



# Morphological characteristics of cracks in soil with and without vegetation cover<sup>1</sup>

## *Características morfológicas de fendas em solo sem e com cobertura vegetal*

Jacques Carvalho Ribeiro Filho<sup>1</sup>, Eunice Maia de Andrade<sup>2</sup>, Marcos Makeison Moreira de Sousa<sup>3</sup>, José Bandeira Brasil<sup>5</sup>, Helba Araújo de Quairoz Palácio<sup>6</sup>

**Abstract:** An assertive understanding of cracks in expansive soils makes their typification a challenge, especially in field conditions. Seeking to overcome such difficulty, digital images have been used to estimate the fractal geometry of surface cracks in soils with and without vegetation in a semi-arid environment. This study was carried out in a cross-section along the main course of a first-order watershed in the Centro Sul region, Ceará State (Brazil). Two treatments comprised soil with and without vegetation cover. Experimental plots were installed to represent the upper, middle, and lower parts of the watershed studied (vegetated and non-vegetated), with an area of 1 m<sup>2</sup> and spaced 2 m apart. The following morphometric characteristics of cracks were monitored and evaluated during 38 days, namely: area, weighted average between crack area and its perimeter, weighted average of the fractal dimension area of the cracks, connectivity between cracks and soil moisture. In the soil with and without vegetation, intensity of cracks in the soil had a significant correlation ( $p \leq 0.01$ ) with the perimeter, fractal area and crack connection. The intensity of cracks between covered and uncovered plots showed a significant difference ( $p \leq 0.01$ ), only in the lower part of the watershed. The middle stretch had higher sand content and differed statistically from the lower stretch for intensity of cracks in the soil. Vegetation influenced the correlation between cracks intensity and their connection, influencing their morphology in the sandy stretch.

**Key words:** Image processing. Semi-arid. Vertisol.

**Resumo:** A compreensão assertiva das fendas em solos expansivos torna sua tipificação um desafio, especialmente, em condições de campo. Buscando superar essa dificuldade, utilizou-se imagens digitais para estimar a geometria fractal de fendas superficiais em solo sem e com vegetação em ambiente semiárido. A investigação foi realizada em uma transversal ao longo do curso principal de uma microbacia de primeira ordem na região Centro Sul, Ceará. Para o estudo, definiu-se dois tratamentos: solo sem e com cobertura da vegetação. Instalou-se parcelas experimentais de modo a representar a parte alta, média e baixa da microbacia, vegetada e não vegetada, com 1 m<sup>2</sup> de área e espaçadas 2 m entre si. As seguintes características morfométricas das fendas foram monitoradas e avaliadas: área, média ponderada entre a área de fendas e o perímetro, média ponderada da área de dimensão fractal de fendas, conectividade entre fendas e umidade do solo, durante 38 dias. No solo com e sem vegetação, a intensidade de fendas no solo teve correlação significativa ( $p \leq 0,01$ ) com o perímetro, área fractal e conexão de fendas. A intensidade de fendas entre as parcelas com cobertura e sem cobertura do solo apresentou diferença significativa ( $p \leq 0,01$ ) apenas na parte baixa da microbacia. Observa-se que o trecho médio, com maior teor de areia, diferiu estatisticamente do trecho baixo para a intensidade de fendas no solo. A vegetação apresentou influência na correlação entre a intensidade de fendas e a conexão entre fendas, influenciando na morfologia no trecho mais arenoso.

**Palavras-chave:** Processamento de imagens. Semiárido. Vertissolo.

\*Corresponding author

Submitted for publication on 30/10/2022, approved on 15/11/2022 and published on 21/01/2023

<sup>1</sup>This paper was extracted from the first author's PhD dissertation, which was presented to the Graduate Program in Agricultural Engineering of the Federal University of Ceará (Brazil)

<sup>2</sup>Dr. Departamento de Engenharia Agrícola, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil. E-mail: jacquesfilho1@hotmail.com

<sup>3</sup>Ph.D. Natural Resources, Bolsista de Pesquisa CNPq. Department of Soil and Water Conservation, Federal University of the Semi-Arid Region, RN, Brazil. E-mail: eandrade@ufc.br

<sup>4</sup>MSc. Departamento de Engenharia Agrícola, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil. E-mail: makeisonmoreira14@gmail.com

<sup>5</sup>Dr. Departamento de Engenharia Agrícola, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil. E-mail: josebbrasil@gmail.com

<sup>6</sup>Dra. Department of Education, Instituto Federal do Ceará, Iguatu, CE, Brazil. E-mail: helbaraujo23@yahoo.com.br

## INTRODUCTION

Expansion and contraction are properties used to classify Vertisols (EMBRAPA, 2013). Expansive soils cover a global area of 335 Mha (UN, 2019) and more than 80 countries in semi-arid tropics, where they are common (TANG *et al.*, 2021). Regions covered with vertic soils are delimited by the annual isohyets of 500 and 1000 mm (TANG *et al.*, 2021). These soils have high fertility, becoming an important natural agricultural resource (UN, 2019). Despite contributing to food and energy production, these soils are prone to salinization due to low natural drainage.

Cracks emerging due to drying are common in 2:1 clay soils, as soil water is lost to the environment (MORRIS *et al.*, 1992; WANG *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2021). Drying cracks are formed and spread on soil surface involve a coupled factors such as unsaturated soil mechanics, atmospheric conditions, and vegetation characteristics (BORDOLOI *et al.*, 2020). In the literature, field-level studies have explored the soil drying mechanism considering the coupled effects of the soil-air-water-plant interaction (KISHNÉ *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2021; RIBEIRO FILHO *et al.*, 2022).

Studies on crack expansion and contraction in vertic soils have been performed in controlled environments and focused on quantification of a single crack geometry and morphology of crack networks (XIONG *et al.*, 2010; BORDOLOI *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2021). In addition, field-scale studies seek to understand the dynamics of cracking through visual observations on the soil surface (XIONG *et al.*, 2010; TANG *et al.*, 2021) and their interactions with the environment in natural hydrological processes (SANTOS *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018)

Most studies performed to characterize soil moisture losses have focused mainly on the mechanics of unsaturated soils (KISHNÉ *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2018; RIBEIRO FILHO *et al.*, 2022) and considered only bare soils (BORDOLOI *et al.*, 2020). Relevant information available on irregular soil crack geometry is at laboratory level with deformed soil structure (BORDOLOI *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2021).

## INTRODUÇÃO

A expansão e contração dos Vertissolos é um dos atributos para sua classificação (EMBRAPA, 2013). A área global de solos expansivos cobre 335 Mha (UN, 2019), estando presentes em mais de 80 países e nos trópicos semiáridos, onde são comuns (TANG *et al.*, 2021). As regiões com solos com horizontes vérticos se encontram entre as isoietas anuais de 500 e 1000 mm (TANG *et al.*, 2021). Esses solos apresentam elevada fertilidade, tornando-se um recurso agrícola natural importante (UN, 2019). Apesar do potencial para contribuir com a produção de alimentos e energia, tem propensão a salinização devido à baixa drenagem natural.

O surgimento de fendas por secagem é um fenômeno comum em solos com argila 2:1 em virtude da perda de água do solo para o ambiente (MORRIS *et al.*, 1992; WANG *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2021). A formação e propagação de fendas por secagem na superfície envolvem fatores acoplados, como mecânica do solo não saturado, condições atmosféricas e características da vegetação (BORDOLOI *et al.*, 2020). Na literatura, estudos a nível de campo exploraram o mecanismo de secagem do solo considerando os efeitos acoplados da interação solo-ar-água-plantas (KISHNÉ *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2021; RIBEIRO FILHO *et al.*, 2022).

A pesquisa sobre expansão e contração de fendas em solos vérticos tem se concentrado em ambientes controlados com foco na quantificação da geometria de uma única fenda e na morfologia das redes de fendas (XIONG *et al.*, 2010; BORDOLOI *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2021). Além disso, estudos em escala de campo buscam compreender a dinâmica dos fendilhamentos por meio de observações visuais na superfície do solo (XIONG *et al.*, 2010; TANG *et al.*, 2021) e suas interações com o ambiente nos processos naturais hidrológicos (SANTOS *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018)

A maioria dos estudos realizados para caracterizar o processo de perda de umidade do solo enfoca, principalmente, a perspectiva da mecânica dos solos não saturados (KISHNÉ *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2018; RIBEIRO FILHO *et al.*, 2022) e consideram apenas o solo descoberto (BORDOLOI *et al.*, 2020). As informações relevantes disponíveis sobre a geometria irregular das fendas no solo são a nível de laboratório com estrutura do solo deformada (BORDOLOI *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2021).

Understanding crack formation and expansion, as well as correlations with other Morphological characteristics under field conditions, is still a challenge to optimize soil use and management (KISHNÉ *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2021; RIBEIRO FILHO *et al.*, 2022).

The patterns, sizes, and correlations of crack irregular geometry are important to study water flows in uncovered and vegetated soils (BAER *et al.*, 2009). Drying cracks in soils often have complex network structures resulting from soil tissue response to moisture loss conditions. Quantitative characterization of crack morphology improves fundamental understanding of mechanisms underlying soil desiccation processes (TANG *et al.*, 2021) and hydrological response. Given the above, this study aimed to investigate the influence of topo sequence position and vegetation on the fractal geometry of surface cracks, extracted by image processing techniques.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The study was carried out in a first-class watershed, with an area of 2.8 ha. It is located in a seasonally dry tropical forest fragment, in regeneration for more than 10 years after its deforestation, burning and pasture planting, in 2010, in the Northeast of Brazil (Figure 1). The region's climate is classified as hot semi-arid (BSh), with a historical average rainfall of  $996.9 \pm 300.1$  mm, 89% concentrated in between December and May (CAMPOS; ANDRADE, 2021).

Average potential evapotranspiration is 2113 mm yr<sup>-1</sup>, and aridity index is 0.48 (GUERREIRO *et al.*, 2021). The relief in the watershed is smooth and wavy; the soil classified as typical carbonate ebanic Vertisol (SANTOS *et al.*, 2013), with a predominance of 2:1 clay of the montmorillonite group. Table 1 shows the physical properties of the soil in each section of the studied watershed.

Compreender os processos de formação e expansão de fendas e as correlações com outras características morfológicas em condições de campo ainda é um desafio para otimizar seu uso e manejo (KISHNÉ *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2018; TANG *et al.*, 2021; RIBEIRO FILHO *et al.*, 2022).

O conhecimento do padrão, dimensão e correlações da geometria irregular das fendas no solo é importante para estudar o fluxo de água em solos descobertos e vegetados (BAER *et al.*, 2009). As fendas de secagem em solos, geralmente, possuem estruturas de rede complexas, resultantes da resposta do tecido do solo às condições de perda de umidade. A caracterização quantitativa da morfologia das fendas melhora a compreensão fundamental do mecanismo subjacente aos processos de dessecação do solo (TANG *et al.*, 2021) e a resposta hidrológica. Diante do exposto, objetivou-se investigar a influência do topo sequência e da vegetação na geometria fractal de fendas superficiais extraídas por técnicas de processamento de imagens.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi realizado em uma microbacia de primeira ordem com área de 2,8 ha, localizada em fragmento de floresta tropical, sazonalmente seca, em regeneração há mais de 10 anos, após desmatamento, queima e plantio de pastagem, em 2010, no Nordeste do Brasil (Figura 1). O clima da região é classificado como semiárido quente (BSh), com precipitação média histórica da região de  $996,9 \pm 300,1$  mm, com 89% concentrada no período de dezembro a maio (CAMPOS; ANDRADE, 2021).

A evapotranspiração potencial média de 2113 mm ano<sup>-1</sup>, com índice de aridez de 0,48 (GUERREIRO *et al.*, 2021). O relevo da microbacia é suave ondulado; e o solo é classificado como VERTISSOLO EBÂNICO Carbonato típico (SANTOS *et al.*, 2013), com predominância de argila 2:1 do grupo da montmorilonita. As características físicas do solo de cada trecho da microbacia podem ser vistas na Tabela 1.

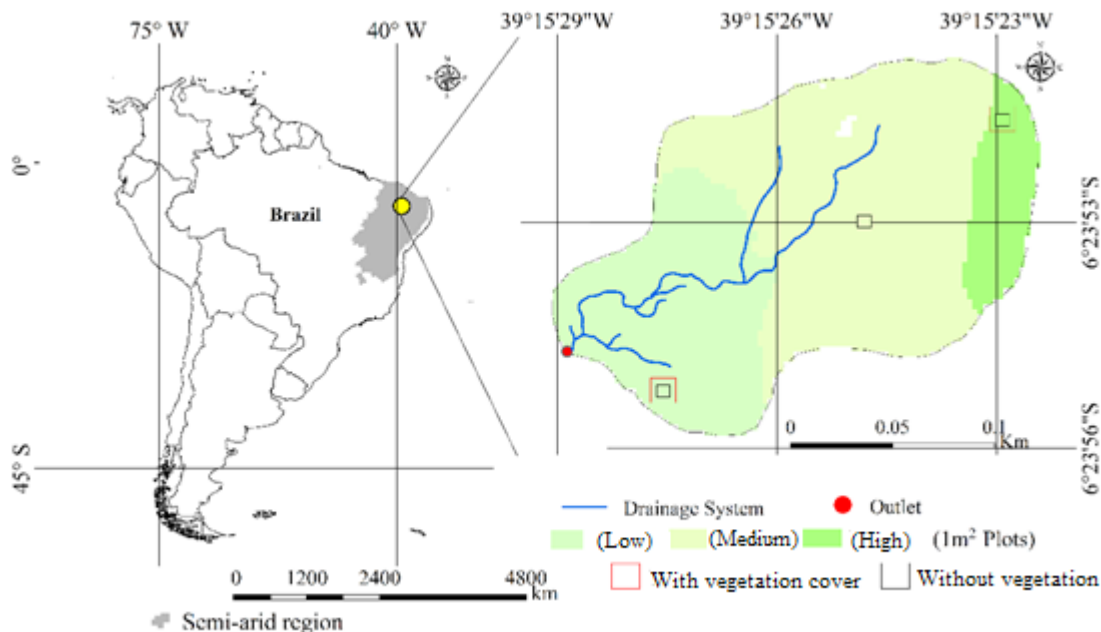


Figure 1 - Location of the study area.  
 Figura 1 - Localização da área de estudo.

Table 1 - General characteristics of soil properties in the different stretches of the watershed

Tabela 1 - Características gerais de propriedades solo nos diferentes trechos da microbacia

Soil property	Watershed stretches		
	Low	Mean	High
Sand (%)	21	41	27
Silt (%)	43	33	41
Clay (%)	36	26	32
Liquidity Limit (%)	43	42	40
Plasticity Limit (%)	14	32	26
Plasticity Index	30	10	14

The study lasted 38 days, starting on 5/17/2019, after a 42.5 mm rainfall event. On that date, all cracks sealed when surface runoff was recorded. Plots were monitored until 06/25/2019. This period was selected because it is the wet season in the region and, hence, the time with the greatest vegetation cover (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2016).

O período de estudo foi de 38 dias, iniciando no dia 17/05/2019, após um evento de chuva de 42,5 mm. Nessa data todas as fendas atingiram o selamento, quando foi registrado escoamento superficial. As parcelas foram monitoradas até o dia 25/06/2019. Esse período foi selecionado por ser o período úmido da região e, conseqüentemente, época de maior cobertura vegetal (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2016).

Six plots were delimited, in pairs, along the area, distributed in the upper, middle, and lower parts of the watershed. In each position, one plot (1 m x 1 m) remained with vegetation and another had its cover removed (two treatments). During monitoring, images were produced with a camera (Sony® - DSC-H9) of the soil plots with and without vegetation cover (Figure 2). In both plots, three simple soil samples were collected from the 0 - 0.10 m depth layer for soil moisture determination by the gravimetric method.

Na área, demarcou-se seis parcelas distribuídas na parte alta, média e baixa da microbacia, de modo pareadas. Em cada posição, uma parcela (1 m x 1 m) permaneceu com vegetação e outra teve sua cobertura retirada (dois tratamentos). Durante o monitoramento, imagens foram produzidas com câmera (Sony® - DSC-H9) nas parcelas de solo sem e com cobertura vegetal (Figura 2). Em ambas as parcelas, coletou-se três amostras simples de solo na camada 0 – 0,10 m, para determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico.

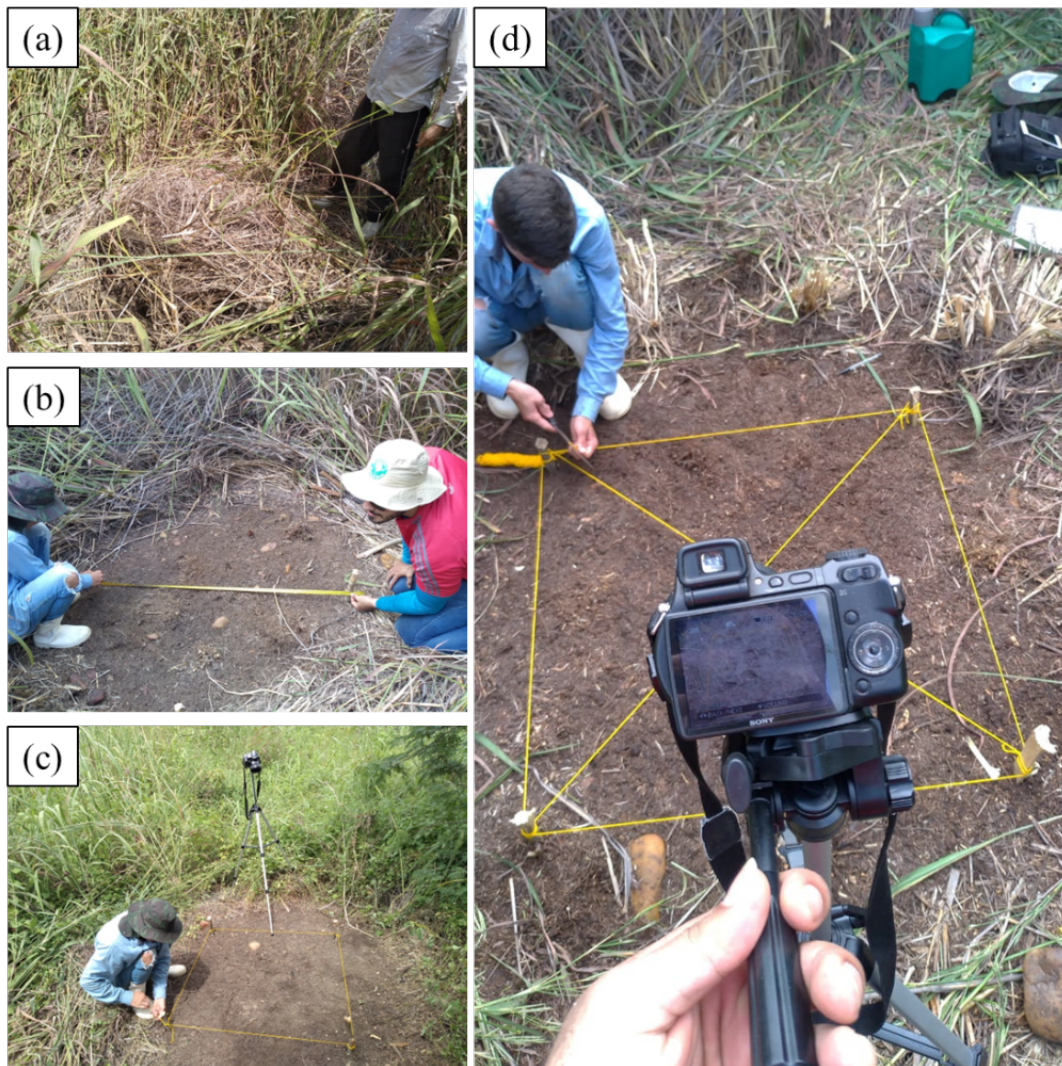


Figure 2 - (a) low vegetation cutting, (b) measurement of plot dimensions, (c) plot installation, and (d) camera positioning for image collection.

Figura 2 - (a) corte rasteiro da vegetação, (b) medição das dimensões da parcela, (c) instalação da parcela e (d) posicionamento da câmera para coleta de imagens.

To evaluate the morphology of cracks, images were recorded every four days, totaling nine images per plot and a total of 54 images (9 images x 2 treatments x 3 positions along the watershed). These images were obtained with a camera installed at a height of 1.0 m and inclination of 30° (Figure 3a) in relation to the experimental plot. All images were recorded with an identical camera setup (Sony® - DSC-H9), at fixed dimensions of 3264 x 2448 pixels and best shot function, without zoom (BAUER; STRAUSS, 2014).

Para estimar a morfologia das fendas, as imagens eram registradas a cada quatro dias, perfazendo nove imagens por parcela e um total de 54 imagens (9 imagens x 2 tratamentos x 3 posições na microbacia). Essas imagens foram obtidas com câmera instalada a 1,0 m de altura e inclinação de 30° (Figura 3a) em relação à parcela experimental. Todas as imagens foram gravadas com uma configuração de câmera idêntica (Sony® - DSC-H9), com dimensões fixas de 3264 x 2448 píxeis e com função de melhor disparo, sem zoom (BAUER; STRAUSS, 2014).

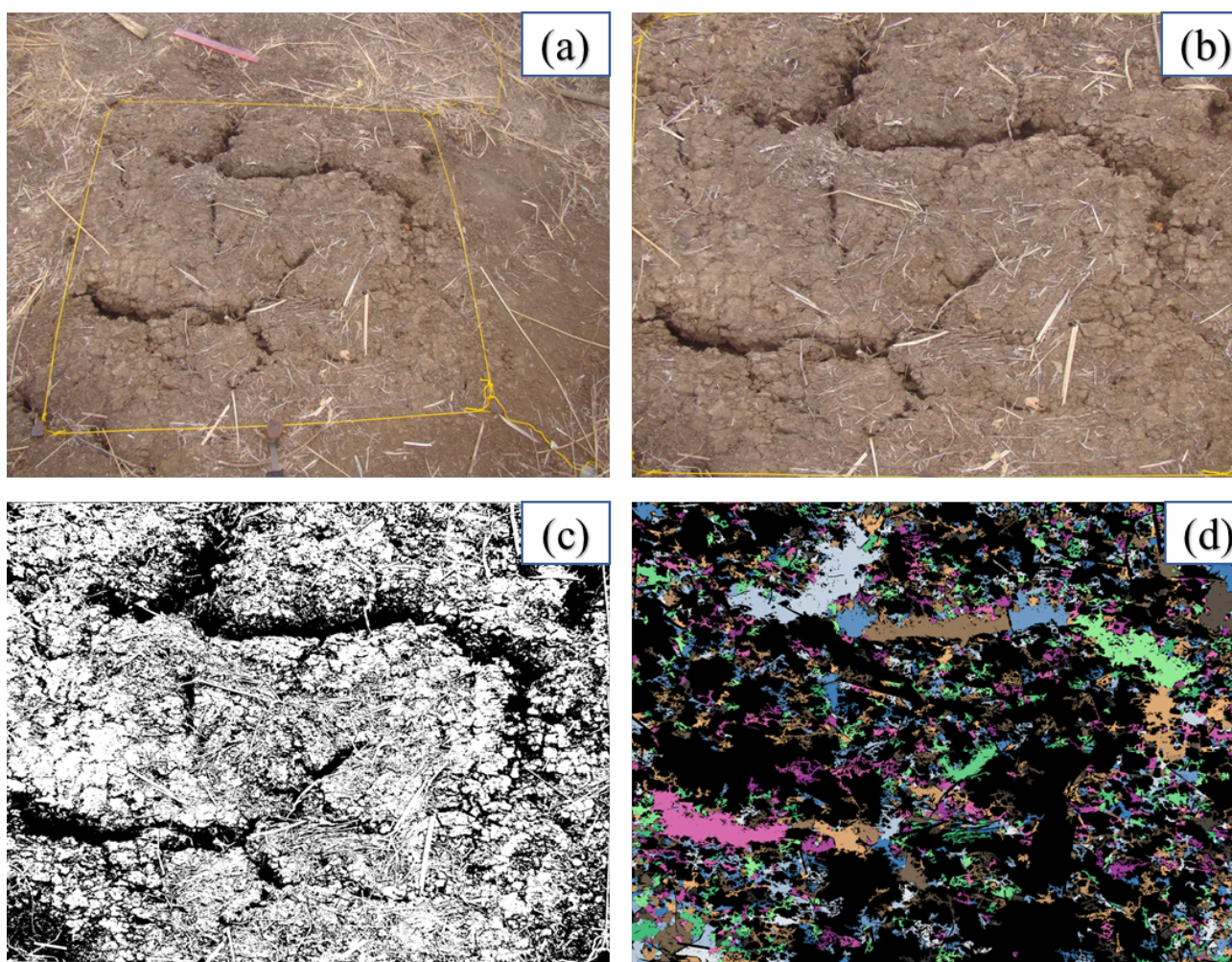


Figure 3 - (a) photograph with a 30° inclination; (b) correction in relation to the horizontal plane (c) grayscale image for crack identification, and (d) crack segmentation.

*Figura 3 - (a) Imagem fotográfica com inclinação de 30°; (b) correção em relação ao plano horizontal (c) imagem em escala cinza para identificação de fendas e (d) segmentação das fendas.*

The area captured in each image was 1 m<sup>2</sup> (1 m x 1 m), and a metric scale was used as a reference for measuring soil crack characteristics. The images were corrected for a horizontal plane (Figure 3b), using the GNU Image Manipulation Program (GIMP) software version 2.10.10 (Available at: 03/06/2019 <https://www.gimp.org/>) (GIMP, 2020). The corrected images were transformed to grayscale (Figure 3c) and segmented (Figure 3d) to analyze the following variables: number of cracks, length, width, perimeter, and area, using the Crack Image Analysis System (CIAS) software (Available at: 03/08/2019 <http://acei.cn/program/CIAS/>) (LIU *et al.*, 2013).

### Quantification of cracks in the soil

Having area and perimeter of cracks in the soil, density (D<sub>c</sub>) was quantified according to Equation 1 (KISHNÉ *et al.*, 2010).

$$Dc = \frac{a_c}{A_c} * 100$$

Wherein: a<sub>c</sub> – area of cracks (m<sup>2</sup>) and A<sub>c</sub> – total area (m<sup>2</sup>).

Thereafter, area-weighted mean ratio of soil-crack area to perimeter (AWMAPR) and area weighted mean of crack fractal dimension (AWMFRAC) were determined as in Equations 2 and 3 (XIONG *et al.*, 2018). Morphological connectivity of the cracks (r) was estimated by Equation 4 (XIONG *et al.*, 2010).

$$AWMAPR = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{a_{cij}}{P_{cij}} \right) \left( \frac{a_{cij}}{A_c} \right) \right] \quad \text{Equation 2}$$

Wherein: a<sub>c</sub> – area of cracks (m<sup>2</sup>); P – soil crack perimeter (m), and A<sub>c</sub> – total area (m<sup>2</sup>).

$$AWMFRAC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ \frac{2 \ln(0,25 P_{cij})}{\ln(a_{cij})} \left( \frac{a_{cij}}{A_c} \right) \right] / N \quad \text{Equation 3}$$

Wherein: a<sub>c</sub> – area of cracks (m<sup>2</sup>); P – soil crack perimeter (m), A<sub>c</sub> – total area (m<sup>2</sup>), and N – total number of cracks.

$$r = \frac{L}{L_{max}} = \frac{L}{3(V-2)}$$

Wherein: L is the number of connected cracks; V is the number of crack vertices; L<sub>max</sub> is the maximum potential number of cracks connected. The index r ranges from 0 to 1. The higher its value, the greater the connectivity between cracks.

A área capturada em cada imagem foi de 1 m<sup>2</sup> (1 m x 1 m) e uma escala métrica foi utilizada como referência para medição das características das fendas do solo. As imagens foram corrigidas para um plano horizontal (Figura 3b), usando o *software GNU Image Manipulation Program (GIMP)* versão 2.10.10 (Disponível em: 06/03/2019 <https://www.gimp.org/>) (GIMP, 2020). Nas imagens corrigidas foram transformadas em escala cinza (Figura 3c) e segmentadas (Figura 3d) para analisar as seguintes variáveis: número de fendas, comprimento, largura, perímetro e área, usando o *software Crack Image Analysis System (CIAS)* (Disponível em: 08/03/2019 <http://acei.cn/program/CIAS/>) (LIU *et al.*, 2013).

### Quantificação de fendas no solo

De posse dos valores de área e perímetro de fendas no solo, quantificou-se a densidade de fendas no solo (D<sub>c</sub>), conforme a Equação 1 (KISHNÉ *et al.*, 2010).

Equation 1

Em que: a<sub>c</sub> – área de fendas (m<sup>2</sup>) e A<sub>c</sub> – área total (m<sup>2</sup>).

Posteriormente, determinou-se a razão entre a média ponderada da área de fendas e o perímetro (AWMAPR), e a razão entre a média ponderada da área de dimensão fractal de fendas e o perímetro (AWMFRAC) empregando-se as Equações 2 e 3 (XIONG *et al.*, 2018). A conectividade morfológica das fendas (r) foi estimada pela Equação 4 (XIONG *et al.*, 2010).

Em que: a<sub>c</sub> – área de fendas (m<sup>2</sup>); P – perímetro de fenda no solo (m) e A<sub>c</sub> – área total (m<sup>2</sup>).

Em que: a<sub>c</sub> – área de fendas (m<sup>2</sup>); P – perímetro de fenda no solo (m); A<sub>c</sub> – área total (m<sup>2</sup>) e N – número total de fendas.

Equation 4

Em que: L - número de fendas conectadas; V é o número de vértice de fendas; L<sub>max</sub> é o número máximo de fendas conectadas possíveis. O índice r varia entre 0 e 1. Quanto maior for o seu valor maior será a conectividade do fendas.

Data underwent descriptive statistics followed by the Kolmogorov-Smirnov normality testing. As data showed no normality, the effect of vegetation on the parameters of cracks and stretches in the watershed were investigated, using regression analysis and the non-parametric Mann-Whitney test at 1% probability

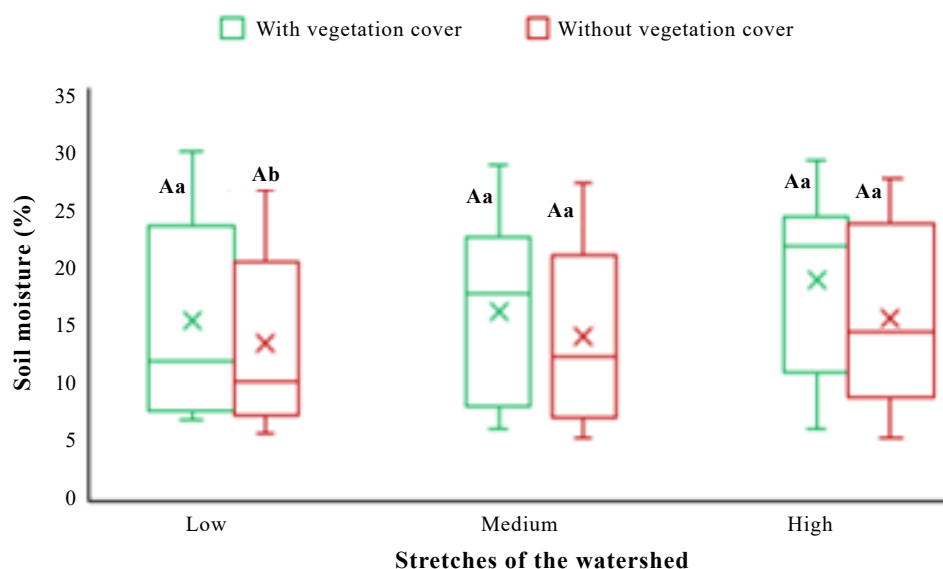
Realizou-se a estatística descritiva dos dados seguida pela aplicação do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov. Como o conjunto de dados não apresentou normalidade, o efeito da vegetação nos parâmetros de fendas e os trechos da microbacia foram investigados por meio de análise de regressão e teste não paramétrico de Mann-Whitney ao nível de 1% de probabilidade.

## RESULTS AND DISCUSSION

Treatments did not differ significantly for soil moisture ( $p > 0.05$ ) among the watershed stretches evaluated (Figure 4). As for the cover effect, soil moisture showed a significant difference ( $p > 0.01$ ) in the lower part of the watershed. Undergrowth vegetation cover (Figure 2a) increased soil surface roughness (AQUINO *et al.*, 2017), reducing runoff water speed and thus increasing the time for water to infiltrate the soil (FRY; GUBER, 2020; SOUSA *et al.*, 2022). The greater moisture variability between treatments in the lower part of the watershed may be due to higher plasticity index and clay content in this portion of the terrain (Table 1).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os tratamentos não afetaram a umidade do solo ( $p > 0,05$ ) em relação aos trechos da microbacia (Figura 4), nos tratamentos. Com relação ao efeito cobertura, observa-se que na parte baixa da bacia ocorreu diferença significativa ( $p > 0,01$ ) da umidade do solo. A cobertura vegetal rasteira (Figura 2a) promoveu maior rugosidade à superfície do solo (AQUINO *et al.*, 2017), reduzindo a velocidade do fluxo de água, ampliando, assim, o tempo de oportunidade para a infiltração da água no solo (FRY; GUBER, 2020; SOUSA *et al.*, 2022). É possível que a maior variabilidade da umidade entre tratamentos, na parte baixa da microbacia, seja decorrente do maior índice de plasticidade e maior teor de argila nessa parcela (Tabela 1).



**Figure 4** - Soil moisture variation among the low, medium, and high stretches of the studied watershed on soils with and without vegetation cover.

\* Equal capital letters do not differ among the stretches of the watershed ( $p \leq 0.01$  - Mann-Whitney); Equal lowercase letters do not differ between the plots within the same stretch ( $p \leq 0.01$  - Mann-Whitney).

**Figura 4** - Variação da umidade do solo nos trechos baixo, médio e alto da microbacia em solo sem e com cobertura vegetal.

\*letras maiúsculas iguais, não diferem entre trechos da microbacia ( $p \leq 0,01$  - Mann-Whitney); letras minúsculas iguais não diferem entre parcelas no mesmo trecho ( $p \leq 0,01$  - Mann-Whitney).

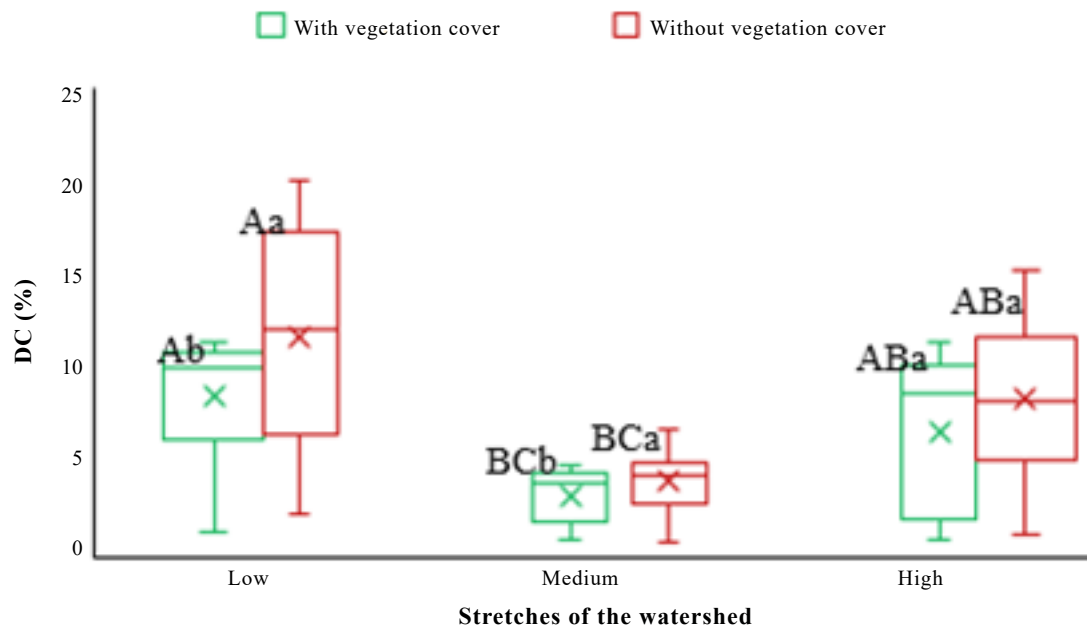


Soil crack densities (Dc) were significantly different ( $p \leq 0.01$ ) between uncovered and covered soils in the lower and middle stretches of the watershed (Figure 5). It was higher in soils without vegetation cover. Similarly, Bordoloi *et al.* (2020) showed Dc reductions in plastic soils with vegetation cover. In our study, lower Dc values occurred in the middle section of the watershed (Figure 5) and were statistically different ( $p \leq 0.01$ ) from those in the lower section, which were higher. Such an increased density is explained by higher clay contents and soil plasticity index in the lower stretch of the watershed (Table 1).

The highest clay content and plasticity limit directly influenced the expansion and contraction of the uncovered soil in the lower stretch (Figure 5). Soil in the middle stretch had a higher sand content, which reduced propagation of cracks (Table 1). Ribeiro Filho *et al.* (2022) evaluated Dc changes by climatic factors and observed that clay contents below 30% reduce crack formation in the soil, thus influencing Dc directly. Differences in Dc among the stretches in the watershed highlight that soil properties outbalance vegetation cover effect on crack propagation (WANG *et al.*, 2018).

A densidade de fendas no solo (Dc) apresentou diferença significativa ( $p \leq 0,01$ ) entre solo sem e com cobertura nos trechos baixo e médio da microbacia (Figura 5), havendo maior densidade de fendas no solo sem vegetação. Estudos realizados por Bordoloi *et al.* (2020) evidenciaram redução do Dc em solos com vegetação para solos plásticos. Os menores valores da densidade de fendas no solo (Dc) ocorreram no trecho médio da microbacia (Figura 5), diferindo estatisticamente ( $p \leq 0,01$ ) do trecho baixo que tem maior intensidade de fendas. A maior Dc ocorrida no trecho baixo da microbacia se explica pelo maior teor de argila e índice de plasticidade do solo (Tabela 1).

Os maiores teores de argila e de limite de plasticidade influenciaram diretamente no processo de expansão e contração do solo sem cobertura vegetal no trecho baixo (Figura 5). O trecho médio apresenta maior teor de areia no solo, reduzindo a propagação de fendas (Tabela 1). Ribeiro Filho *et al.* (2022), modelando o Dc por fatores climáticos, observaram que presença de teor de argila menor que 30% reduz a formação de fendas no solo, influenciando diretamente no Dc. A diferença das Dc entre trechos da microbacia evidencia que as características do solo são preponderantes em relação ao efeito da vegetação na propagação de fendas no solo (WANG *et al.*, 2018).



**Figure 5** - Soil crack density variation among the low, medium, and high stretches of the studied watershed on soils with and without vegetation cover.

\* Equal capital letters do not differ among the stretches of the watershed ( $p \leq 0.01$  - Mann-Whitney); equal lowercase letters do not differ between plots in the same stretch ( $p \leq 0.01$  - Mann-Whitney).

**Figura 5** - Variação da densidade de fendas em solo sem e com cobertura vegetal, nos trechos baixo, médio e alto da microbacia.

\*Letras maiúsculas iguais, não difere entre trechos da microbacia ( $p \leq 0,01$  - Mann-Whitney); letras minúsculas iguais não difere entre parcelas no mesmo trecho ( $p \leq 0,01$  - Mann-Whitney).

In the lower stretch (Figures 6), where the highest clay and silt levels, as well as plasticity index, are found (Table 1), soil cover proved to be determinant for the relationships of Dc with AWMARP and r. In this sense, we identified that AWMARP and r were highly sensitive to small Dc variations. As for the areas with lower clay content and plasticity index, vegetation cover had no effect on the response of the investigated relationships (Figures 6).

Na parte baixa da microbacia (Figuras 6), onde se encontra os maiores teores de argila, argila e silte e índice de plasticidade (Tabela 1), a cobertura do solo se mostrou determinante na relação entre Dc e AWMARP e Dc e r. Identifica-se maior sensibilidade da AWMARP e r a pequenas variações do Dc. Já para as áreas com menor teor de argila e índice de plasticidade não se observa efeito da cobertura vegetal na resposta das relações investigadas (Figuras 6).

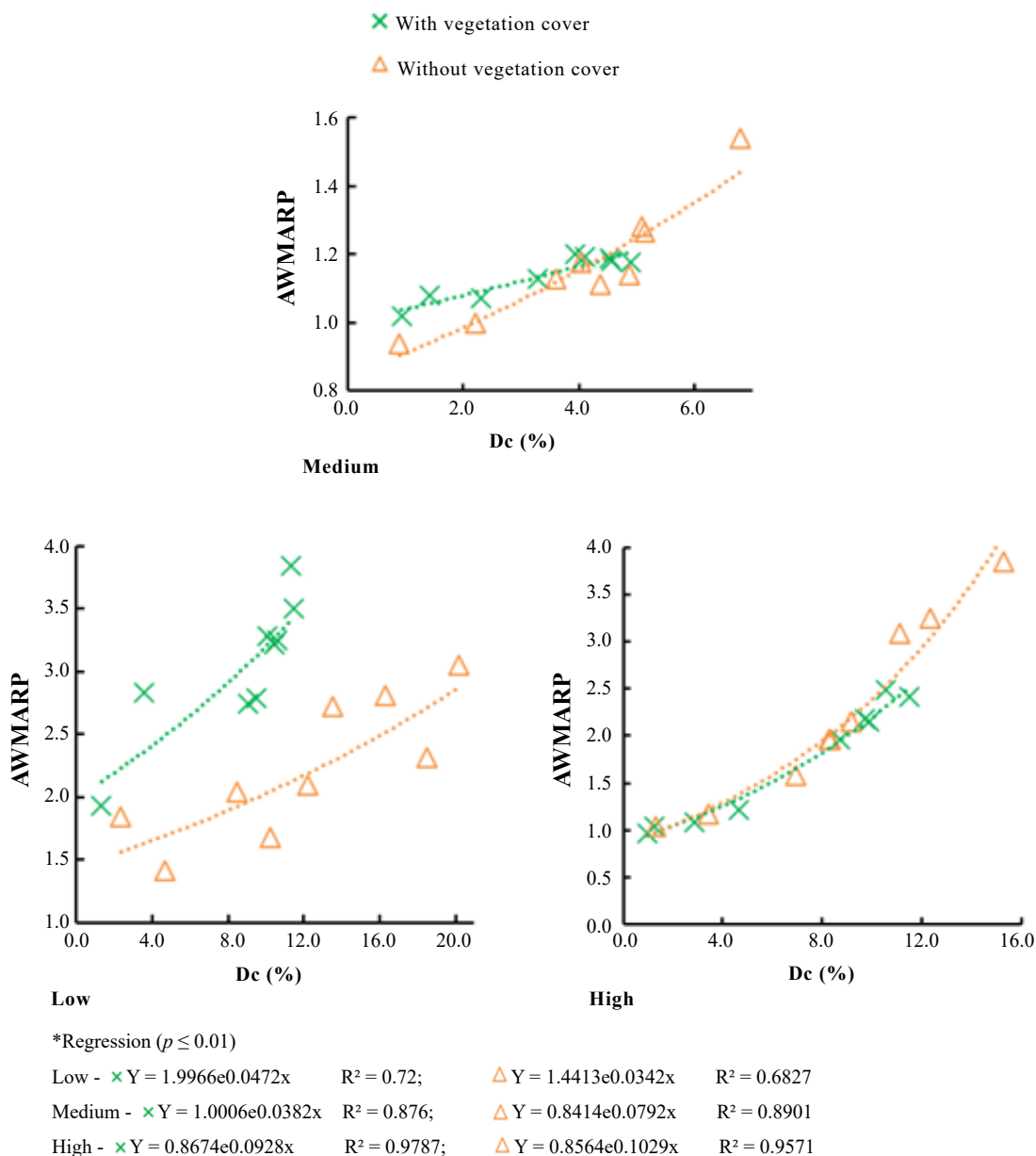


Figure 6 - Regression model of cracks in soil with and without vegetation cover between Dc and AWMARP.

Figura 6 - Modelo de regressão de fendas em solo sem e com cobertura vegetal entre Dc e AWMARP.

Dc showed positive and significant correlations ( $p \leq 0.01$ ) with the area-weighted mean ratio of soil-crack area to perimeter (AWMARP) and with the morphological connectivity of cracks ( $r$ ) in the two soil conditions, except for the middle stretch of the watershed (Figures 6 and 7).

The correlation between Dc and the area weighted mean of crack fractal dimension (AWMFRAC) was inverse and significant ( $p \leq 0.01$ ) in all stretches of the watershed and both soil cover conditions (Figure 8).

A Dc apresentou correlações positivas e significativas ( $p \leq 0,01$ ) com a média ponderada, entre a área de fendas e o perímetro (AWMARP) e a conectividade morfológica das fendas ( $r$ ) nas duas condições do solo, exceto trecho médio (Figuras 6 e 7).

A correlação entre Dc e média ponderada da área de dimensão fractal de fendas (AWMFRAC) foi inversa e significativa ( $p \leq 0,01$ ) nos trechos da microbacia e nas duas condições do solo (Figura 8).

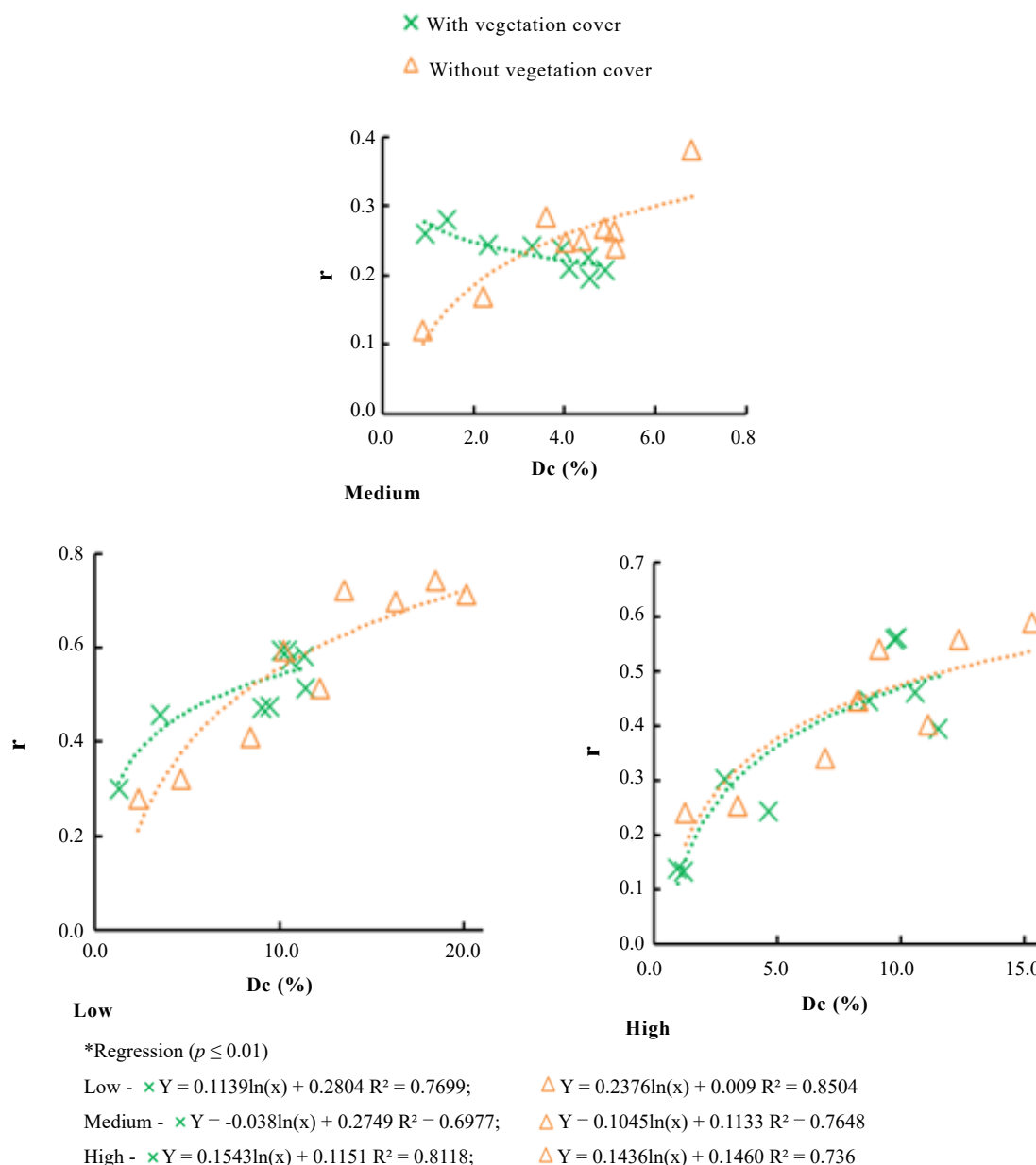
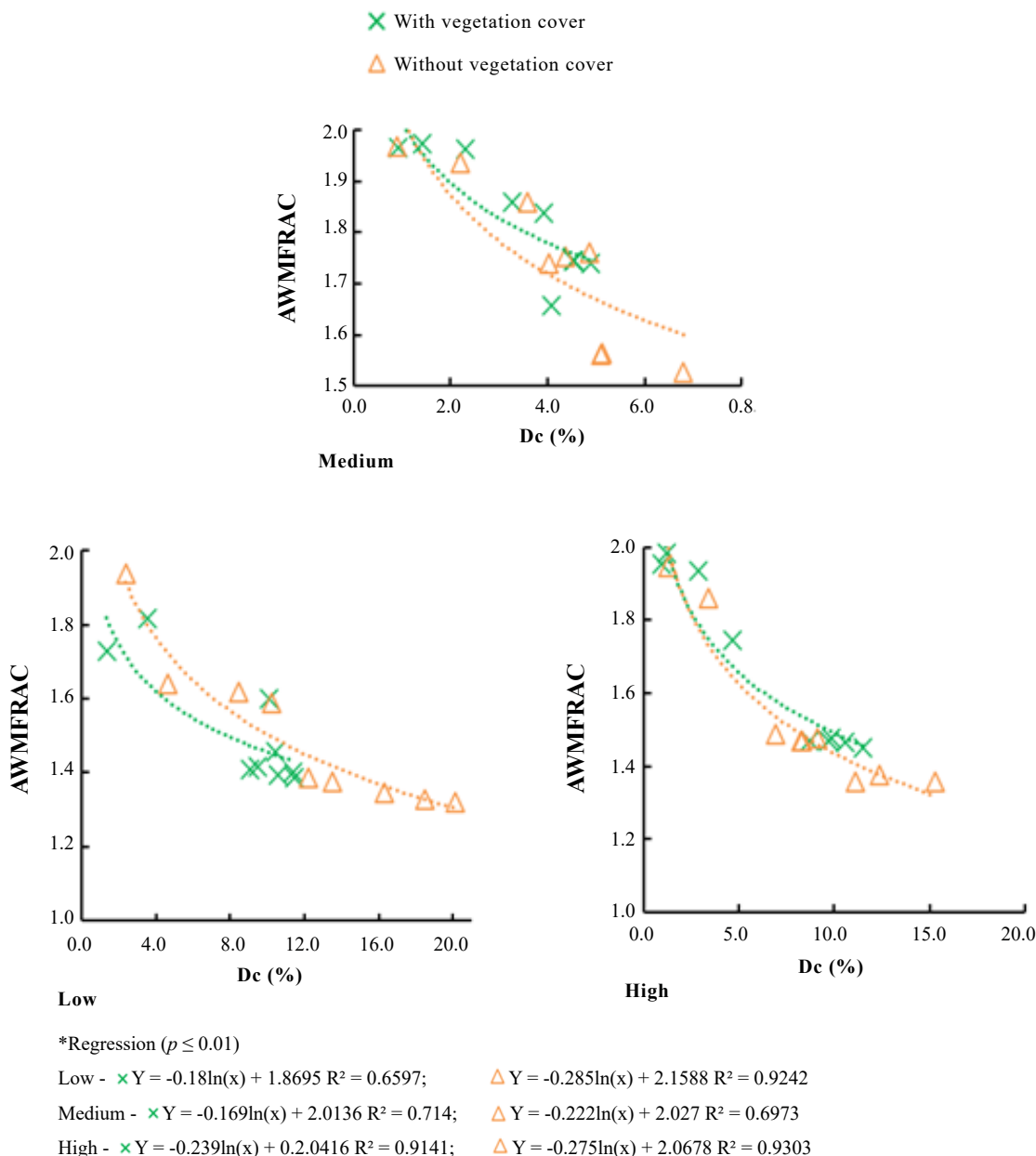


Figure 7 - Regression model of cracks in soil with and without vegetation cover between Dc x r.

Figura 7 - Modelo de regressão de fendas em solo sem e com cobertura vegetal entre Dc x r.



**Figure 8** - Regression model of cracks in soil with and without vegetation cover between Dc and AWMFRAC.

**Figura 8** - Modelo de regressão de fendas em solo sem e com cobertura vegetal entre Dc e AWMFRAC.

The relationships above show that the appearance of cracks in the soil, originally intact, forms polygons that decrease the driving force of cracks (XIONG *et al.*, 2010; SHIT *et al.*, 2015). This lower resistance resulting from traction on a single clod overcomes the root penetration force and interrupts the emergence of new cracks and new clods (BORDOLOI; NI; NG. 2020).

Tais relações evidenciam que o surgimento de fendas no solo, originalmente intacto, geram a formação de polígonos que diminui a força motriz da fenda (XIONG *et al.*, 2010; SHIT *et al.*, 2015). Essa menor resistência decorrente da tração em um único torrão supera a força de penetração da raiz e interrompe a geração de novas fendas e novos torrões (BORDOLOI; NI; NG. 2020).

As crack density increases, crack shapes change and  $D_c$  and AWMARP correlation disperse (Figure 6), altering morphological connectivity between cracks ( $r$ ) (Figure 7) and reducing fractal area (Figure 8). Thereby, fine cracks appear that increase connectivity between cracks from weak development to extremely intense development (XIONG *et al.*, 2010). We also observed that, in the middle section, connectivity between cracks ( $r$ ) (Figure 7) had a negative correlation with soil with vegetation cover, which was associated with its higher sand content and lower  $D_c$  values.

## CONCLUSIONS

Soil vegetation cover affects only the connection between cracks ( $r$ ) in all stretches of the watershed evaluated;

The mechanical behavior of cracked soil is different among the stretches of the watershed, with less cracks for the medium stretch with higher sand content;

In the soil with vegetation cover and in the lower part of the watershed, higher clay contents increase soil sensitivity for the relationship crack density and AWMARP ratio.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (CAPES), and the Ceará State Foundation of Support for Scientific and Technological Development (FUNCAP) for their financial support of this research.

Com o aumento da densidade de fendas, ocorre modificação de forma e maior dispersão na correlação de  $D_c$  e AWMARP (Figura 6), modificando a conectividade morfológica das fendas ( $r$ ) (Figura 7) e reduzindo a área fractal (Figura 8). Com isto, ocorre o surgimento de fendas finas que aumentam a conectividade entre fendas desenvolvimento fraco para desenvolvimento extremamente intenso (XIONG *et al.*, 2010). Observa-se ainda que para o trecho médio a conectividade entre fendas ( $r$ ) (Figura 7) há correlação negativa para o solo com cobertura vegetal, associada a maior teor de areia e menores valores de  $D_c$ .

## CONCLUSÕES

A cobertura vegetal do solo afeta, apenas, conexão entre fendas ( $r$ ) em todos os trechos da microbacia;

O comportamento mecânico do solo fendilhado ocorreu de forma diferente entre os trechos da microbacia, com menor intensidade de fendas para o trecho intermediário com maior teor de areia;

No solo com cobertura vegetal e no trecho baixo da bacia o maior teor de argila, promoveu uma maior sensibilidade do solo na relação densidade de fendas x AWMARP.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e à Fundação de Amparo ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Ceará (FUNCAP) pelo seu apoio financeiro a esta pesquisa.

## CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- AQUINO, D. N.; ANDRADE, E. M.; ALMEIDA CASTANHO, A. D.; JÚNIOR, L. R. P.; PALÁCIO, H. A. Q. Belowground carbon and nitrogen on a thinned and un-thinned seasonally dry tropical forest. **American Journal of Plant Sciences**, v. 8, n. 09, p. 2083, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89140>
- BAER, J. U.; KENT, T. F.; ANDERSON, S. H. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks. **Geoderma**, v. 154, n. 1-2, p. 153-163, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.008>
- BAUER, T.; STRAUSS, P. A rule-based image analysis approach for calculating residues and vegetation cover under field conditions. **Catena**, v. 113, p. 363-369, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.022>
- BORDOLOI, S.; JUNJUN N. I.; CHARLES WANG WAI N. G. Soil desiccation cracking and its characterization in vegetated soil: A perspective review. **Science of the Total Environment**, v. 729, p. 138-760, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138760>
- CAMPOS, D. A.; DE ANDRADE, E. M. Tendência sazonal de variáveis climáticas em uma área do domínio fitogeográfico da Caatinga. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 15, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v15i0.6833>
- FRY, J. E.; GUBER, A. K. Temporal stability of field-scale patterns in soil water content across topographically diverse agricultural landscapes. **Journal of Hydrology**, v. 580, p. 124-260, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124260>
- GUERREIRO, M. S.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; FILHO, J. C. R. Enhancing Ecosystem Services to Minimize Impact of Climate Variability in a Dry Tropical Forest with Vertisols. **Hydrology**, v. 8, n. 1, p. 46, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8010046>
- KISHNÉ, A. S.; MORGAN, C. L.; GE, Y.; MILLER, W. L. Antecedent soil moisture affecting surface cracking of a Vertisol in field conditions. **Geoderma**, v. 157, n. 3-4, p. 109-117, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.03.020>
- LIU, C.; TANG, C. S.; SHI, B.; SUO, W. B. Automatic quantification of crack patterns by image processing. **Computers & Geosciences**, v. 57, p. 77-80, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.008>
- MORRIS, P. H.; GRAHAM, J.; WILLIAMS, D. J. Cracking in drying soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 29, n. 2, p. 263-277, 1992. DOI: <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/t92-030>
- RIBEIRO FILHO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; BRASIL, J. B.; ARAUJO NETO, J. R. Produtividade de fitomassa herbácea em diferentes manejos no semiárido cearense. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 9, n. 4, p. 386-396, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i4.3037>
- RIBEIRO FILHO, J. C.; ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. S.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B. Climate Data to Predict Geometry of Cracks in Expansive Soils in a Tropical Semiarid Region. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 675, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020675>
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA SOLOS 2013. 353 p.
- SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; MEDEIROS, P. H. A.; QUEIROZ PALÁCIO, H. A.; ARAÚJO NETO, J. R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 551, n. 1-4, p. 1-10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.016>

SHIT, P. K.; BHUNIA, G. S.; MAITI, R. Soil crack morphology analysis using image processing techniques. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 1, n. 4, p. 1-7, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0036-z>

SOUSA, M. M. M.; ANDRADE, E. M. D.; PALÁCIO, H. A. D. Q.; MEDEIROS, P. H. A.; RIBEIRO FILHO, J. C. Spatial-temporal soil-water content dynamics in toposequences with different plant cover in a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. 1-11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220010>

TANG, C. S.; ZHU, C.; CHENG, Q.; ZENG, H.; XU, J. J.; TIAN, B. G.; SHI, B. Desiccation cracking of soils: A review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors. **Earth-Science Reviews**, v. 216, p. 103586, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103586>

UN. 2010–2020: UN Decade for Deserts and the Fight Against Desertification 2019. [WWW Document]. Available online: [https://www.un.org/en/events/desertification\\_decade/whynow.shtml](https://www.un.org/en/events/desertification_decade/whynow.shtml) (accessed on 16 September 2021)

WANG, C.; ZHANG, Z. Y.; QI, W.; FAN, S. M. Morphological approach to quantifying soil cracks: Application to dynamic crack patterns during wetting-drying cycles. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n.4, p. 757-771, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0088>

XIONG, D.; LU, X.; XIAN, J.; ZHOU, H.; YANG, Z. Selection of judging indicators for surface morphology of soil crack under different development degrees in Yuanmou Arid-hot Valley Region. **Wuhan University Journal of Natural Sciences**, v. 13, n. 3, p. 363-368, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11859-008-0317-8>

XIONG, D.; YAN, D.; LONG, Y.; LU, X.; HAN, J.; HAN, X.; SHI, L. Simulation of morphological development of soil cracks in Yuanmou Dry-hot Valley region, Southwest China. **Chinese Geographical Science**, v. 20, n. 2, p. 112-122, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0112-2>