

# Caracterização físico-hídrica e modelagem da condutividade hidráulica saturada do solo de dunas com e sem vegetação

*Physical-hydric characterization and modeling of saturated hydraulic conductivity of dune sands with and without vegetation*

Priscila Karine Rodrigues de Sousa<sup>1\*</sup> , Teresa Raquel Lima Farias<sup>1</sup> ,  
Marcos Fábio Porto de Aguiar<sup>1</sup> 

## RESUMO

A quantidade de dados disponíveis sobre os efeitos da estabilização induzida de dunas em suas propriedades físico-hídricas é limitada, especialmente em dunas costeiras do Ceará. Nesse sentido, esta pesquisa buscou caracterizar essas propriedades em dunas localizadas nas margens de uma rodovia no município de Aquiraz (CE), cujo trecho foi estabilizado por meio da aplicação de palhas de coqueiro (palhagem) em que houve posterior desenvolvimento de vegetação. Amostras deformadas e indeformadas foram obtidas da camada superficial do solo (0-0,15 m) para determinação dos seguintes parâmetros: granulometria, massa específica aparente, densidade real, condutividade hidráulica saturada, macro e microporosidade do solo, além de curva característica. Avaliaram-se, ainda, quatro equações empíricas para estimativa indireta de condutividade hidráulica saturada por meio de parâmetros da granulometria e porosidade do solo, comparando-se valores medidos em laboratório e modelados pelas equações. Os resultados indicaram que, em termos de caracterização, as propriedades físicas do solo sem cobertura possuem a mesma ordem de grandeza do solo com vegetação. Em contrapartida, o teste T, para comparação de médias, indicou valores de densidade real, porosidade total e macroporosidade estatisticamente diferentes para os dois tipos de solo. Ao comparar parâmetros hidráulicos, observou-se que a condutividade hidráulica (normal e transformada) e a curva característica também possuem resultados semelhantes para ambos os solos. Nas equações empíricas aplicadas na determinação da condutividade hidráulica saturada, viu-se que os valores de condutividade hidráulica saturada estimados pelos modelos de Hazen (modificado) e de Beyer foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos em laboratório.

**Palavras-chave:** solo; dunas; caracterização; condutividade hidráulica; métodos empíricos.

## ABSTRACT

The amount of data available on the effects of induced stabilization of dunes on their physical-hydric properties is limited, especially in coastal dunes of Ceará. In this sense, this research sought to characterize these properties in dunes located on the sideroad of a highway in the city of Aquiraz, coastal region of Ceará, whose stretch was stabilized through the use of coconut straw (straw checkerboard) in which there was later vegetation development. Deformed and undisturbed samples were obtained from the soil surface layer (0-0.15 m) to determine the following parameters: particle size, bulk density, true density, saturated hydraulic conductivity (Ks), macro and microporosity, and soil characteristic curve. Four empirical equations were also evaluated for indirect estimation of saturated hydraulic conductivity through particle size parameters, comparing values measured and modeled by the equations. The results indicated that, in terms of characterization, the physical properties of the soil without cover have the same order of magnitude as the soil with vegetation. On the other hand, the T test, for comparing means, indicated values of real density, total porosity, and macroporosity that were statistically different for the two types of soil. Comparing the hydraulic parameters of both soils, it was observed that the hydraulic conductivity (normal and transformed) and the characteristic curve also have similar results. Within the applied empirical equations, it was observed that the values of Ks estimated by the Hazen (modified) and the Beyer models were closest to those measured in the laboratory.

**Keywords:** soil; dune; characterization; hydraulic conductivity; empirical methods.

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará - Fortaleza (CE), Brasil.

\***Autora correspondente:** priscilaksousa@yahoo.com

**Conflitos de interesse:** os autores declaram não haver conflitos de interesse.

**Financiamento:** Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap).

**Recebido:** 15/09/2021 - **Aceito:** 31/08/2022 - **Reg. ABES:** 20210248

## INTRODUÇÃO

O estado do Ceará possui 573 km lineares de faixa litorânea acompanhados por cordões de dunas, cujas larguras variam e por vezes são interrompidas pela passagem de um rio ou pela presença de falésias que faziam a linha de praia (FALCÃO SOBRINHO, 2004; MAGALHÃES, 2015). A dinâmica eólica atua remanejando constantemente os sedimentos depositados ao longo das praias, possibilitando a formação e a transformação de diversas feições dunares (CLAUDINO-SALES, 1993), no entanto essa mesma dinâmica se constitui como um problema de engenharia, pois a ação do vento pode ocasionar o assoreamento de lagoas e rios, bem como o soterramento de vias de acesso e construções em geral. Por esse motivo, em algumas localidades ao longo da costa cearense, nas margens de vias foram aplicadas técnicas para estabilização de dunas com o objetivo de minimizar o avanço da areia sobre elas.

As estratégias mais comuns para a estabilização de dunas em zonas costeiras têm sido o plantio de vegetação nativa e a instalação de cercas de areia que servem como obstáculo ao fluxo de transporte de sedimentos (EMBRAPA, 2006). Isolada ou em consórcio ao plantio, também tem sido aplicada a técnica da palhagem, que consiste na colocação de palhas de coqueiro sobre as dunas, de forma a cobrir sua superfície.

As coberturas e os manejos podem influenciar e modificar positiva ou negativamente propriedades físico-hídricas dos solos (GREEN; AHUJA; BENJAMIN, 2003; MIRANDA, 2008; MENDONÇA *et al.*, 2009), sobretudo nos horizontes mais superficiais, ou seja, na zona vadosa. Miranda (2008) afirma que o manejo inadequado do solo é uma das principais causas da degradação de sua estrutura, podendo provocar redução da macroporosidade, aumento da microporosidade e da densidade do solo, diminuição do tamanho dos grãos e aumento da vegetação, alterando, conseqüentemente, o fluxo de água no solo.

Pesquisas realizadas sobre os efeitos da estabilização induzida em dunas desérticas da China apontam para redução na composição granulométrica superficial do solo e em valores de condutividade hidráulica. Além disso, percebe-se maior capacidade de retenção de água, bem como aumento na concentração de parâmetros químicos como N, P, K e de fertilidade do solo (ZHENGHU *et al.*, 2004; WANG *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019). Todavia, poucos trabalhos brasileiros têm sido desenvolvidos com foco na integração das propriedades físicas e hidráulicas da camada superficial (zona vadosa) do solo de dunas, com a influência da vegetação nas propriedades de um solo arenoso proveniente de dunas.

Ao longo dos últimos anos, pesquisas relacionadas à integração das propriedades mecânicas e hidráulicas da zona vadosa têm se intensificado. O interesse nesse tipo de estudo reside na crescente necessidade de desenvolver ferramentas para avaliar a qualidade da água e do solo, além de possíveis problemas ambientais que comprometem o fluxo e o armazenamento de água por causa da alteração da estrutura do solo por processos de compactação ou manejo inadequado. Modelos matemáticos e resultados de trabalhos experimentais constituem, em conjunto, ferramentas-chave, pois geralmente se valem de parâmetros que governam o movimento de água no solo não saturado, como é o caso da curva característica, também chamada de curva de retenção de água, cujos parâmetros,  $\alpha$  e  $n$ , se relacionam com a pressão de entrada de ar e com a distribuição de tamanho dos poros, respectivamente. Da curva característica, derivam vários indicadores que podem ser utilizados para inferências sobre a qualidade física do solo, por exemplo, a porosidade (macro e microporosidade),

a distribuição de poros por tamanho e a capacidade de água disponível às plantas (NASCIMENTO *et al.*, 2018).

Nesse sentido, este artigo visou caracterizar propriedades físicas e hidráulicas do solo de dunas com e sem vegetação localizadas nas margens da CE-025, estrada de acesso ao Porto das Dunas, no município de Aquiraz (CE), cujo trecho foi estabilizado por meio da aplicação de palhas de coqueiro (palhagem) sobre a superfície do solo com o propósito de minimizar o avanço da areia sobre a estrada. Os objetivos do artigo foram:

- caracterizar e realizar análise comparativa de propriedades físicas (granulometria, massa específica aparente, densidade das partículas, porosidade total, macro e microporosidade) e hidráulicas (condutividade hidráulica saturada e curva característica) de áreas de dunas com e sem vegetação;
- avaliar equações empíricas para a estimativa indireta da condutividade hidráulica saturada.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo e amostragem

Foram delimitados dois polígonos regulares, perfazendo uma área total de aproximadamente 60 mil m<sup>2</sup>, inserida na área de proteção ambiental do Rio Pacoti, no município de Aquiraz (porção nordeste do estado do Ceará), distante cerca de 26 km de Fortaleza (CE). O primeiro polígono, mais próximo à margem da estrada, representa a duna estabilizada pela palha de coqueiro, e o segundo, mais próximo ao mar, a duna em seu estado natural, móvel (Figura 1).

Quanto à amostragem, foram definidos 12 pontos georreferenciados (seis em cada polígono), de onde foram coletadas amostras de solo de modo a representar a duna estabilizada pela palha de coqueiro e a duna em seu estado natural, móvel. Do intervalo de 0 a 15 cm de profundidade, foram retirados 20 kg de areia de cada ponto para a obtenção da granulometria, da densidade real, da umidade higroscópica e para a curva característica. Partindo da superfície, foram obtidas amostras indeformadas por meio da cravação de 12 cilindros de 4,9 cm de diâmetro e 5,3 cm de altura (12 em cada área), para os ensaios de macro e microporosidade, e 12 cilindros de 10 cm de diâmetro por 12 cm de altura (seis em cada área) para os ensaios de condutividade hidráulica.

O procedimento realizado para coleta das amostras está demonstrado na Figura 2. Os cilindros menores destinados ao ensaio da mesa de tensão (Figura 2E) foram cravados com o auxílio das mãos, conforme a Figura 2B, com muito cuidado para preservar ao máximo a estrutura do solo. Nos pontos em que o solo se encontrava muito seco e solto, foi adicionada água em sua superfície para conferir um pouco de coesão aparente à areia e facilitar a cravação (Figura 2B). Após a cravação, escavou-se a areia ao redor dos cilindros até que suas laterais ficassem à mostra. Por fim, com o auxílio de uma colher de pedreiro, cada cilindro foi retirado pela parte inferior e envolvido, com cuidado, em plástico-bolha para ser transportado ao laboratório (Figuras 2C e 2D).

Os cilindros maiores, destinados ao ensaio de condutividade hidráulica, foram cravados com o auxílio de uma haste-guia e de um soquete de cravação, procurando obter amostras da presença de vegetação e raízes no interior do cilindro na área com cobertura vegetal (Figura 2A). Após a cravação, escavou-se a areia ao redor dos cilindros até que suas laterais ficassem à mostra para retirá-los com o auxílio de uma colher de pedreiro. Por fim, os cilindros foram envolvidos em plástico-bolha para serem transportados ao laboratório.

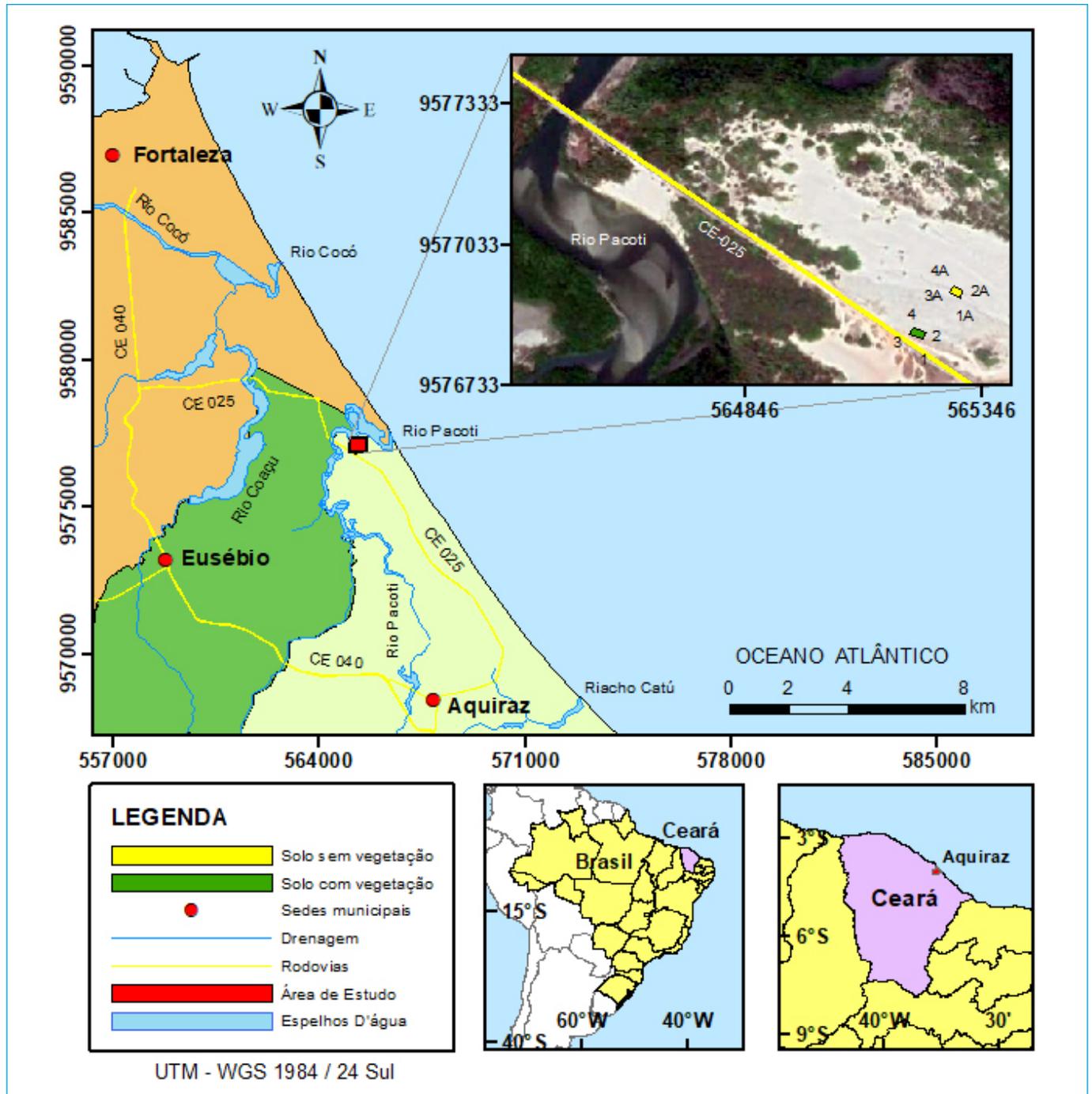


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

### Análise granulométrica

A distribuição granulométrica de cada amostra foi determinada pelo método do peneiramento, conforme procedimento descrito pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2016). As curvas granulométricas foram determinadas pela associação dos diâmetros das partículas com percentuais passantes nas peneiras, e, com base nelas, definiram-se os parâmetros que permitem caracterizar a distribuição granulométrica do solo: diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ), coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e coeficiente de curvatura ( $C_c$ ).

### Porosidade

Os valores de macroporosidade e microporosidade foram determinados pelo método da mesa de tensão (EMBRAPA, 2018). Os ensaios ocorreram com as amostras menores (12 cilindros de 4,9 cm de diâmetro e 5,3 cm de altura), totalizando 24 amostras indeformadas, sendo 12 de cada área.

### Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) das amostras foi obtida em laboratório utilizando permeâmetro de carga constante (PCC), conforme metodologia



Figura 2 - Cravação e retirada dos cilindros.

descrita em ABNT (1995). Os ensaios foram realizados com as amostras maiores (12 cilindros de 10 cm de diâmetro por 12 cm de altura), seis de cada área.

### Curva característica

A curva característica foi obtida pelo ensaio do papel-filtro, realizado com base na metodologia descrita em American Society for Testing and Materials (ASTM, 2016), com algumas adaptações sugeridas por Marinho (2000) e Rios Filho (2006) quanto à secagem e à quantidade de papel. O papel-filtro utilizado nos ensaios foi do tipo Whatman nº 42. O período adotado de equalização da sucção entre o papel-filtro e as amostras foi de sete dias, conforme recomendações de ASTM (2016). Após esse prazo, determinou-se a umidade do papel-filtro após a equalização com a sucção da amostra de solo.

O modelo de van Genuchten (1980), Equação 1, foi escolhido para o ajuste dos pontos experimentais. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  foram obtidos por otimização, minimizando-se a diferença entre os resultados experimentais e teóricos, por intermédio da ferramenta Solver, do programa Excel.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad (1)$$

Em que:

$\Psi$ : a sucção,

$\theta_s$ : o teor de umidade volumétrica residual;

$\theta_s$ : o teor de umidade volumétrica saturada;

$\alpha$  e  $n$ : parâmetros empíricos;

$m$ : a constante de restrição ( $m = 1 - 1/n$ ) (MUALEM, 1986);

$\alpha$ : aproximação do valor de entrada de ar do solo.

### Modelagem da condutividade hidráulica saturada

Quatro equações empíricas para obtenção indireta da  $K_s$  a partir de parâmetros da granulometria foram ajustadas de modo a representar os valores de condutividade medidos com o menor erro possível (Tabela 1). Todas foram escolhidas com base em Rosas *et al.* (2014); foram as equações que forneceram uma melhor correlação estatística entre os valores de condutividade hidráulica estimados e medidos em dunas costeiras avaliadas pelo autor. Utilizaram-se os mesmos coeficientes beta ( $\beta$ ) ajustados pelo autor para o grupo Dunas com diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) entre 0 e 0,20. O conjunto de dados obtidos por Rosas *et al.* (2014) contém valores de condutividade hidráulica para solos provenientes de vários ambientes deposicionais cujas amostras foram coletadas em diversos continentes, o que permite que as equações desenvolvidas para este conjunto de dados sejam aplicáveis em diferentes tipos de solo arenoso (WANG; FRANÇOIS; LAMBERT, 2017).

### Análise estatística

Realizou-se uma análise estatística por meio da aplicação do teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), de forma a verificar a normalidade dos dados de porosidade e  $K_s$ . O teste  $t$  de Student ao nível de 5% de significância foi aplicado para comparação das médias dos valores de massa específica, densidade real, porosidade total, macroporosidade e microporosidade. Os programas computacionais utilizados para as análises estatísticas e construção de gráficos foram o Statistical Package for the Social Sciences (IBM, 2011) e o R® (R CORE TEAM, 2020). A modelagem da condutividade hidráulica deu-se por meio de uma folha de cálculo do tipo Excel, desenvolvida por Rosas *et al.* (2014), que permite normalizar os valores medidos e modelados de  $K_s$  à temperatura de 25°C.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização física do solo

A composição granulométrica das amostras do solo apresentou variação de 5 a 38% de areia média, 62 a 94% de areia fina e 0 a 1% de finos. Valores baixos de  $C_u$  ( $C_u < 5$ ) indicam que o solo possui grãos uniformes, e a distribuição granulométrica é do tipo mal graduada (Figura 3). Assim, classificou-se o solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos como SP (areia mal graduada) e pela classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials como A-3 (areia fina).

Em média, a massa específica aparente apresentou leve diminuição com a presença da vegetação, de 1,64 para 1,63  $\text{g/cm}^3$ . Wang *et al.* (2007) obtiveram resultados semelhantes ao analisar os efeitos da estabilização em dunas da China. Segundo os autores, o aumento de vegetação e a diminuição da densidade do solo sinalizam melhoria na estrutura do solo, permitindo maior capacidade de retenção de água, maior disponibilidade de água e maior porosidade. A densidade de partículas, em geral, mostrou-se homogênea para ambos os solos, com pequenos desvios padrão, comportamento esperado em função da uniformidade

**Tabela 1** – Equações empíricas para estimativa da condutividade hidráulica por meio de dados de granulometria.

| Método  | Equação   | $\beta$ ajustado      |
|---|---|-----------------------|
| Beyer (1964)  | $K[\text{m/s}] = \beta \frac{g}{v} \log \frac{500}{C_u} d_{10}^2$       | $1,47 \times 10^{-4}$ |
| Hazen – original (1892)                               | $K[\text{m/s}] = \beta C d_{10}^2$                                      | $4,35 \times 10^{-4}$ |
| Hazen modificada (1959)                               | $K[\text{m/s}] = \beta \frac{g}{v} [1 + 10(n - 0,26)] d_{10}^2$         | 88,82                 |
| Kozeny-Carman (CARMAN 1937; 1956; KOZENY, 1927; 1953) | $K[\text{m/s}] = \beta \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{10}^2$ | $4,90 \times 10^{-4}$ |

v: viscosidade cinemática do fluido ( $\text{L}^2/\text{T}$ );  $\mu$ : viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{M}/\text{L}\cdot\text{T}$ );  $\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{M}/\text{L}^3$ ); g: aceleração da gravidade ( $\text{L}/\text{T}^2$ );  $C_u$ : coeficiente de uniformidade;  $d_{10}$ : diâmetro efetivo;  $\beta$ : coeficiente beta; C: coeficiente de Hazen, em  $\text{cm}^5/\text{s}$ ; n: porosidade.

Fonte: adaptado de Rosas (2014).

característica do solo. Resultados similares de densidade real para areias de praia uniformes foram obtidos por Oliveira Filho (1987), Guimarães (2014), Goldbach (2016) e Costa *et al.* (2018), com valores variando entre 2,64 e 2,66.

Os parâmetros porosidade total e macroporosidade apresentaram maiores valores no solo com vegetação (0,36–0,43), conforme se observa no diagrama *box-plot* da Figura 4, que pode ser explicado pela presença de raízes no solo.

Observam-se na Tabela 2 os dados parciais obtidos para umidade higroscópica (h), massa específica do solo (gs), densidade das partículas ( $\delta$ ), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e granulometria para os dois tipos de solos, com e sem cobertura vegetal.

A literatura indica que os parâmetros físicos do solo possuem comportamento normal (DAHIYA; RICHTER; MALIK, 1984), que se confirmou pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk aplicado ao conjunto de valores de porosidade total e de macro e microporosidade de cada solo ( $p > 0,05$ ;  $n = 12$ ).

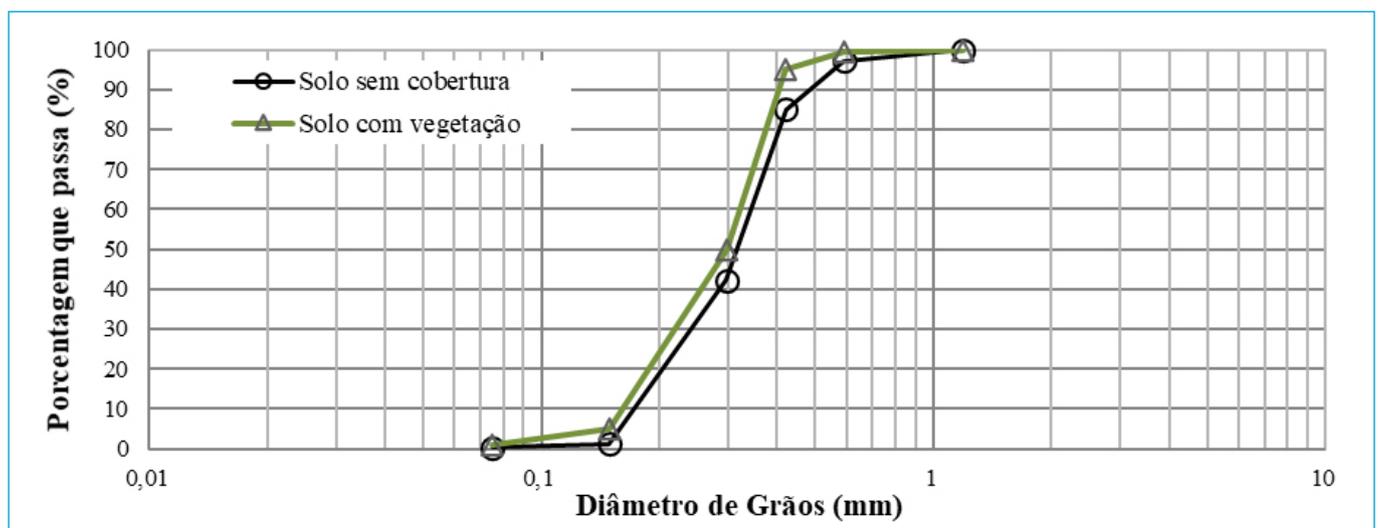
Realizou-se também o teste *t* de Student ao nível de 5% de significância para comparação das médias dos valores de massa específica, densidade real e porosidade entre os dois grupos de solo. O teste mostrou que a massa específica dos dois tipos de solo não possui diferenças significativas ( $p > 0,05$ ;  $n = 10$ ), porém o mesmo não aconteceu com a densidade real, a qual apresentou valores estatisticamente diferentes para os dois solos ( $p < 0,05$ ;  $n = 10$ ).

A respeito dos parâmetros de porosidade, o teste confirmou que o solo com vegetação possui porosidade total e macroporosidade estatisticamente maiores que as do solo sem cobertura ( $p < 0,05$ ;  $n = 22$ ). Esse resultado consiste em um reflexo dos valores dos macroporos do solo com vegetação (0,27–0,38), pois, segundo Almeida (2016), a morte e a retração das raízes criam espaços (macroporos) que permitem que haja maior taxa de infiltração na proximidade do sistema radicular.

### Caracterização hidráulica do solo

Na Tabela 3 são relacionados os resultados da estatística descritiva aplicada aos dados de  $K_s$  com e sem transformação logarítmica, bem como os valores obtidos indiretamente por meio de cálculo analítico empírico.

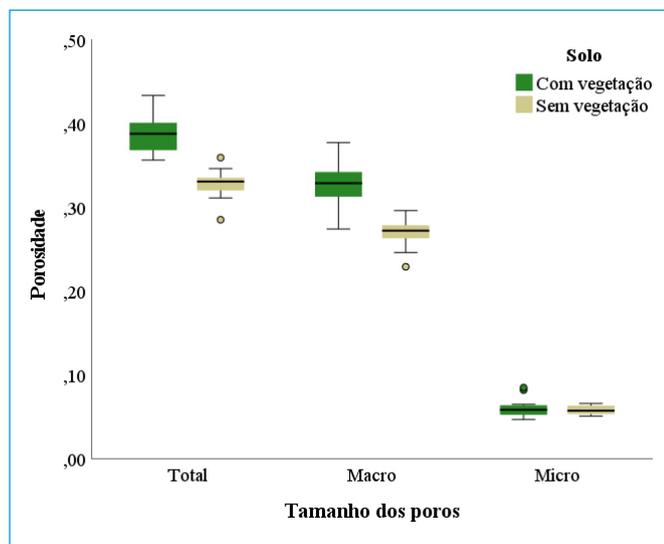
O teste de Shapiro-Wilk mostrou que a condutividade normal e a condutividade transformada do solo com vegetação possuem comportamento normal



**Figura 3** – Curva granulométrica, diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ), coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) para solos de dunas com e sem cobertura vegetal.

( $p > 0,05$ ;  $n = 6$ ), mas que os dados de condutividade do solo natural não seguem a mesma homogeneidade entre si. Na Figura 5, observa-se que, apesar de ambos os solos apresentarem dados com a mesma ordem de grandeza, em média o solo com vegetação possui maiores valores de  $K_s$  que o solo sem vegetação. Já o solo sem vegetação aponta maior amplitude de resultados.

Resultados semelhantes de condutividade foram encontrados por Chen *et al.* (2018), em seu estudo sobre os efeitos do encrostamento superficial em dunas estabilizadas. Segundo eles, o encrostamento do solo diminuiu significativamente o teor de água em profundidade, mas não na camada mais superficial, que apresentou maior retenção de água, favorecendo o maior desenvolvimento



**Figura 4** – Diagrama de caixa (*box-plot*) para porosidade total, macroporosidade e microporosidade dos dois tipos de solo, com e sem cobertura vegetal.

de gramíneas. O fato de a amostragem ter sido realizada durante o período de estiagem (julho-dezembro) também pode ter relação com esse comportamento, pois a decomposição das raízes pode levar à formação de caminhos preferenciais que aumentam o  $K_s$  do solo (MITCHELL; ELLSWORTH; MEEK, 1995; GHSTEM; SIDLE; STOKES, 2011).

Na Figura 6 estão os pontos experimentais encontrados no ensaio do papel-filtro. As curvas foram obtidas utilizando-se as equações de ajuste propostas por Fredlund e Xing (1994).

Os parâmetros de ajuste da equação de Fredlund e Xing (1994) utilizados foram:

- $a = 6,4$  kPa;
- $m = 2,3$ ,
- $n = 5,7$ ;
- $\Psi_{res} = 6$  kPa.

Para o solo com palha, os parâmetros foram:

- $a = 5,9$  kPa;
- $m = 1,6$ ,
- $n = 5,9$ ;
- $\Psi_{res} = 8$  kPa.

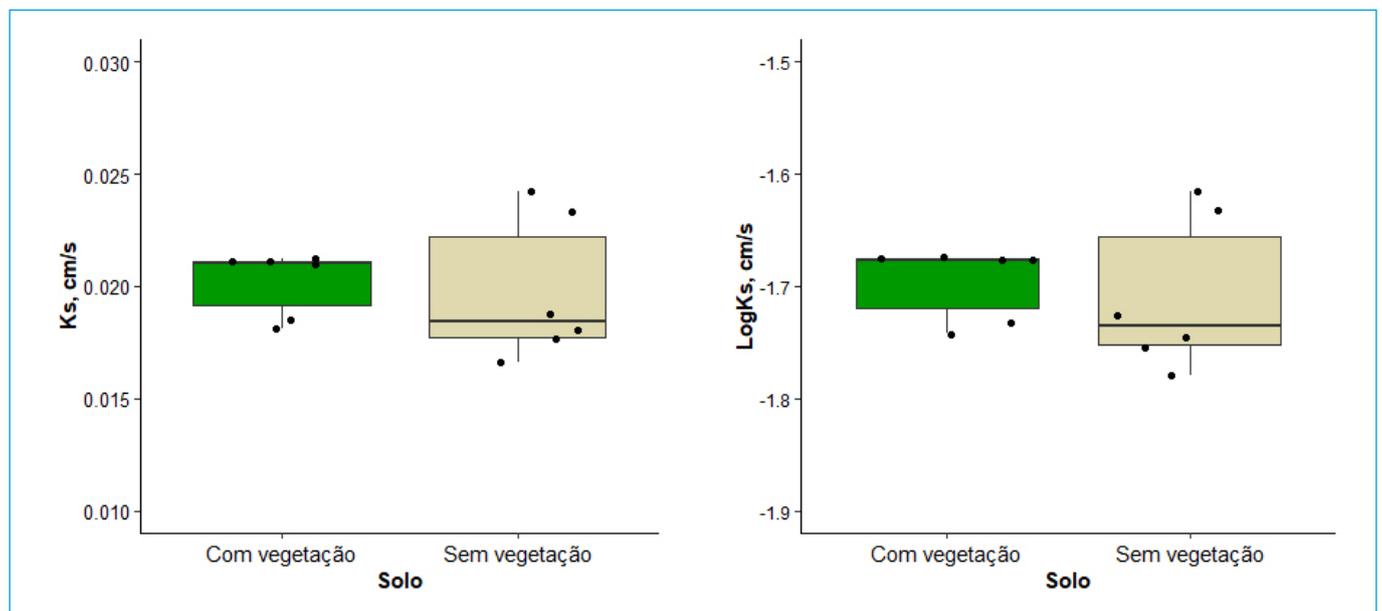
As curvas foram semelhantes para as duas áreas com e sem vegetação e tendem a apresentar um formato mais próximo ao unimodal, típico em solos arenosos, que representa homogeneidade na distribuição dos poros (CASTRO, 2020). Segundo Morel-Seytoux *et al.* (1996), os parâmetros  $\alpha$  e  $\Psi_{res}$  refletem a capacidade de retenção de água do solo. Portanto, espera-se que apresentem alguma correlação. O parâmetro  $\alpha$  diminuiu com a adição das raízes da vegetação, 7,8% menor que o  $\alpha$  do solo natural. Wang *et al.* (2007) obtiveram resultados semelhantes ao analisar os efeitos da estabilização em dunas da China.

**Tabela 2** – Estatísticas descritivas dos dados de massa específica aparente de seca ( $\rho_s$ , em  $g/cm^3$ ), densidade real ( $\delta$ ), % retida de areia média e de areia fina, porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) para solo de duna com e sem cobertura vegetal, na camada de 0-0,15 m.

|                          | Solo com vegetação |          |             |            |      |      |       | Solo sem vegetação |          |             |            |      |      |      |
|--------------------------|--------------------|----------|-------------|------------|------|------|-------|--------------------|----------|-------------|------------|------|------|------|
|                          | gs                 | $\delta$ | Areia média | Areia fina | Pt   | Ma   | Mi    | gs                 | $\delta$ | Areia média | Areia fina | Pt   | Ma   | Mi   |
| P1                       | 1,71               | 2,75     | 5           | 50         | 0,36 | 0,27 | 0,05  | 1,71               | 2,55     | 15          | 85         | 0,28 | 0,23 | 0,05 |
| P2                       | 1,63               | 2,57     | 7           | 92         | 0,36 | 0,31 | 0,05  | 1,60               | 2,62     | 18          | 80         | 0,31 | 0,25 | 0,05 |
| P3                       | 1,60               | 2,60     | 8           | 92         | 0,36 | 0,31 | 0,05  | 1,66               | 2,56     | 8           | 91         | 0,32 | 0,26 | 0,05 |
| P4                       | 1,66               | 2,67     | 23          | 76         | 0,38 | 0,32 | 0,05  | 1,60               | 2,56     | 29          | 70         | 0,32 | 0,27 | 0,05 |
| P5                       | 1,49               | 2,73     | 23          | 67         | 0,38 | 0,32 | 0,06  | 1,65               | 2,60     | 16          | 83         | 0,32 | 0,27 | 0,06 |
| P6                       | 1,70               | 2,66     | 32          | 67         | 0,39 | 0,33 | 0,06  | 1,65               | 2,50     | 38          | 62         | 0,33 | 0,27 | 0,06 |
| P7                       | -                  | -        | -           | -          | 0,39 | 0,33 | 0,06  | -                  | -        | -           | -          | 0,33 | 0,27 | 0,06 |
| P8                       | -                  | -        | -           | -          | 0,40 | 0,33 | 0,06  | -                  | -        | -           | -          | 0,33 | 0,28 | 0,06 |
| P9                       | -                  | -        | -           | -          | 0,40 | 0,34 | 0,06  | -                  | -        | -           | -          | 0,33 | 0,28 | 0,06 |
| P10                      | -                  | -        | -           | -          | 0,40 | 0,35 | 0,07  | -                  | -        | -           | -          | 0,33 | 0,28 | 0,06 |
| P11                      | -                  | -        | -           | -          | 0,43 | 0,35 | 0,08  | -                  | -        | -           | -          | 0,35 | 0,29 | 0,06 |
| P12                      | -                  | -        | -           | -          | 0,43 | 0,38 | 0,09  | -                  | -        | -           | -          | 0,36 | 0,30 | 0,07 |
| Número de dados          | 6                  | 6        | 6           | 6          | 12   | 12   | 12    | 6                  | 6        | 6           | 6          | 12   | 12   | 12   |
| Média                    | 1,63               | 2,66     | 16          | 74         | 0,39 | 0,33 | 0,06  | 1,64               | 2,57     | 21          | 79         | 0,33 | 0,27 | 0,06 |
| Desvio padrão            | 0,08               | 0,07     | 11          | 17         | 0,03 | 0,03 | 0,01  | 0,04               | 0,04     | 12          | 11         | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
| Coefficiente de variação | 4,94               | 2,72     | 68,39       | 22,45      | 6,71 | 7,95 | 19,73 | 2,50               | 1,69     | 55,18       | 14,64      | 5,62 | 6,64 | 9,51 |

**Tabela 3** – Estatísticas descritivas, valores medidos e calculados com base nas fórmulas (expressões empíricas) de condutividade hidráulica saturada (Ks) para os dois tipos de solo, com e sem cobertura vegetal, na camada de 0-0,15 m.

|                              |                | Ks       | LogKs    | Beyer    | Hazen (original) | Hazen (modificado) | Kozeny-Carman |
|------------------------------|----------------|----------|----------|----------|------------------|--------------------|---------------|
| P1                           | Solo com palha | 1,85E-02 | -1,73    | 1,99E-02 | 2,13E-02         | 1,90E-02           | 1,82E-02      |
| P2                           |                | 1,81E-02 | -1,74    | 2,02E-02 | 2,09E-02         | 1,92E-02           | 1,71E-02      |
| P3                           |                | 2,10E-02 | -1,68    | 2,05E-02 | 2,29E-02         | 1,95E-02           | 2,02E-02      |
| P4                           |                | 2,11E-02 | -1,68    | 2,02E-02 | 2,18E-02         | 1,93E-02           | 1,85E-02      |
| P5                           |                | 2,11E-02 | -1,68    | 1,99E-02 | 2,69E-02         | 1,91E-02           | 3,19E-02      |
| P6                           |                | 2,12E-02 | -1,67    | 1,99E-02 | 2,01E-02         | 1,92E-02           | 1,59E-02      |
| Número de dados              |                | 6        | 6        | 6        | 6                | 6                  | 6             |
| Média                        |                | 2,02E-02 | -1,70    | -        | -                | -                  | -             |
| Desvio padrão                |                | 1,46E-03 | 3,24E-02 | -        | -                | -                  | -             |
| Coefficiente de variação (%) |                | 7,26     | -1,91    | 3-11     | 3-28             | 3-9                | 2-51          |
| P7                           | Solo sem palha | 1,66E-02 | -1,78    | 2,03E-02 | 1,80E-02         | 1,94E-02           | 1,31E-02      |
| P8                           |                | 1,76E-02 | -1,76    | 2,04E-02 | 2,28E-02         | 1,95E-02           | 2,01E-02      |
| P9                           |                | 1,80E-02 | -1,75    | 2,03E-02 | 1,95E-02         | 1,93E-02           | 1,49E-02      |
| P10                          |                | 2,42E-02 | -1,62    | 2,01E-02 | 2,10E-02         | 1,93E-02           | 1,72E-02      |
| P11                          |                | 1,88E-02 | -1,73    | 2,00E-02 | 1,99E-02         | 1,90E-02           | 1,57E-02      |
| P12                          |                | 2,33E-02 | -1,63    | 2,03E-02 | 1,93E-02         | 1,98E-02           | 1,43E-02      |
| Número de dados              |                | 6        | 6        | 6        | 6                | 6                  | 6             |
| Média                        |                | 1,97E-02 | -1,71    | -        | -                | -                  | -             |
| Desvio padrão                |                | 3,19E-03 | 6,80E-02 | -        | -                | -                  | -             |
| Coefficiente de variação (%) |                | 16,17    | -3,98    | 6-23     | 6-30             | 1-20               | 15-39         |

**Figura 5** – Condutividade hidráulica saturada (Ks) e transformada (LogKs) para os dois tipos de solo, com e sem cobertura vegetal, na camada de 0-0,15 m.

De acordo com os autores,  $\alpha$  menor é indicativo de um valor de entrada de ar mais alto, ou um poro de solo contínuo menor que drena sob vácuo. Isso implica maior capacidade de retenção de água perto da saturação. Por outro lado, o parâmetro  $\psi_{res}$  aumentou com a adição de vegetação, 25% maior que o  $\psi_{res}$  do solo natural. Logo, evidencia-se que a presença de vegetação impacta os valores

de  $\alpha$  e  $\psi_{res}$ , sendo inversamente proporcionais. Já o parâmetro  $n$  se manteve praticamente uniforme. Lenhard, Parker e Mishra (1989) afirmam que o valor de  $n$  depende da combinação planta-tipo de solo em que normalmente valores baixos são indicativos de solos com poros de tamanhos variados e  $n$  maiores indicam poros mais uniformes.

### Estimativa da condutividade hidráulica saturada por equações empíricas

Nos gráficos A e B da Figura 7 são comparados os valores estimados e medidos da Ks do solo das áreas com e sem vegetação, como forma de validação das equações desenvolvidas por Rosas *et al.* (2014) com os mesmos parâmetros  $\beta$  utilizados pelos autores. Percebe-se que os dois tipos de solo, com e sem a

presença de vegetação, apresentam tendências diferentes. Na área com vegetação a tendência foi de superestimativa de valores para todas as equações, pois os pontos se localizaram todos acima da função identidade, que representa valores de  $x = y$ , ou seja, valores calculados iguais aos medidos. Já para a área sem vegetação, o resultado dos diferentes modelos não apresentou tendência, além de os pontos se encontrarem mais próximos da função identidade.

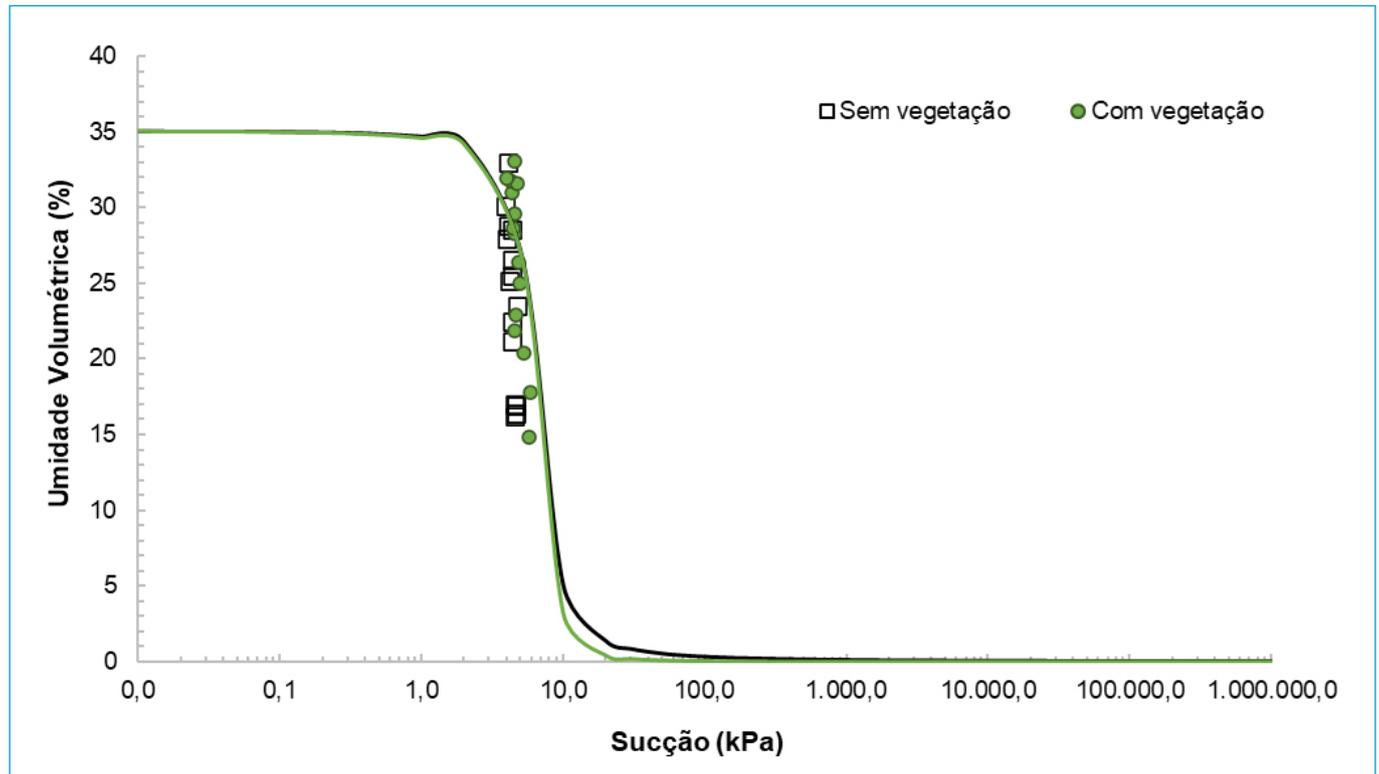


Figura 6 - Curva característica: solo com e sem vegetação

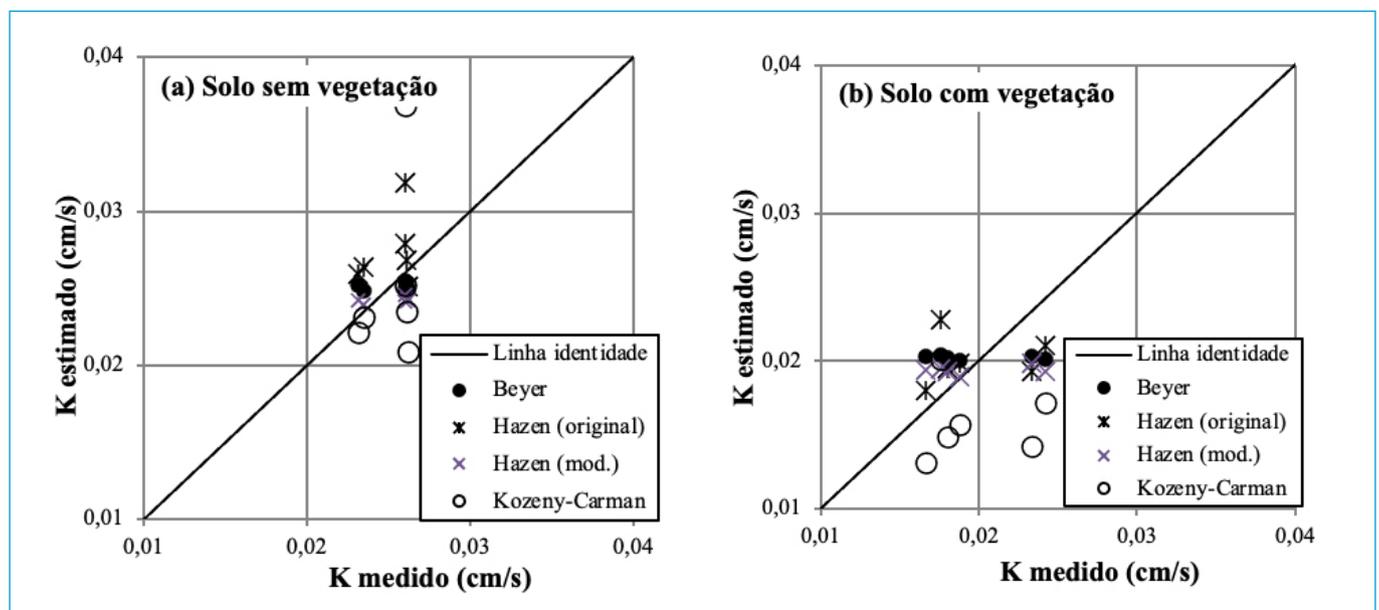


Figura 7 - Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos pelo método direto e pelo método indireto para o solo das áreas (A) com vegetação e (B) sem vegetação. A linha contínua representa relação de igualdade perfeita.

Com base nos valores de erro mínimo e máximo apresentados na Tabela 3, verifica-se que as equações empíricas que apresentaram o menor erro, ou seja, o comportamento mais semelhante entre valores modelados e medidos, foram as de Hazen (modificada) e Beyer. A fórmula de Hazen foi originalmente desenvolvida para determinação da condutividade hidráulica de areia uniformemente graduada, mas também é útil para areia fina, desde que o sedimento tenha coeficiente de uniformidade menor que 5 e tamanho de grão efetivo entre 0,1 e 3 mm. Já a fórmula desenvolvida por Beyer, apesar de não considerar a porosidade, é a mais útil para materiais mal graduados com distribuições heterogêneas, com coeficiente de uniformidade entre 1 e 20 e tamanho de grão efetivo entre 0,06 e 0,6 mm (ODONG, 2008).

## CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados de caracterização física, tem-se que ambos os solos estudados possuem características semelhantes de massa específica e granulometria, no entanto o teste de comparação de médias confirmou que o solo com vegetação possui porosidade total e macroporosidade estatisticamente maiores que o solo sem cobertura, explicado pelo fato de a revegetação introduzir raízes no solo anteriormente não vegetado, alterando assim a sua estrutura, o arranjo das partículas sólidas e a disposição dos poros do solo. A densidade real também possui valores estatisticamente diferentes para os dois tipos de solo.

Em relação aos parâmetros hidráulicos, percebeu-se que as curvas características foram semelhantes para as duas áreas e tendem a apresentar um

formato mais próximo ao unimodal, típico em solos arenosos, o que representa homogeneidade na distribuição dos poros. Evidenciou-se que a presença de vegetação faz com que o parâmetro empírico ( $\alpha$ ) e a sucção residual ( $\psi_{res}$ ) sejam inversamente proporcionais. Já o parâmetro empírico ( $n$ ) se manteve praticamente uniforme. A Ks, comparando ambos os solos, também teve resultados similares, porém os valores médios para o solo com vegetação foram maiores que os do solo sem vegetação. O fato de a amostragem ter sido feita durante o período de estiagem (julho-dezembro) pode ter relação com esse comportamento.

Entre as equações empíricas de estimativa de Ks avaliadas, os modelos de Hazen (modificado) e de Beyer foram os que mais se aproximaram dos valores medidos, porém constatou-se divergência entre os valores estimados e medidos de Ks para as duas diferentes áreas, com melhor aproximação de valores para o solo sem vegetação. Isso pode ser explicado pelos coeficientes de ajuste adotados, que foram desenvolvidos para um conjunto de materiais e condições específicas, o que limita, dessa forma, a sua utilização.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Sousa, P.K.R.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação. Farias, T.R.L.: Administração do Projeto, Supervisão, Validação, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Recursos, Redação Escrita — Revisão e Edição. Aguiar, M.F.P.: Software, Visualização, Redação Escrita — Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C.L. *Relações solo-planta-atmosfera em caatinga preservada: o caso da bacia experimental de Aiuaba*. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *ASTM D5298*: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. West Conshohocken: ASTM, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7181*: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13292*: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- BEYER, W. Zur bestimmung der wasserdurchlässigkeit von kies und sanden aus der kornverteilungskurve. *Wasserwirtschaft Wassertechnik*, v. 14, n. 6, p. 165-168, 1964.
- CARMAN, P.C. Flow of gases through porous media. Londres: Butterworths Scientific Publications, 1956.
- CARMAN, P.C. Fluid flow through granular beds. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 75, p. 150-166, 1937.
- CASTRO, C.L. *Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada*. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- CHEN, N.; WANG, X.; ZHANG, Y.; YU, K.; ZHAO, C. Ecohydrological effects of biological soil crust on the vegetation dynamics of restoration in a dryland ecosystem. *Journal of Hydrology*, v. 563, p. 1068-1077, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.076>
- CLAUDINO-SALES, V. *Cenários litorâneos-Lagoa do Papicu: natureza e ambiente na cidade de Fortaleza, CE*. 349f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- COSTA, L.; RODRIGUES, L.; FARIAS, T.; AGUIAR, M. Determinação do coeficiente de permeabilidade através de métodos indiretos em amostras de areias de duna da cidade de Fortaleza/CE. In: SIMPÓSIO DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 11., 2018, Limoeiro do Norte. *Anais...* 2018.
- DAHIYA, I.S.; RICHTER, J.; MALIK, R.S. Soil spatial variability: a review. *International Journal of Tropical Agriculture*, v. 11, n. 1, p. 1-102, 1984.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Manual de métodos de análise do solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2018.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Métodos combinados para contenção do processo erosivo eólico na Praia do Serviluz em Fortaleza, Ceará*. Plano de atividades. Brasília: Embrapa, 2006. 22 p.
- FALCÃO SOBRINHO, J. A modificação do relevo de um campo de dunas (CE). In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia, 5., 2004, Santa Maria. Santa Maria: UFSM, 2004.

- FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n. 4, p. 521-532, 1994. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- GHESTEM, M.; SIDLE, R.C.; STOKES, A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. *BioScience*, v. 61, n. 11, p. 869-879, 2011. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.11.6>
- GOLDBACH, R. *Caracterização geotécnica da areia da praia de Copacabana a partir de ensaios de campo*. 208f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- GREEN, T.; AHUJA, L.; BENJAMIN, J. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*, v. 116, n. 1-2, p. 3-27, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00091-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00091-0)
- GUIMARÃES, M. *Modelagem centrífuga da movimentação lateral de dutos em areia*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- HAZEN, A. Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. *Massachusetts State Board of Health*, v. 24, p. 539-556, 1892.
- IBM. *IBM SPSS Statistics for Windows, Versão 20.0*. Armonk, Nova York: IBM Corp., 2011.
- KOZENY, J. Das wasser im boden. Grundwasserbewegung. In: KOZENY, J. (org.). *Hydraulik*. Vienna: Springer, 1953. p. 380-445.
- KOZENY, J. *Über kapillare leitung der wasser in boden*. Viena: Royal Academy of Science, 1927. v. 136, p. 271-306.
- LENHARD, R.J.; PARKER, J.C.; MISHRA, S. On the correspondence between Brooks-Corey and van Genuchten models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 115, n. 4, p. 744-751, 1989. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(744\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(744))
- LIU, Y.; HANGYU, Y.; LI, X.; ZISHENG, X. Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in revegetated areas of the Tengger Desert, China. *Applied Soil Ecology*, v. 80, p. 6-14, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.03.015>
- MAGALHÃES, D.C. *Evolução costeira controlada por promontório no litoral de Paracuru-Ceará*. 97f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- MARINHO, F.A. Soil suction measurement in soils and porous materials. In: FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M.D. (org.). *Unsaturated soils in engineering practice: short course notes*. Denver: ASCE, 2000.
- MENDONÇA, L.A.; VÁSQUEZ, M.A.; FEITOSA, J.V.; OLIVEIRA, J.F.; FRANCA, R.M.; VÁSQUEZ, E.M.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 1, p. 89-98, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000100010>
- MIRANDA, J.P.L. *Propriedades físico-hídricas de um solo submetido a cultivos perenes e a pousio em ambiente agrícola serrano-Bom Jardim (RJ)*. 123f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- MITCHELL, A.R.; ELLSWORTH, T.R.; MEEK, B.D. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 26, n. 15-16, p. 2655-2666, 1995. <https://doi.org/10.1080/00103629509369475>
- MOREL-SEYTOUX, H.J.; MEYER, P.D.; NACHABE, M.; TOURNA, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.; LENHARD, R.J. Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soil characteristics: preserving the effective capillary drive. *Water Resources Research*, v. 32, n. 5, p. 1251-1258, 1996. <https://doi.org/10.1029/96WR00069>
- MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: KLUTE, A. (org.). *Methods of soil analysis*. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 799-823.
- NASCIMENTO, I.V.; FREIRE, A.G.; QUEIROZ, A.S.; ALENCAR, T.L.; ALVES, C.V.O. Relação do índice S com o diâmetro de poros na inflexão da curva característica de água no solo. *Caderno de Pesquisa, Ciência e Inovação*, v. 1, n. 2, p. 67-73, 2018.
- ODONG, J. Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *Journal of American Science*, v. 4, n. 1, p. 54-60, 2008.
- OLIVEIRA FILHO, W.L. *Considerações Sobre ensaios triaxiais em areias*. 266f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1987.
- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 2 jan. 2021.
- RIOS FILHO, M.G. *Comportamento de um aterro compactado em campo e laboratório*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ROSAS, J.; LOPEZ, O.; MISSIMER, T.; COULIBALY, K.; DEHWAH, A.; SESLER, K.; LUJAN, L.; MANTILLA, D. Determination of hydraulic conductivity from grain-size distribution for different depositional environments. *Groundwater*, v. 52, n. 3, p. 399-413, 2014. <https://doi.org/10.1111/gwat.12078>
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). *Biometrika*, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- WANG, J.; FRANÇOIS, B.; LAMBERT, P. Equations for hydraulic conductivity estimation from particle size distribution: A dimensional analysis. *Water Resources Research*, v. 53, n. 9, p. 8127-8134, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017WR020888>
- WANG, X.-P.; YOUNG, M.H.; YU, Z.; LI, X.R.; ZHANG, Z.S. Long-term effects of restoration on soil hydraulic properties in revegetation-stabilized desert ecosystems. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 24, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GLO31725>
- WANG, Y.; CHU, L.; DARYANTO, S.; LU, L.; ALA, M.; WANG, L. Sand dune stabilization changes the vegetation characteristics and soil seed bank and their correlations with environmental factors. *Science of the Total Environment*, v. 648, p. 500-507, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.093>
- ZHENGHU, D.; HONGLANG, X.; XINRONG, L.; ZHIBAO, D.; GANG, W. Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China. *Geomorphology*, v. 59, n. 1-4, p. 237-246, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.07.019>