliação da recarga natural de águas subterrâneas. Aplicação à área dos sistemas aquíferos de Quarteira e de Albufeira-Ribeira de Quarteira (Algarve)*. Lisboa: ICT/Hidráulica - INCH 8 - ISBN 972-49-2075-5, LNEC.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. (1989) – "*Estimation of soil water retention and hydraulic properties*", in Morel-Seytoux, H.J. (ed.) *Unsaturated flow in hydrologic modeling*. Fort Collins, USA. p 275-300.
- S.R.O.A. (1970) - *Carta dos Solos de Portugal. I Volume: Classificação e Caracterização Morfológica dos Solos*. Ministério da Economia, Secretaria de Estado da Agricultura, Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário, Volume I, 6ª Ed.
- S.R.O.A. (1973) - *Carta dos solos de Portugal. II Volume: classificação e caracterização morfológica dos solos*. Ministério da Economia, Secretaria de Estado da Agricultura, Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário, Volume II, 6ª Ed.