

Caracterização Hidrodinâmica dos Solos da Bacia Experimental do Riacho Guaraíra Utilizando o Método Beerkan

Celso Augusto Guimarães Santos, Jorge Flávio Cazé Braga Costa Silva

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

celso@ct.ufpb.br, jfgeo2@yahoo.com.br,

Richarde Marques da Silva

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Departamento de Geociências

richarde@geociencias.ufpb.br

Recebido: 31/07/11 – Revisado: 05/12/11 – Aceito: 01/06/12

RESUMO

O conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, como as curvas de retenção da água no solo e da condutividade hidráulica, é indispensável na modelagem do transporte de água e de sedimentos. Dessa forma, apresenta-se, neste trabalho, uma metodologia utilizada na obtenção de propriedades hidrodinâmicas do solo, conhecida como Beerkan, com o objetivo de caracterizar espacialmente as principais características hidrodinâmicas do solo, i.e., condutividade hidráulica, porosidade, e retenção de água no solo, da Bacia Experimental do Riacho Guaraíra, localizada na zona litorânea do Nordeste do Brasil. Amostras deformadas de solo foram coletadas e testes de infiltração, em uma malha regular de 196 pontos na bacia com espaçamento de 200 m entre eles, foram realizados. O método foi aplicado em dois tipos de solos, i.e., Argissolos (PV3) e Espodossolos (HP), com diferentes classes texturais (areia, areia franca, e franco arenosa). Foram determinados, com vistas à caracterização hidrodinâmica, os parâmetros de forma da curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ de Van Genuchten e da curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ de Brooks e Corey, dependentes majoritariamente da textura do solo e obtidos a partir da curva de distribuição dos tamanhos das partículas, além dos parâmetros de normalização dependentes, essencialmente, da estrutura do solo e obtidos a partir dos ensaios de infiltração utilizando-se o infilômetro de anel simples. Os resultados obtidos mostraram que os valores de sorvidade (S) e condutividade hidráulica saturada do solo (K_s) são ligeiramente maiores para os solos com menor teor de areia. Verifica-se também que os valores de S e K_s são maiores para os solos do tipo HP, mostrando que este solo é mais permeável que o PV3, para qualquer uma das classes texturais analisadas. Por fim, o método Beerkan mostrou-se ser um método promissor e de fácil aplicação para a determinação das características hidrodinâmicas dos solos.

Palavras-chave: Método Beerkan. parâmetros hidrodinâmicos. infiltração.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das características hidrodinâmicas do solo, tais como as curvas de retenção da água no solo, porosidade, e condutividade hidráulica saturada do solo, é indispensável para o gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas.

Atualmente, várias técnicas experimentais vêm sendo realizadas para determinar as características hidrodinâmicas do solo diretamente no campo. Todavia, a complexidade, os custos elevados e o tempo de execução dessas técnicas são fatores limitantes na obtenção da caracterização

hidrodinâmica do solo, principalmente em escala de bacias.

Dentre as metodologias empregadas para a obtenção das características hidrodinâmicas, está o método semifísico conhecido como Beerkan (BRAUD et al., 2003; HAVERKAMP et al., 1998). Esse método propõe a estimativa dos parâmetros da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$ e da curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$, considerando a textura e a estrutura do solo.

O método Beerkan vem sendo aplicado em bacias com as mais diversas condições climáticas e de solo (ANGULO-JARAMILLO et al., 2000; LASSABATÈRE et al., 2006; TOUMA; VOLTZ; ALBERGER, 2006). Porém, ainda são raras as aplicações dessa metodologia em bacias na região

Nordeste do Brasil. Entre os estudos já realizados nesta região, pode-se destacar os realizados por Furtunato et al. (2007), que estimaram os parâmetros de forma e de normalização das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$, considerando a textura e a estrutura do solo, para a escala de uma parcela.

Souza et al. (2008) também determinaram e analisaram os parâmetros de forma e de normalização das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$, por intermédio do método Beerkan, em dois tipos de solos, apresentando três distintas classes texturais, na região semiárida do Estado da Paraíba.

Furtunato et al. (2008) analisaram a aplicação do método Beerkan e funções de pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica saturada em um argissolo vermelho em uma microbacia na porção Agreste do Estado de Pernambuco, enquanto que Silva et al. (2009) testaram o método Beerkan na caracterização hidrodinâmica de um argissolo vermelho-amarelo no litoral do Estado da Paraíba. Entretanto, nesses estudos a variabilidade espacial das características físico-hídricas dos solos não foi representada.

Assim, objetivou-se neste trabalho, determinar a características hidrodinâmicas dos solos da Bacia Experimental do Riacho Guaraíra através do método Beerkan e da aplicação de técnicas de Sistemas de Informação Geográfica.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo e coleta de dados

O estudo foi desenvolvido para a Bacia Experimental do Riacho Guaraíra, localizada entre as coordenadas $-7^{\circ} 30' 00''$ e $-7^{\circ} 20' 00''$ de Latitude, e $-35^{\circ} 20' 00''$ e $-34^{\circ} 50' 00''$ de longitude. Essa bacia possui uma área de $5,74 \text{ km}^2$ e é uma microbacia do Rio Gramame, principal fonte responsável pelo suprimento de água do Município de João Pessoa, capital da Paraíba (SILVA; SANTOS; SILVA, 2007).

A Bacia Experimental do Riacho Guaraíra foi escolhida em 2002 pelo projeto Instalação de Bacia Experimental na Região Semi-Árida (IBESA), para a instalação de equipamentos de monitoramento hidrológico e ambiental. Esse projeto foi proposto pela Rede de Hidrologia do Semi-Árido (REHISA), financiado pelo MCT/Finep, e teve como finalidade principal instalar bacias experimentais no Nordeste do Brasil.

Foram realizados levantamentos cartográficos e mapeamentos sistemáticos, para determinação

da altimetria, rede hidrográfica, tipos de solo, e uso do solo para o ano de 2010. A figura 1a mostra a altimetria, hidrografia, pluviômetros e estação climatológica, e a figura 1b apresenta a distribuição espacial dos tipos de solos Argissolos vermelho-amarelo – PV3 e Espodossolos – HP, na Bacia Experimental do Riacho Guaraíra.

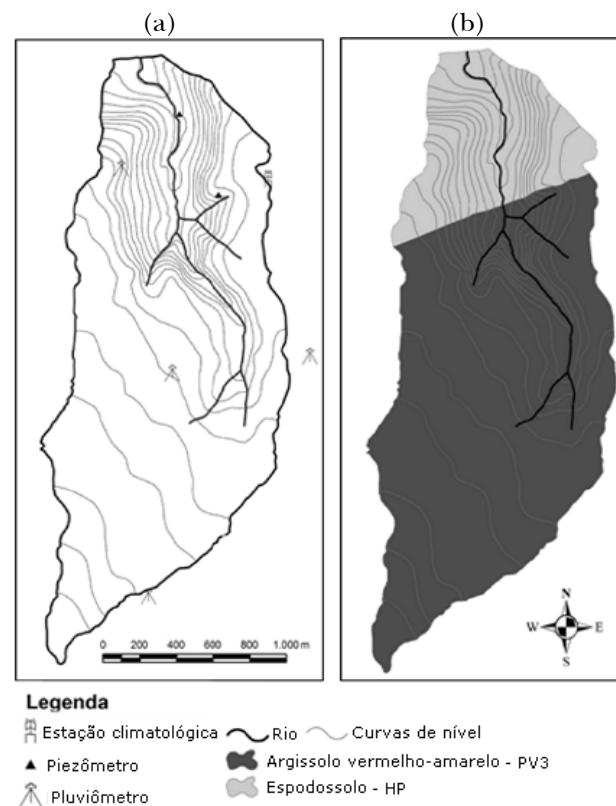


Figura 1 – Bacia Experimental do Riacho Guaraíra: (a) altimetria, hidrografia e estações climatológicas, e (b) distribuição espacial dos tipos de solos

A altimetria da bacia foi gerada na escala 1:10.000, com equidistância de 5 m, a partir de uma estação total de GPS. O mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia foi realizado com base em imagens do sensor TM do satélite Landsat 5, do ponto 216 e órbita 64, de agosto de 2010. As imagens foram georreferenciadas e em seguida aplicadas à composição colorida R5G4B3 para posterior classificação da imagem utilizando o método supervisionado.

Para a determinação dos pontos de coletas de amostras de solo e ensaios de infiltração, foi determinada uma malha regular de pontos na bacia, obedecendo a uma distância de 200 m entre cada

ponto. Os pontos foram localizados em campo com o auxílio de um receptor GPS. Desta forma, obteve-se um total de 196 pontos para a realização dos ensaios de infiltração utilizando o método Beerkan. A partir dos resultados da aplicação do Beerkan, foram gerados mapas no software ArcGIS 9.3 de condutividade hidráulica, porosidade e densidade do solo, utilizando o método de interpolação Krigagem.

O método Beerkan

A metodologia conhecida como Beerkan é realizada através de ensaios simplificados de infiltração, utilizados para determinar os parâmetros hidrodinâmicos em escala local no campo.

Este método foi idealizado por Haverkamp et al. (1998) e apresenta uma grande vantagem em relação a outros métodos experimentais devido à sua aplicação que é mais simples, rápida e requer um número reduzido de pessoas e equipamentos, tornando-o mais econômico.

O método é utilizado para representar matematicamente o fenômeno da infiltração, ajustando as curvas de infiltração para determinar os parâmetros de sorvidade (S) e condutividade hidráulica saturada do solo (K_s).

Neste método, as curvas de retenção de água no solo $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ são descritas pelos modelos de Brooks e Corey (1964) e de van Genuchten (1980), respectivamente:

$$\frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad \text{com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (1)$$

e

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \quad (2)$$

sendo n e m parâmetros de forma, θ a umidade volumétrica $[L]^3/[L]^3$; θ_r e θ_s as umidades volumétricas residuais e saturada $[L]^3/[L]^3$, respectivamente, h o potencial matricial $[L]$, h_g um parâmetro de escala $[L]$, K_s a condutividade hidráulica saturada do solo $[L]/[T]$, e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Essas funções contêm cinco parâmetros desconhecidos, dois de forma (n e η), relacionados

à textura, e três parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g) que dependem da estrutura dos solos (HAVERKAMP et al., 1998).

O método Beerkan utiliza as propriedades estáticas e dinâmicas do solo, como a curva granulométrica e a curva de infiltração da água no solo, para obter os parâmetros m , n , η , θ_s , K_s , e h_g .

A aplicação do método Beerkan está dividida em duas etapas: (a) ensaios de campo, e (b) ensaios de laboratório.

Ensaios de campo

A aplicação do método Beerkan é realizada a partir de um teste simples de infiltração tridimensional, juntamente com coletas de solo para determinação da distribuição do tamanho das partículas, da umidade inicial e final, e da massa específica do solo. Os ensaios foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos operacionais:

- Um cilindro de PVC com um diâmetro de 180 mm é posicionado na superfície do solo e inserido a uma profundidade de aproximadamente 1 cm. O método leva em consideração apenas as características hidrodinâmicas da camada superior do solo, e o aprofundamento do cilindro é apenas para evitar perdas laterais de água durante o processo de infiltração.
- Coleta-se uma amostra do solo próximo ao cilindro, que serve para determinar a umidade inicial (θ_0). Outra amostra de solo do mesmo local é coletada para a determinação da granulometria e da curva de distribuição das partículas.
- São preparados quinze volumes com 150 ml de água, que são vertidos no cilindro. O primeiro volume é vertido no cilindro e imediatamente após o esvaziamento do cilindro, outro volume de água é despejado em seu interior, anotando-se sempre o tempo que cada volume leva para infiltrar no solo. Esse procedimento é repetido sucessivamente para os 15 volumes, até que seja vertido o último volume de água no cilindro.
- Após o término do teste de infiltração, são coletadas duas amostras indeformadas do solo de dentro do perímetro do cilindro. Uma amostra é utilizada para a determinação da densidade do solo (ρ_d), e a

outra para a determinação da umidade final (θ_s).

O tempo que os volumes de água leva para infiltrar no solo é anotado em uma planilha, bem como a identificação das coordenadas geográficas do local do ensaio e o número de identificação dos recipientes onde estão contidas as amostras de solo. O material coletado em campo é pesado e catalogado na mesma planilha. Esses dados são utilizados para determinar a curva de infiltração de água no solo e, consequentemente, a condutividade hidráulica saturada do solo, K_s .

Ensaios de laboratório

A curva de distribuição do tamanho das partículas é obtida através de ensaios de granulometria, de acordo com as normas estabelecidas pela NBR-7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984). Inicialmente, a amostra é pesada e levada para a peneira #10. O material retido na peneira é lavado e secado em estufa a 110°C durante vinte e quatro horas, e em seguida é pesado. Do material que passa pela peneira, retira-se 50 g para determinação da umidade higroscópica, e esse material é colocado para secar na estufa. Ainda do material que passa na peneira #10, é retirada uma amostra de 100 g para ser peneirada na peneira #200, para o ensaio de sedimentação.

A análise granulométrica é realizada após a secagem do material, quando a amostra de 50 g é pesada novamente. A amostra de 100 g do material que passa pela peneira #10 é peneirada, após a secagem, no conjunto de peneiras referente à fração pedregulho, que compreende as peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,30; 0,15; e 0,074 mm de abertura, e então é anotado o peso retido em cada peneira. Os valores resultantes dos ensaios laboratoriais são usados para traçar a curva granulométrica.

A determinação das umidades gravimétricas (seja a inicial θ_0 ou a final θ_s), é dada pela Equação 3 e a massa específica do solo ρ_d é determinada pela Equação 4.

$$\theta = \frac{V_a}{V_t} \quad (3)$$

sendo V_a o volume de água da amostra e V_t o volume total da amostra.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (4)$$

sendo M_s a massa da amostra seca.

Determinação dos parâmetros de forma m, n e η

Após a determinação da curva granulométrica, do ensaio de infiltração, e dos valores de θ_0 , θ_s e ρ_d , são determinados os parâmetros de forma e normalização.

Haverkamp e Parlange (1986) determinaram os parâmetros de forma, assumindo a similaridade com a forma da curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{com } M = 1 - \frac{2}{N} \quad (5)$$

onde $F(D)$ é a frequência acumulada associada ao diâmetro D da partícula [L], D_g é o parâmetro de escala do tamanho das partículas [L], e M e N são parâmetros de forma adimensionais da curva de distribuição do tamanho das partículas. A suposição é que o parâmetro N pode ser relacionado ao n da curva de retenção de água no solo a partir do índice de forma do meio (p_m) pelas seguintes relações:

$$p_m = mn / (1 + m) \quad (6)$$

enquanto que para a distribuição do tamanho das partículas:

$$p_M = MN / (1 + M) \quad (7)$$

os quais se relacionam, segundo Zataráin et al. (2003), como:

$$p_m = p_M (1 + \kappa)^{-1} \quad (8)$$

na qual κ é um coeficiente definido, de acordo com Fuentes et al. (1998), como:

$$\kappa = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad (9)$$

sendo s a dimensão fractal do meio definido como a raiz da equação:

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad \text{com } \frac{1}{2} < s < 1 \quad (10)$$

onde ϕ é a porosidade do solo.

Os parâmetros de forma da curva de retenção (m , n) são derivados a partir dos valores do índice de forma, que considera a raiz positiva da equação (10) para m e deriva n a partir de m pela condição de Burdine (1953):

$$m = \frac{1}{P_m} (\sqrt{1+P_m^2} - 1) \quad (11)$$

$$n = \frac{2}{1-m} \quad (12)$$

O parâmetro de forma η da condutividade hidráulica pode ser estimado a partir do modelo de capilaridade como função do produto dos parâmetros de forma e de tortuosidade, p :

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (13)$$

sendo $p = 1$, considerando o modelo de Burdine (1953).

Determinação dos parâmetros de normalização

Os parâmetros de normalização (h_g e K_s) são obtidos através da minimização de $I(S, K_s)$, ou seja, pela soma dos quadrados da diferença entre as lâminas de água infiltradas observadas e calculadas. A lâmina de água infiltrada é calculada pela equação proposta por Haverkamp et al. (1994) válida para tempos curtos e médios:

$$I(S, K_s) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} \left(I_i - S\sqrt{t_i} + aS^2t_i + bK_s t_i \right)^2 \quad (14)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad e \quad b = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right) \quad (15)$$

sendo S a sorvidade $[L]/[T]^{1/2}$, r o raio do cilindro $[L]$, t o tempo $[T]$; γ igual a 0,75 e β igual a 0,6.

O algoritmo usado na minimização de $I(S, K_s)$ é o Levenberg-Marquardt, técnica iterativa usada para localizar o mínimo de uma função expressa como a soma dos quadrados de funções não lineares (MARQUARDT, 1963), e o desempenho dos ajustes é analisado pelos valores

correspondentes ao erro quadrático médio. Após a determinação de θ_s e K_s , o parâmetro de escala para a pressão de água h_g é obtido usando a seguinte equação (LASSABATÈRE et al., 2006):

$$h_g = - \frac{S^2}{c_p (\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right] K_s} \quad (16)$$

na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas n , m e η (DE CONDAPPA et al., 2002; HAVERKAMP et al., 1998):

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left[\Gamma \left(\frac{m\eta - \frac{1}{n}}{\Gamma(m\eta)} \right) + \frac{\Gamma \left(m\eta + m - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(m\eta + m)} \right] \quad (17)$$

sendo Γ a função Gama clássica, que é uma extensão da função factorial aos números complexos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 apresenta o mapeamento do uso e ocupação do solo na Bacia Experimental do Riacho Guaraíra para 2010. Percebe-se que o uso do solo da bacia é constituído por cana-de-açúcar (27%), vegetação rasteira (67%), abacaxi (1%) e mata densa (4%). De acordo com Silva, Montenegro e Santos (2012), a região conhecida como Zona da Mata Nordestina se caracterizou por uma redução significativa da área de mata densa em detrimento da expansão de culturas como a da cana-de-açúcar e a do abacaxi e, sobretudo, do desmatamento para uso de culturas de pequeno porte e para pastagens.

O predomínio da cana-de-açúcar no litoral nordestino foi uma constante desde meados da colonização até os dias atuais, porém, sua organização nem sempre foi a mesma. O aumento da área plantada com cana-de-açúcar em toda fachada do litoral nordestino, baseou-se na produção açucareira destinada ao mercado externo, influenciado por programas governamentais de incentivos fiscais, e.g., Pró-álcool (SILVA et al., 2007).

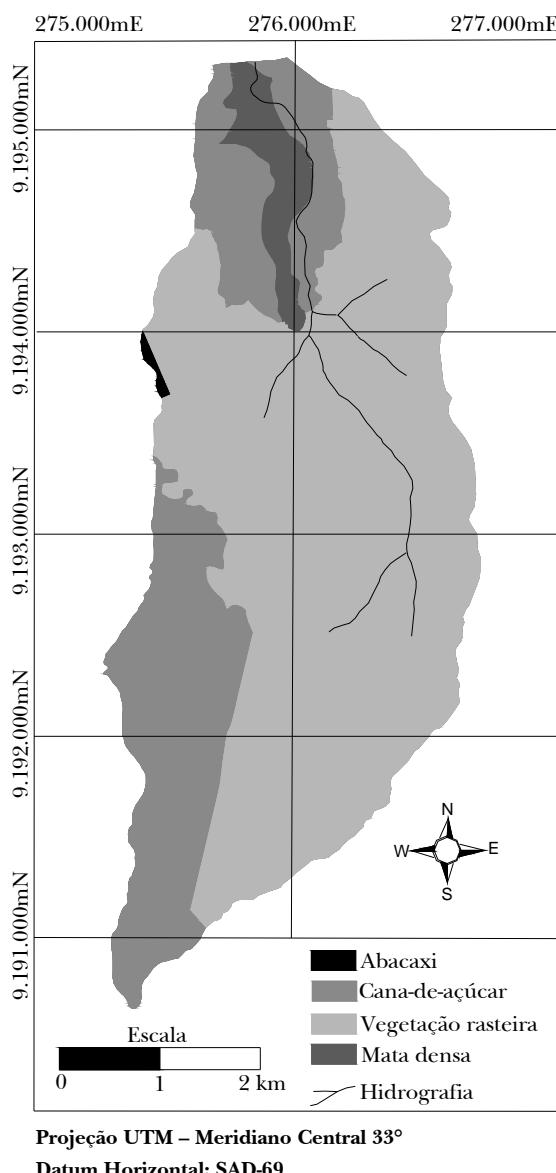


Figura 2 – Uso do solo em 2010 da Bacia Experimental do Riacho Guaraíra

Determinação das curvas granulométricas e classificação quanto ao tipo de solo

Durante os ensaios de campo, foram coletadas amostras de solo para determinação da curva granulométrica de cada ponto da bacia. As curvas granulométricas para cada classe textural são apresentadas na figura 3. Nota-se que as amostras coletadas, de uma maneira geral, possuem distribuição granulométrica semelhantes para cada classe textural de solo.

Os resultados obtidos pela classificação dos solos, segundo o sistema de classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, apontam que 70,2% das amostras ensaiadas são classificadas como areia, 26,3% como areia franca e 3,5% como sendo franco-arenosa. Assim, os solos da bacia podem ser classificados predominantemente como arenosos.

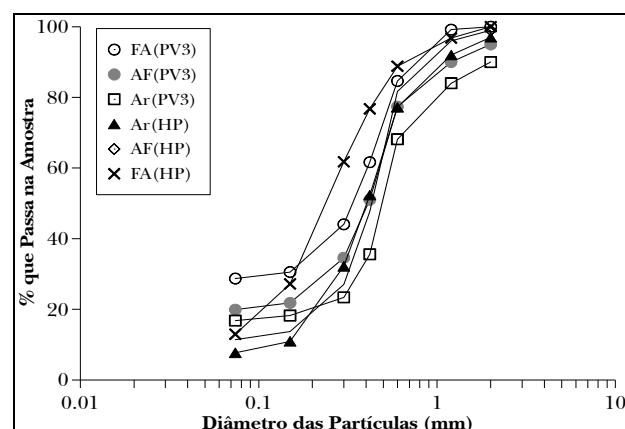


Figura 3 – Curvas granulométricas médias de cada classe textural dos solos

Análise dos parâmetros de forma e de normalização

A tabela 1 apresenta os parâmetros de forma das curvas de distribuição das partículas para os pontos estudados. Nota-se que os parâmetros M e N e o produto MN apresentam maiores valores para os solos com frações arenosas mais altas, enquanto o parâmetro de escala do diâmetro das partículas D_g apresentou, de uma maneira geral, comportamento inverso, com exceção da areia franca (HP).

Souza et al. (2008) analisaram amostras de solos com diferentes classes texturais (areia, areia franca, franco argilo arenosa, franco argilosa e franco arenosa) e obtiveram para as classes areia, areia franca e franco arenosa respectivamente os valores de 0,35, 0,24 e 0,14 para M ; 2,32, 2,64 e 3,09 para N e 576,7, 556,7 e 715,9 μm para D_g .

Lassabatère et al. (2006), utilizando um procedimento semelhante, calcularam os valores de N e D_g para três diferentes classes de solos (solo siltoso, arenoso e um terceiro intermediário aos dois primeiros) e obtiveram para o solo arenoso os valores de $N = 3,48$, e $D_g = 779 \mu\text{m}$.

Tabela 1 – Parâmetros de forma das curvas de distribuição das partículas da bacia experimental

Classe Textural	M	N	MN	D _g (μm)
Arcia (HP)	0,477	3,881	1,881	525,18
Arcia Franca (HP)	0,324	2,974	0,582	678,53
Franco Arenosa (HP)	0,177	2,429	0,429	547,44
Arcia (PV3)	0,376	3,208	1,208	511,62
Arcia Franca (PV3)	0,362	3,140	1,140	538,24
Franco Arenosa (PV3)	0,264	2,719	0,719	713,76

A tabela 2 mostra os parâmetros de forma funcionais de $h(\theta)$ e $K(\theta)$. Nota-se que os resultados obtidos para os parâmetros de forma estão dentro dos valores obtidos para solos com as mesmas classes texturais apresentados por Furtunato et al. (2008), Lassabatère et al. (2006) e Souza et al. (2008).

Tabela 2 – Parâmetros de forma funcionais de $h(\theta)$ e $K(\theta)$

Classe textural	m	n	η	c _p
Arcia (HP)	0,301	2,882	5,502	1,753
Arcia Franca (HP)	0,174	2,425	7,829	1,987
Franco Arenosa (HP)	0,088	2,192	1,340	2,346
Arcia (PV3)	0,237	2,624	6,230	1,850
Arcia Franca (PV3)	0,220	2,569	6,622	1,871
Franco Arenosa (PV3)	0,174	2,420	7,757	2,110

Os parâmetros m e n, como esperado e por se tratar de parâmetros que dependem da textura, apresentaram o mesmo comportamento que os parâmetros m, n e c_p, i.e., foram maiores nos solos mais grossos. Com relação a cada tipo de solo, observa-se que os valores de m, n e c_p foram próximos em todas as classes texturais, com exceção dos valores obtidos para o parâmetro η. O comportamento semelhante dos valores de m, n e c_p já era esperado por tratar-se de fatores dependentes da textura do solo. Os valores do parâmetro c_p aumentaram à medida que o solo tornou-se mais fino para ambos os solos estudados, com os maiores valores encontrados na classe textural Franco Arenosa nos solos HP (2,346) e PV3 (2,110).

Os valores do parâmetro η tiveram comportamento distinto dos demais parâmetros de forma, visto que ele é inversamente proporcional ao produto desses parâmetros (Equação 13).

Comparando os valores dos parâmetros de forma funcionais (m, n, η e c_p) encontrados por Souza et al. (2008) com os apresentados na tabela 2, pode-se observar concordância satisfatória entre os resultados, exceto para o parâmetro η com relação à classe textural franco arenosa. Esta diferença deve-se ao fato da variação do percentual de areia grossa encontrada em ambos os solos.

Os valores médios dos parâmetros de normalização referentes aos pontos estudados, separados pelas classes texturais e pelo tipo de solo, estão apresentados na tabela 3. Comparando as classes texturais dos solos, pode-se observar que os valores de S são ligeiramente maiores para os solos com menor teor de areia, enquanto os valores de K_s são menores para as mesmas classes texturais encontradas na bacia. Verifica-se também que os valores de S e K_s são maiores para os solos do tipo HP, mostrando que este tipo de solo é mais permeável que o PV3, para qualquer uma das classes analisadas. A capilaridade e a gravidade podem afetar a infiltração, e estes fatores são caracterizados pela escala de comprimento capilar (λ_c) e pelo raio característico de poros hidráulicamente ativos (λ_m), determinados por:

$$\lambda_c = \frac{\delta S^2}{(\theta_s - \theta_0) K_s} \quad (18)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (19)$$

na qual σ é a tensão superficial da água (0,0719 N/m), ρ_a a massa específica da água (10³ kg/m³), g a aceleração da gravidade (9,81 m/s²) e δ um parâmetro de forma da difusividade ($1/2 \leq \delta \leq \pi/4$), considero igual a 0,55. Pela tabela 3, nota-se que tanto no solo PV3 quanto no HP, o raio característico de poros hidráulicamente funcionais (λ_m) aumenta proporcionalmente com o teor de areia. O λ_c representa a importância relativa das forças capilares em relação à gravidade, quando a água é transmitida através do solo, com umidade inicial θ₀, e o λ_m define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada h; quanto maior for λ_m, maior é o efeito da gravidade em relação ao da capilaridade.

Tabela 3 – Parâmetros de normalização médios da Bacia Experimental do Riacho Guaraíra

Classes texturais dos solos	S (mm/s ^{1/2})	K _s (mm/s)	θ ₀	θ _s	λ _c (mm)	λ _m (mm)	h _g (mm)
Arcia (HP)	1,480	0,180	0,037	0,274	1,558	107,81	-23,31
Arcia Franca (HP)	1,837	0,073	0,079	0,318	0,446	321,91	-110,75
Franco Arenosa (HP)	2,178	0,060	0,116	0,380	0,209	154,95	-146,95
Arcia (PV3)	1,024	0,144	0,048	0,342	0,929	51,43	-68,10
Arcia Franca (PV3)	1,155	0,144	0,108	0,405	0,695	150,54	-58,57
Franco Arenosa (PV3)	1,569	0,224	0,195	0,439	2,226	27,41	-31,65

Os valores de λ_m variaram entre 0,076 e 0,235 mm, e estão de acordo com os valores obtidos por Furtunato (2008) e Souza et al. (2008). O aumento do raio característico dos poros que efetivamente transportam a água implicaria também no aumento de S e K_s. No entanto, observou-se um comportamento contrário. Isto é explicado devido ao fato que, apesar do tamanho dos poros ter aumentado com o teor de areia, a quantidade de poros hidráulicamente ativos por unidade de área pode diminuir. Além do mais, apesar de tratar-se de classes texturais distintas, a diferença entre os teores de areia das três classes é muito pequena, resultando em estruturas bastante semelhantes.

Determinação das curvas de condutividade hidráulica e de retenção de água no solo

Foram geradas curvas de condutividade hidráulica e de retenção de água no solo para cada ponto de coleta. Apesar da simplicidade de aplicação do método, não foram obtidas as curvas para alguns pontos. Esse fato se deu provavelmente devido a falhas nas coletas em campo, os quais foram descartados na presente análise, ou pelo fato dos ensaios terem sido realizados em área com alta taxa de permeabilidade devido à presença de caminhos preferenciais no subsolo (e.g., raízes).

As figuras 4a e 4b mostram as curvas de condutividade hidráulica e de retenção de água geradas para os dois tipos de solo da bacia estudada (Espodossolos – HP e Argissolo Vermelho-Amarelo – PV3) e para as classes texturais (areia, areia franca e franco arenosa). Analisando os dados de condutividade hidráulica, nota-se que, de uma maneira geral, todos os pontos possuem comportamento similar. Este resultado era esperado devido às características dos solos, que possuem grande percentual de areia e classes texturais bastante semelhante.

Como esperado, a taxa de condutividade sobe rapidamente enquanto o teor de umidade é baixo e tende a uma estabilidade à medida que o solo atinge o estado de saturação (Figura 4a). Observa-se que a condutividade hidráulica é discretamente mais alta nos solos HP, formados por areia e areia franca, seguidos dos solos PV3, formados por areia e areia franca. A condutividade hidráulica é um pouco mais baixa nos solos de classe textural franco arenosa, para ambos os solos estudados.

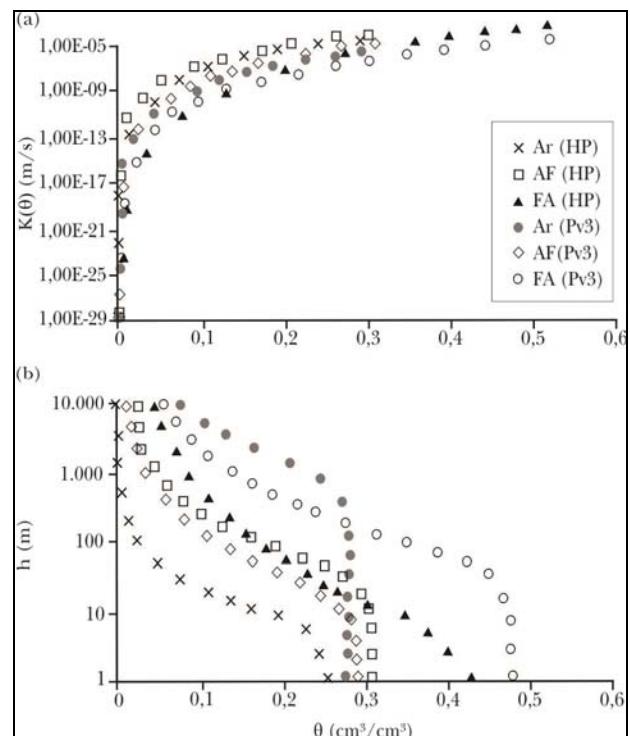


Figura 4 – (a) Condutividade hidráulica e (b) curvas de retenção de água no solo, para cada classe textural dos solos

Com relação às curvas de retenção mostradas na figura 4b, nota-se que os solos possuem como característica em comum uma elevada variação no teor de umidade e uma pequena capacidade de retenção. Percebe-se pela figura 4b que para $h = 1$ m, as umidades dos solos HP e PV3 com textura areia e areia franca variam em torno do valor de $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Para a textura franco arenosa, esse valor sobe para próximo de $0,50 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, o que significa que a maior proximidade das partículas nos solos menos arenosos aumenta os efeitos de adsorção e capilaridade e, consequentemente, esses solos retêm maior quantidade de água.

A maior proximidade das partículas do FA(PV3), faz com que os efeitos de adsorção e capilaridade sejam mais intensos que nas classes Ar(HP) e Ar(PV3), retendo maior quantidade de água. Souza et al. (2008) constataram comportamento parecido para solos compostos por areia e areia franca (com os diâmetros das partículas variando de 0,1 a 2 mm), uma vez que essas classes texturais apresentam menor capacidade de retenção de água sempre que se aproximam da saturação. Além disso, solos compostos por areia e areia franca possuem baixa capacidade de retenção devido ao espaço poroso formado por uma grande quantidade de poros hidráulicamente funcionais, os quais estão diretamente relacionados com a distribuição do tamanho das partículas dessas classes.

Análise espacial das propriedades hidrodinâmicas

Os resultados das distribuições da condutividade hidráulica, porosidade e densidade dos solos para a bacia são apresentados nas figuras 5a a 5c. Percebe-se pela figura 5a que os maiores valores de K_s foram encontrados próximos à rede de drenagem, principalmente, nas nascentes, localizadas na porção sul da bacia. Essa porção da bacia apresenta relevo plano, solos arenosos e cobertura vegetal de pequeno porte. Assim, o manejo do solo na área onde ocorrem os maiores valores de K_s deve ser realizado no sentido de melhorar a retenção de água no solo e evitar o transporte de contaminantes para a rede de drenagem. Os menores valores de K_s (12–284 mm/h) estão localizados na porção norte da

bacia, onde o relevo é fortemente ondulado e há uma grande presença de áreas agrícolas.

A figura 5b apresenta a distribuição espacial da porosidade do solo na bacia. A distribuição dos valores de porosidade apresentada mostra grande variabilidade quanto a esse atributo físico do solo. Pode-se observar que os valores da porosidade são inversamente proporcionais aos da densidade do solo (Figura 5c); i.e., nas áreas onde a densidade é maior, a porosidade é menor.

De acordo com a figura 5c, os valores de densidade do solo variaram entre $0,32$ e $1,67 \text{ g/cm}^3$, e grande parte da bacia (65%) possui uma densidade entre $0,95$ e $1,27 \text{ g/cm}^3$. Nas áreas que apresentam os maiores valores de densidade do solo ($1,51$ a $1,67 \text{ g/cm}^3$), ocorre geralmente o cultivo da cana-de-açúcar, e a explicação para esses valores pode ser atribuída ao intenso revolvimento do solo, proporcionado pelo manejo do solo e à incorporação dos resíduos da cana-de-açúcar.

CONCLUSÕES

O levantamento de campo realizado através da subdivisão da bacia em 196 pontos foi de grande importância para o conhecimento detalhado do uso e ocupação do solo e para a realização do estudo das características hidrodinâmicas, tais como porosidade, teor de umidade e densidade do solo, exigidas para caracterização da área estudada.

Os resultados mostraram que os solos do tipo Espodossolo apresentaram menor condutividade hidráulica saturada (K_s) quando comparados com os solos Argissolos. Constatou-se também haver uma grande variabilidade nos valores de K_s para este tipo de solo.

Adicionalmente, com base no tempo de execução dos ensaios de campo e resultados obtidos, pode-se concluir que o método Beerkan apresentou-se como um método promissor e eficiente para a caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia, em especial o parâmetro K_s que poderá ser usado em modelos hidrológicos distribuídos de base física, e.g. Santos et al. (2003, 2011), além de tornar mais fácil o estudo da variabilidade espacial das propriedades hidráulicas dos solos.

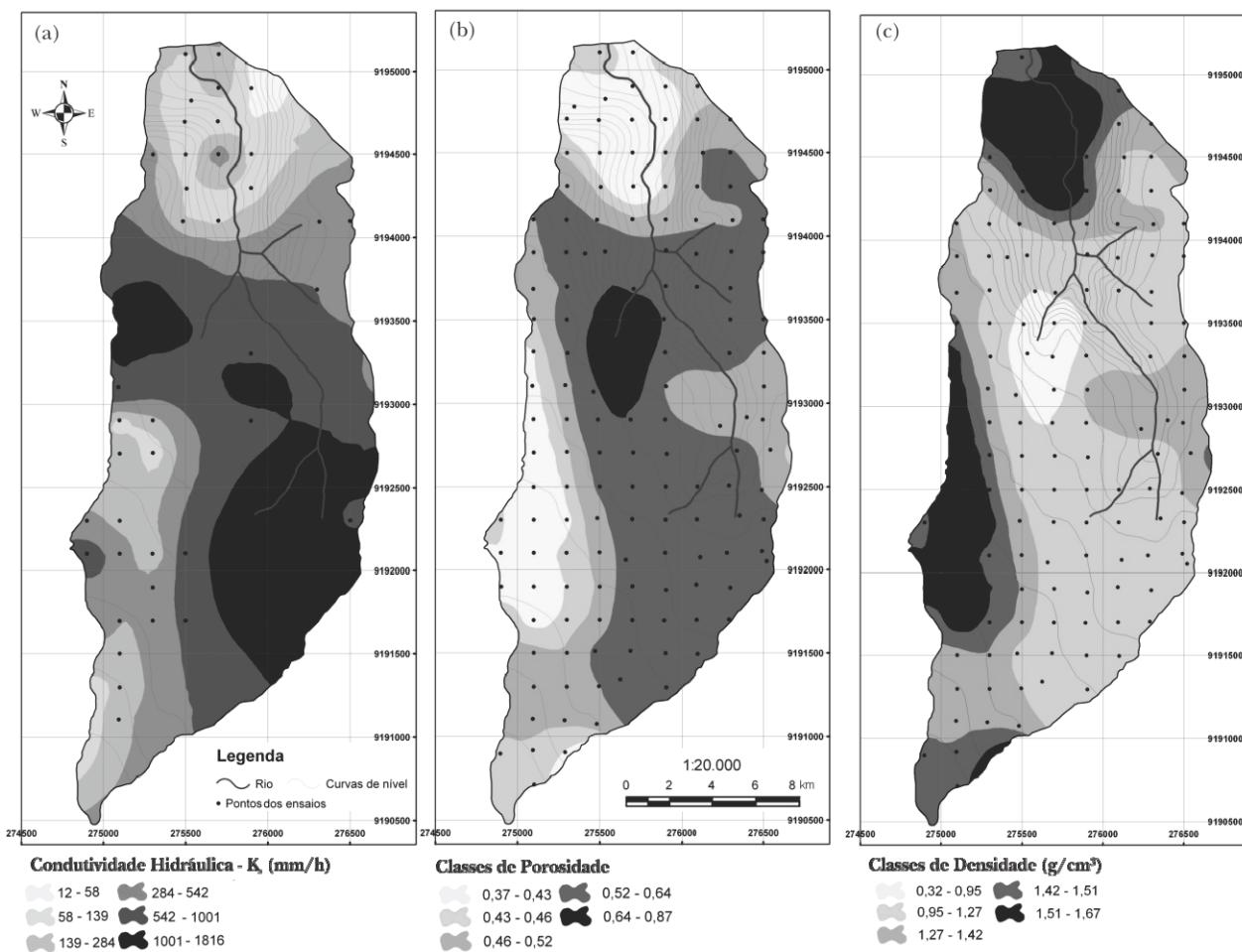


Figura 5 – Espacialização da (a) condutividade hidráulica, (b) porosidade, e (c) classes de densidade do solo, para a Bacia do Riacho Guaraíra

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao professor Dr. Eduardo Soares de Souza da UFRPE/UAST, pela ajuda na implantação da metodologia Beerkan, e também aos dois revisores anônimos, que com seus comentários altamente valiosos e sugestões contribuíram para uma melhoria significativa do artigo. Os autores agradecem também ao CNPq pelas bolsas de mestrado do segundo autor e de produtividade em pesquisa do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ANGULO-JARAMILLO, R.; VANDERVAERE, J.-P.; ROULIER, S.; THONY, J.-L.; GAUDET, J.-P.; VAUCLIN, M. Field measurement of soil surface

hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil and Tillage Research*, v. 55, n. 1, p. 1-29, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Solo: análise granulométrica*. NBR 7181: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

BRAUD, I.; HAVERKAMP, R.; ARRÚES, J. L.; LOPÉZ, M. V. Spatial variability of soil surface properties and consequences for the annual and monthly water balance of a semiarid environment (EFEDA Experiment). *Journal of Hydrometeorology*, v. 4, n. 1, p. 121-137, 2003.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. *Hydraulic properties of porous media*. Fort Collins: Colorado State University, 1964. 27 p. (Hydrology paper, n. 3).

- BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, v. 5, n. 3, p. 71-78, 1953.
- DE CONDAPPA, D.; SORIA, J. M.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; HAVERKAMP, R. *Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés*. Rapport interne Hydrologie de La Zone Non Saturés – LTHE. Grenoble: Université in soil science, 2002. 82 p.
- FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J. Y.; HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: BAVEYE, P.; PARLANGE, J. Y.; STEWART, B. A. (Ed.). *Fractals in soil science*. Boca Raton: CRC, 1998. p. 325-335.
- FURTUNATO, O. M.; OLIVEIRA, L. M. M.; SOUZA, E. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, A. M. Aplicação do método Beerkan e de funções de pedotransferência para estimativa da condutividade hidráulica saturada na Bacia Experimental do Riacho Gameleira-PE. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador. *Anais...* Salvador, 2008.
- FURTUNATO, O. M.; SOUZA, E. S.; SOARES, W. A.; ANTONINO, A. C. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVA, A. M. Características hidrodinâmicas de solos numa parcela da Bacia Experimental do Riacho Gameleira – PE. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. *Anais...* São Paulo, 2007.
- HAVERKAMP, R.; BOURAOUI, F.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; ZAMMIT, C.; DELLEUR, J. W. Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. In: DEULLEUR, J. W. (Ed.). *CRC Groundwater Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC, 1998.
- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y. Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, v. 142, n. 6, p. 325-335, 1986.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J. -Y. Three dimensional analisys of infiltration equation. *Water Resources Research*, v. 30, n. 11, p. 2931-2935, 1994.
- LASSABATÈRE, L.; ÂNGULO-JARAMILLO R.; SORIA, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 2, p. 521-532, 2006.
- MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal on Applied Mathematics*, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.
- SANTOS, C. A. G.; FREIRE, P. K. M. M.; SILVA, R. M.; ARRUDA, P. M.; MISHRA, S. K. Influence of the catchment discretization on the optimization of runoff-erosion modelling. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v. 5, 2, p. 91-102, 2011.
- SANTOS, C. A. G.; SRINIVASAN, V. S.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. Application of an optimization technique to a physically based erosion model. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 5, p. 989-1003, 2003.
- SILVA, J. F. C. B. C.; RODRIGUES, A. C. L.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Caracterização hidrodinâmica de solos através da aplicação da metodologia Beerkan: estudo de caso na Bacia Experimental do Guaraíra – PB. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. *Anais...* Campo Grande, 2009.
- SILVA, R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Integration of GIS and Remote Sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment. *Natural Hazards*, v. 62, n. 3, p. 953-970, 2012.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, L. P. Evaluation of soil loss in Guaraíra basin by GIS and remote sensing based model. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v. 1, n. 2, p. 44-52, 2007.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, L. P.; SILVA, J. F. C. B. C. Soil loss prediction in Guaraíra river experimental basin, Paraíba, Brazil based on two erosion simulation models. *Ambiente & Água*, v. 2, n. 2, p. 19-33, 2007.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008.
- TOUMA, J.; VOLTZ M.; ALBERGEL, J. Determining soil saturated hydraulic conductivity and sorptivity

from single ring infiltration tests. *European Journal of Soil Science*, v. 58, n. 1, p. 229–238, 2006.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de la forma de la caravterística de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO, 2003, Zacatecas. Anais... Zacatecas: ANEI, 2003. v. 2, p. 212–219.

Hydrodynamic Characterization of the Soils in the Guaraíra River Experimental Basin Using the Beerkan Method

ABSTRACT

Knowledge of hydraulic properties of soil, such as the water retention and hydraulic conductivity curves, is indispensable for water and sediment transport modeling. Thus, in this work, a methodology used to obtain hydrodynamic soil properties, known as Beerkan, is presented to spatially characterize the main soil hydrodynamic characteristics, i.e., saturated hydraulic conductivity, porosity, and water retention in the soil, for the Guaraíra River Experimental Basin, located in the coastal zone of northeastern Brazil. Disturbed soil samples were collected and infiltration tests were accomplished in a regular grid of 196 cells in the basin with 200 m spacing. This method was applied to two soil types (Argisols and Spodosols) with different textural classification (sand, loamy sand, sandy loam). For the hydrodynamic characterization, the shape and the normalization parameters of the $\theta(h)$ and of $K(\theta)$ curves were determined. The shape parameters depend upon the soil texture and they were obtained from the cumulative particle size distribution curve; the normalization parameters depend on soil structure and they were obtained from the infiltration experiments using the simple ring infiltrometer. The obtained results showed that the values of sorptivity (S) and saturated hydraulic conductivity (K_s) are slightly higher for soils with a lower sand percentage. It was also verified that S and K_s values are higher for the Spodosols, showing that Spodosols are more permeable than Argisols, for any textural class analyzed. Finally, the Beerkan method showed to be a promising method and easily applied to modeling three-dimensional infiltration in the field, as

well as for hydrodynamic characterization of the soils within Guaraíra River Experimental Basin.

Key-words: Beerkan method, hydrodynamic parameters, infiltration.