



**MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEIEIRO**

**MICROMORPHOLOGY AND X-RAY CTSCAN: GIBBSITIC Oxisol POROSITY UNDER COFFEE MULTI-PRACTICE MANAGEMENT SYSTEM**

**MICROMORFOLOGÍA Y TOMOGRAFÍA DE RAYOS-X: POROSIDAD DEL LATOSOL GIBBSITICO BAJO UN SISTEMA DE MANEJO DE CAFÉ DE MÚLTIPLES PRÁCTICAS**

Carla Eloize Carducci<sup>1</sup>, Leandro Campos Pinto<sup>2</sup>, Samara Martins Barbosa<sup>3</sup>, Joyce Cristina Costa<sup>4</sup>, Yuri Lopes Zinn<sup>5</sup>, Richard John Heck<sup>6</sup>

e361520

<https://doi.org/10.47820/recima21.v3i6.1520>

PUBLICADO: 06/2022

**RESUMO**

Nosso objetivo foi avaliar a morfologia dos poros de um Latossolo gibbsítico submetido ao sistema multi-práticas de manejo cafeeiro com diferentes doses de gesso via análises de imagens 2 e 3 D. O delineamento foi em blocos ao acaso com três tratamentos: G0-ausência de gesso adicional; G7 e G28, com 7 e 28 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso adicional, respectivamente, aplicados na superfície do solo na linha de plantio, em três camadas: 0,20-0,34 m; 0,80-0,94m e 1,50-1,64 m. Amostras de solo com estrutura preservada em tubos de acrílico foram coletadas na linha de plantio, em três repetições. Utilizou-se análises de imagem obtidas via tomografia computada de raios-X e micromorfologia via seções delgadas. Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva. A microestrutura típica do Latossolo permaneceu granular, coerente à predominância da gibbsita na fração argila. Na micromorfologia qualificou-se uma grande quantidade de poros tipo empacotamento (70%) e cavidades (10%); mudança na trama de porfírica para enáulica, conforme o incremento em gesso. Nas imagens tomográficas de raios-X detectou-se maior diversificação morfológica dos poros, especialmente no G28, com predomínio de poros laminares (12%), bioporos tubulares (12%) e de empacotamento/empilhamento (64%), bem como, contabilizou-se maior número (n>30.000) e categorias de poros devido ao maior detalhamento da técnica, a exemplo dos bioporos tubulares (G28>G7=G0) e poros laminares (G28>G7=G0). As técnicas se complementam, ou seja, a micromorfologia permitiu avaliar a organização estrutural com qualidade e a tomografia de raio-X com quantidade de poros devido à maior resolução espacial e aos algoritmos de cálculo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bioporos. Conservação do Solo. Gesso Agrícola.

**ABSTRACT**

*Our aim was to evaluate the pore morphology of an Oxisol subjected to coffee multi-practice management system with different doses of gypsum by analysis of 2 and 3 D. The design was in randomized blocks with three treatments: G0-absence of gypsum; G7 and G28, with 7 and 28 Mg ha<sup>-1</sup> of additional gypsum, respectively, applied to the soil surface in the planting row, in three layers: 0.20-0.34 m; 0.80-0.94m and 1.50-1.64m. Undisturbed soil samples were collected in acrylic tubes in the planting row, in three replications. Image analyzes obtained via X-ray computed tomography and micromorphology in thin sections were used. Data were subjected to descriptive statistical analysis. The typical Oxisol microstructure remained granular, consistent with the predominance of gibbsite in the clay*

<sup>1</sup> Eng. Agrônoma, Dsc. Ciência do Solo, Professora Adjunta UFGD

<sup>2</sup> Eng. Agrícola, Dr. em Recursos Hídricos, Professor Visitante na Universidade Federal de Lavras.

<sup>3</sup> Eng. Agrônoma, Dra. Ciência do Solo, Professora Visitante UFLA

<sup>4</sup> Eng. Agrônoma, Mestre em Cafeicultura, Pesquisadora responsável pelo Centro de Pesquisa Agropecuária Piumhi- CPAP

<sup>5</sup> Eng. florestal, PhD Soil Science, Professor Adjunto UFLA

<sup>6</sup> Agronomist, PhD. Soil Science, Professor in University of Guelph, ON, CA



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa,  
Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

*fraction. In the micromorphology, there was a large amount of packing-type pores (70%) and cavities (10%) and a change in the weft, from porphyric to enaulic, according to the increase in gypsum. In the X-ray tomographic images, greater morphological diversification of the pores was detected, especially in G28, with a predominance of platy pores (Triaxial, 12%), channels or biopore (Prolate, 12%) and packing/stacking voids (64%), as well as accounting for them a greater number ( $n > 30,000$ ) and categories of pores were obtained due to the greater detail of the technique, such as biopores ( $G28 > G7 = G0$ ) and platy pores ( $G28 > G7 = G0$ ). The techniques complement each other, the micromorphology allowed to evaluate the structural organization with quality and the X-ray tomography quantified more pores due to the higher spatial resolution and the algorithms.*

**KEYWORDS:** Agricultural Gypsum. Biopore. Soil Conservation.

### RESUMEN

*Nuestro objetivo fue evaluar la morfología de los poros del Latosol sometido a un sistema de manejo de café multiprática con diferentes dosis de yeso a través del análisis de imágenes. El diseño fue en bloques con tres tratamientos: G0-ausencia de yeso; G7 y G28, con 7 y 28 Mg ha<sup>-1</sup> de yeso adicional, respectivamente, aplicados en la superficie del suelo en la línea de siembra, en tres capas: 0,20-0,34; 0,80-0,94 y 1,50-1,64m. Muestras de suelo con estructura preservada en tubos acrílicos se recogieron sólo en la línea, en tres repeticiones. Fue hecho análisis de imágenes obtenidas mediante tomografía computada de rayos-X y micromorfología en secciones delgadas. La microestructura típica de Latosol permaneció granular, con el predominio de gibbsita en la arcilla. En la micromorfología se observó gran cantidad de poros del tipo empaquetadura (70%) y cavidades (10%) un cambio en la trama, de pórfido a enáulico, según el aumento de yeso. En las imágenes de tomografía de rayos X se detectó una mayor diversificación morfológica de los poros, especialmente en G28, con predominio de poros laminares (12%), bioporos tubulares (12%) y empaquetamiento/apilamiento (64%), así como al contabilizarlos, se obtuvo un mayor número ( $n > 30.000$ ) y categorías de poros debido al mayor detalle de la técnica, como bioporos tubulares ( $G28 > G7 = G0$ ) y poros laminares ( $G28 > G7 = G0$ ). Las técnicas se complementan, es decir, la micromorfología permitió evaluar la organización estructural con calidad y la tomografía de rayos X con la cantidad de poros debido a la mayor resolución espacial y los algoritmos.*

**PALABRAS CLAVE:** Bioporos. Conservacion del suelo. Yeso agrícola.

### INTRODUÇÃO

A área total cafeeira no Brasil ultrapassou 2,2 milhões ha<sup>-1</sup> em 2021. O café é uma das principais *commodities* brasileiras (CONAB, 2021). Além do aumento em produtividade, o setor cafeeiro se ajusta às boas práticas agrícolas, ou seja, aplica várias práticas conservacionistas do solo (CARDUCCI *et al.*, 2017; SERAFIM *et al.*, 2013; GLOBO RURAL, 2021). Essas práticas promovem o bom aporte hídrico do solo (CARDUCCI *et al.*, 2015b), que é de suma importância para todo o sistema de produção, uma vez que, para produzir 1 Mg de café são necessários mais de 11 Mg de água (COLTRO *et al.*, 2006).

Nesse sentido, o sistema de manejo com multi-práticas conservacionistas para produção cafeeira se destaca no Centro-Oeste mineiro, particularmente na região Alto São Francisco, no Bioma Cerrado. Os cafés produzidos sob esse sistema, que usa expressiva dose de gesso agrícola (7kg m<sup>-1</sup>) tem alcançado produções acima da média nacional (> 30 sacas ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) (CONAB, 2021), pois este atua na construção da fertilidade física e química do solo, com melhorias na rede de poros e, conseqüentemente, a distribuição de água, além de facilitar o rápido crescimento radicular dos



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEIEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa,  
Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

cafeeiros jovens (< 6 anos) (CARDUCCI *et al.*, 2015a; SERAFIM *et al.*, 2013; RAMOS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2013).

Nesse sentido, obter uma rede de poros diversificada no perfil do solo permite a boa infiltração e distribuição de água, a exemplo, da presença dos poros tipo canais ou bioporos, derivados de ação biológica (organismos de solo e raízes) (PESSOA *et al.*, 2022; CARDUCCI *et al.*, 2014). Existem ainda, poros do tipo empacotamento (vários poros ligados uns aos outros) e as fissuras (se assemelha a rachaduras finas), também relacionados a estrutura do solo, porém rapidamente alteráveis pelo uso e manejo, e pela atividade biológica (PESSOA *et al.*, 2022). Entretanto, os poros tipo cavidades, câmaras e vesículas (aspecto ovalado com superfície irregular, promovidos por processo compressivo ou bolhas de ar) são poros descontínuos, individualizados sem relação direta com a estrutura ou trama do solo (tamanho, forma e frequência dos componentes do solo: minerais, matéria orgânica, água e ar), eles podem ocorrer tanto no espaço inter- (entre) ou intra- (dentro) agregado (LIMA *et al.*, 2005; PIRES *et al.*, 2019b; FERREIRA *et al.*, 2018; BORGES *et al.*, 2019; PIRES *et al.*, 2017; BULLOCK *et al.*, 1985).

Sendo assim, algumas práticas de manejo, como preparo reduzido, incremento em cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e o aumento do teor de matéria orgânica do solo podem favorecer a formação de poros do tipo canais ou bioporos, como observado por Pires *et al.* (2019b), Ferreira *et al.* (2018), Borges *et al.* (2019) e Taina *et al.* (2010 a,b) em imagens de tomografia de raio-X. Estes poros podem ser considerados bons indicadores da sustentabilidade ambiental nos sistemas de manejo agrícola (LIMA *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2012; PIRES *et al.*, 2017).

A rede de poros do solo pode ser avaliada com alta precisão pela tomografia raio-X (quantificação em 3D), e pela descrição micromorfológica (qualificação em 2D). Porém, são raros os estudos envolvendo as duas técnicas (PESSOA *et al.*, 2022; TAINA *et al.*, 2010a, b), mas espera-se que, quando associadas, possam detectar e determinar todas as mudanças geométricas e morfológicas dos poros, além da conformação da matriz do solo (estrutura), ou seja, sua trama e distribuição relativa ao material fino (antes denominada plasma, na literatura). Assim, ocorrerá o melhor entendimento não só da gênese dos solos e suas propriedades como também o grau de mudança estrutural promovida pelo manejo do solo (PINTO *et al.*, 2015; SKORUPA *et al.*, 2016; PIRES *et al.*, 2017; PIRES *et al.*, 2019a, b; FERREIRA *et al.*, 2018; PESSOA *et al.*, 2022).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a morfologia dos poros de um Latossolo gibbsítico submetido a um sistema multi-práticas de manejo cafeeiro com diferentes doses de gesso via análises de imagens bi e tridimensionais. As hipóteses testadas foram: 1- O sistema de manejo com multi-práticas pode alterar a geometria e morfologia dos poros devido ao alto aporte de gesso agrícola, 2 - As duas técnicas de avaliação conjunta 2D e 3D (bi e tridimensional) podem discriminar com precisão as alterações microestruturais do Latossolo submetido ao manejo em questão.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEIEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

### MATERIAIS E MÉTODO

#### Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido em lavoura cafeeira, localizada no município de São Roque de Minas, região fisiográfica do Alto São Francisco, MG, cujas coordenadas são 20°15'45" S e 46°18'17" W, com altitude de 850 m. O clima da região é do tipo Cwa, segundo Köppen, com precipitação pluvial média anual de 1.344 mm e estação seca bem definida nos meses de maio a setembro (ALVARES *et al.*, 2013). O solo foi descrito, amostrado e classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (SANTOS *et al.*, 2018) muito argiloso e gibbsítico, seu correspondente é o Acrustox na Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014) e ao Ferralsol na legenda FAO-WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014).

A lavoura cafeeira foi implantada em novembro de 2008 e conduzida de acordo com um sistema multi-práticas conservacionistas de manejo do solo desenvolvido na região há 20 anos (anos 2000). Nesse sistema de manejo utilizou-se a cultivar Catucaí (*Coffea arabica* L.) cultivada em plantio semi-adensado, com 0,65 m entre plantas e 2,50 m nas entrelinhas. No preparo do solo foi empregada uma aração e duas gradagens com aplicação de corretivos em área total (calcário dolomítico a 4 Mg ha<sup>-1</sup> + gesso agrícola 1,92 Mg ha<sup>-1</sup>).

O sulco de plantio foi aberto a 0,60 m de profundidade e 0,50 m de largura, por meio de uma cavadeira-adubadora que, esta subsola (0,60m) e mistura (0,40 m) o solo permitindo a incorporação de insumo de base (formulado 08-44-00, enriquecido com 1,5% Zn e 0,5% B) além da correção em maior profundidade com calcário dolomítico 8 Mg ha<sup>-1</sup> e gesso 2 kg m<sup>-1</sup>). As mudas de cafeeiro foram plantadas entre a segunda quinzena de outubro e a primeira quinzena de novembro. Após o plantio, foi adicionado gesso em superfície ao longo da linha de cultivo (7 kg m<sup>-1</sup>) que foi recoberto com uma mistura de solo e resíduo vegetal proveniente da entrelinha ("chegada de terra" junto ao cafeeiro).

Antes do plantio das mudas de café (≈ 30 dias) foi cultivada a *Brachiaria decumbens* (Syn. *Urochloa*) como cultura de cobertura nas entrelinhas, que é mantida durante todo ciclo do cafeeiro. A *Brachiaria* foi roçada periodicamente, minimizando possível competição com a cultura principal, além de produzir resíduos que são distribuídos ao longo da linha e entrelinha de plantio, o que equivale a uma adubação orgânica. As operações de tratamentos culturais e colheita foram totalmente mecanizadas (SERAFIM *et al.*, 2011; CARDUCCI *et al.*, 2017).

As parcelas experimentais continham 10 linhas com 36 plantas cada, totalizando 360 plantas por parcela com área de 585 m<sup>2</sup>. A bordadura correspondeu a três plantas no início da parcela e duas linhas nas laterais, totalizando 360 m<sup>2</sup>, onde foram avaliados os seguintes tratamentos: G0 – ausência de gesso (testemunha); G7 – 7 Mg ha<sup>-1</sup> (segundo recomendações técnicas do manual de adubação, Guimarães *et al.*, 1999) e G28 – 28 Mg ha<sup>-1</sup> (dose de referência do sistema de manejo (SERAFIM *et al.*, 2011) de gesso adicional, ambos aplicados em superfície na linha de plantio. A seleção desses tratamentos baseou-se na hipótese de possíveis mudanças estruturais promovidas pela ação do gesso agrícola.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

### Amostragem e caracterização física, química e mineralógica

Para execução das análises tomográficas de raios-X que visam o maior detalhamento da distribuição do diâmetro de poros do solo em três dimensões (3D), foram coletadas, em trincheiras aleatórias abertas em cada parcela, amostras de solo com estrutura preservada em cilindros de acrílico (0,06 m diâmetro x 0,14 m altura), entre plantas (0,65 m) e na linha de plantio logo abaixo da camada de gesso, nas camadas de 0,20-0,34; 0,80-0,94 e 1,50-1,64 m, em três repetições. As profundidades adotadas foram anteriormente identificadas pela análise visual (CARDUCCI *et al.*, 2017). Para este tipo de coleta ao qual visou o mínimo de perturbação à estrutura do solo, foi utilizada uma ponteira de aço para encaixe do cilindro de acrílico e exerceu-se pressão controlada e lenta para sua introdução ao solo.

No laboratório, o excesso de solo presente nos tubos de acrílico (topo e base) foi removido e essa porção foi seca ao ar e peneirada a 2 mm para análises adicionais, como a análise textural que foi realizada pelo método da pipeta (TEIXEIRA *et al.*, 2017), utilizando NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> e agitação lenta da suspensão do solo (durante 16 horas) para dispersão das partículas. Valores médios de argila, silte e areia foram obtidos para cada camada, respectivamente (em g kg<sup>-1</sup>): 819, 157 e 24 à 0,20-0,34 m; 848, 127 e 25 à 0,80-0,94 m e 886, 89 e 25 à 1,50-1,64 m.

Foram determinados os conteúdos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pelo ataque sulfúrico e utilizados nos cálculos das relações moleculares Ki (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Kr [SiO<sub>2</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)] (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Procedeu-se também aos cálculos para alocação dos teores de caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> = 2,1496 SiO<sub>2</sub>) e gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub> = 1,5291Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0,6047Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) por meio de suas relações estequiométricas derivadas de suas fórmulas químicas ideais (RESENDE *et al.*, 1987) (Tabela 1).

Tabela 1. Granulometria e caracterização química e mineralógica do horizonte Bw do Latossolo gibbsítico.

	Ataque sulfúrico			Ki <sup>(1)</sup>	Kr <sup>(2)</sup>	Ct <sup>(a)</sup>	Gb <sup>(b)</sup>
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
	.....g kg <sup>-1</sup> .....					.....%.....	
Bw	104,9	391,7	169,0	0,46	0,36	22,55	58,53

Relações moleculares: <sup>(1)</sup>Ki= SiO<sub>2</sub>: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <sup>(2)</sup>Kr =SiO<sub>2</sub>: (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); <sup>(a)</sup>Ct: Caulinita, <sup>(b)</sup>Gb: Gibbsita.

### Aquisição, reconstrução e análise das imagens tridimensionais (3D)

As amostras de solo em cilindros de acrílico foram secas a 40 °C em estufa de circulação forçada para minimizar possíveis interferências dos filmes de água na atenuação dos raios-X. Para a geração das imagens, foram scaneadas a 33 mm de espessura exatamente no centro de cada amostra, em um tomógrafo EVS/GE MS8X-130 (tubo de raios-X de tungstênio 130 kV e 200 mA) de terceira geração pré-clínico, com feixe em cone, mantido no Laboratório de Imagem de Solo da Universidade de Guelph, Canadá. A energia de excitação de 120 kV e 170 mA foi empregada nas amostras gerando uma sequência axial de imagens com 16-bit de resolução radiométrica com tempo



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa,  
Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

de exposição de 3.500 Ms (milissegundos) Para redução dos artefatos provenientes dos feixes de raios-X policromáticos, foi utilizado o pré-filtro de película de cobre (0,5 mm de espessura).

A partir das projeções axiais iniciais, 2D, resultantes do escaneamento a 20  $\mu\text{m}$  de resolução espacial, subvolumes de interesse foram selecionados exatamente no centro da imagem e reconstruídos em 3D a 60  $\mu\text{m}$  de resolução espacial (666 voxel x 666 voxel x 550 fatias ou 40 x 40 x 33 mm) com arquivo de 500 MB por meio do programa "eXplore Reconstruction Utility (GE HEALTHCARE, 2006) (Figura 1).

Com a finalidade de comparar a atenuação de raios-X em imagens tomográficas, foram utilizados os valores em Unidade Hounsfield (são definidos em relação ao ar [-1000 UH] e a água [0 UH]). Subsequentemente, os coeficientes da água e do ar foram calculados e um filtro de suavização gaussiano (raio de 1 voxel) para reduzir o ruído e os artefatos da imagem com o auxílio do MicroView (GE HEALTHCARE, 2006), antecedendo aos cálculos dos poros no NIH ImageJ (RASBAND, 2002).

Os procedimentos de binarização ou *threshold* foram feitos no NIH ImageJ com base no trabalho de Schlüter *et al.* (2010) que empregaram o reconhecimento das bordas dos poros pelo método Laplaciano detectados na "imagem semente" (*seeded-region-growing*) para atribuir, aos *voxels* associados, o valor "zero". Para tanto foi necessário fixar os valores da escala de cinza na imagem (utilizaram-se as posições dos picos de ar e sólidos do histograma de cada imagem), para maximizar as diferenças entre os limites dos poros e os não poros (fase sólida) (Figura 1).

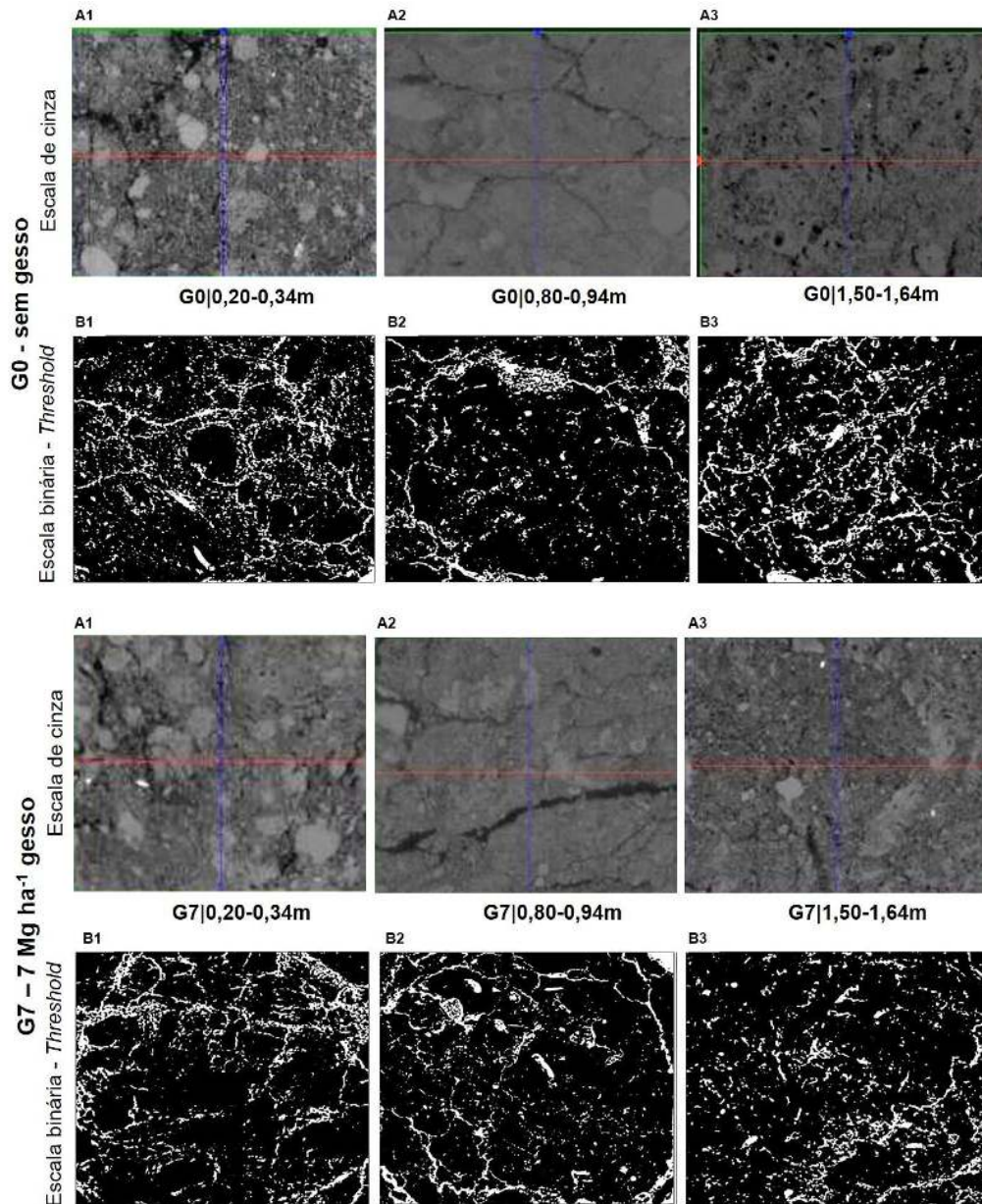
Com o NIH ImageJ (RASBAND, 2012) todas as análises foram feitas nas imagens 3D, o que permitiu diferenciar os dados de acordo com as classes de diâmetro de poros pretendidos. Para isto foi utilizada a função "*Analyze Particle*" que permitiu calcular as dimensões (volume e área) de cada poro detectado na imagem 3D binarizada ( $n = 550$ ), bem como a função "*Stacks z – profile*" para quantificar a densidade global e o desvio padrão da imagem em valores HU gerados com resolução radiométrica de 16 bits, bem como o desvio padrão em cada fatia da imagem binária.

A classificação da morfologia dos poros foi executada de acordo com a proposta de Zingg (1935) descrito em Bullock *et al.*, (1985) e Stoops (2003). Sendo assim, a ferramenta "*Analyze Particle*" permite o ajuste de um elipsóide para cada objeto encontrado (poro), e os três eixos [eixo maior (a), intermediário (b) e menor (c)] são utilizados para categorizar os poros (b/a e c/b) como: *triaxial* ( $b/a < 2/3$  e  $c/b < 2/3$ ), *spheroidal* ( $b/a > 2/3$  e  $c/b > 2/3$ ), *prolate* ( $b/a < 2/3$  e  $c/b > 2/3$ ), *oblate* ( $b/a > 2/3$  e  $c/b < 2/3$ ) e os não classificados - neste trabalho, considerados como poros de empacotamento. O poro *triaxial* pode ser traduzido como planares, laminares e fissuras; o *spheroidal*, são as cavidades e vesículas; os *prolates* são os canais ou bioporos tubulares e os *oblate*, são os bioporos irregulares ou câmara e discóides.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck





## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

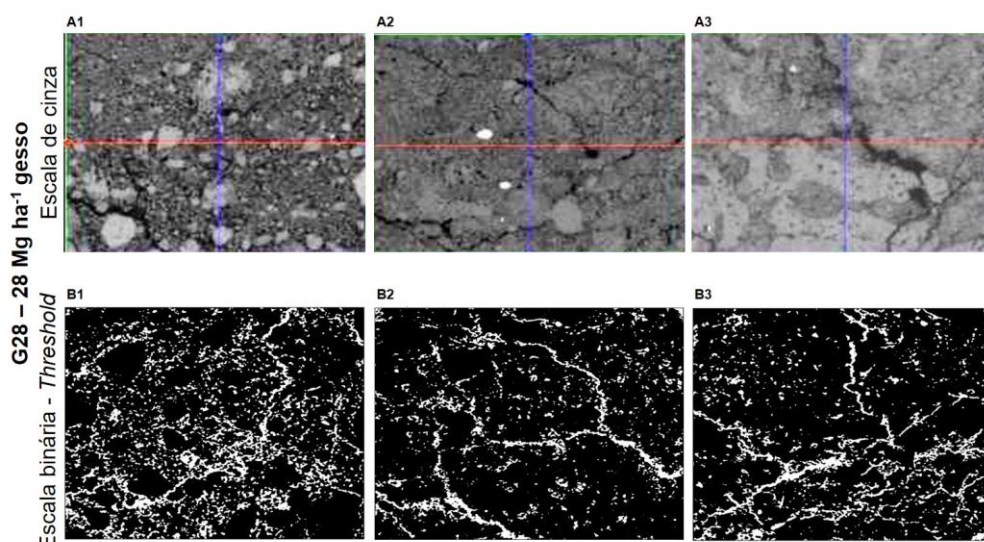


Figura 1. Fatias das imagens tomográficas de raios-X reconstruídas do LATOSSOLO VERMELHO gibbsítico nas profundidades de 0,20–0,34; 0,80–0,94 e 1,50–1,64 m, sequencias de A1 até B3, nos tratamentos: G0 – ausência de gesso adicional; G7 – 7 Mg ha<sup>-1</sup> e G28 – 28 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso adicional aplicado na superfície da linha de plantio. Microestrutura típica (acima, escala de cinza) e imagens segmentadas (abaixo, escala binária), ambas a 60 µm de resolução espacial e dimensão de 40,02 x 40,02 x 0,06 mm (667 x 667 voxel). As linhas na imagem acima indicam o posicionamento horizontal da imagem (X e Y).

### Confeção de lâminas e análise de imagens bidimensional (2D)

As amostras de solo coletadas nos tubos de acrílico foram impregnadas com resina epóxi e agente curador (Petropoxy 154) e submetidas à câmara de vácuo para remoção do ar até completa absorção da resina, o que durou em torno de 30 dias. As amostras foram encaminhadas para secagem a 40°C em estufa de circulação aberta para endurecimento e em seguida para o corte em blocos com uma serra de diamante na dimensão de 40,02 x 40,02 x 33 mm, que se refere ao local escaneado no tomógrafo de raios-X. Os blocos foram cortados novamente na direção vertical com dimensão de 57 x 50 mm, posteriormente colados em lâmina de vidro com a resina e polidos em papel coríndon rotativo.

As lâminas delgadas, confeccionadas para a análise micromorfológica, foram descritas de acordo com procedimento recomendado em Stoops (2003) e Castro (2008), ou seja foram obtidas para analisar o fundo matricial (composição da trama: tamanho, forma e frequência dos componentes do solo: minerais, matéria orgânica, água e ar), microestrutura e os poros. A forma dos poros foi descrita como nas imagens tomográficas de acordo com Zingg (1935) descrito em Bullock *et al.* (1985) e Stoops (2003).



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

### Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise descritiva, devido à alta variabilidade amostral (R CORE TEAM, 2021). Os desvios foram calculados com base na população de dados com o auxílio de uma planilha de fluxo livre.

### RESULTADOS

#### Análise das imagens tri-dimensionais (tomografia de raio-X)

Nas imagens 3D com resolução espacial de 60  $\mu\text{m}$ , foi possível detectar um grande número de poros (>30.000), especialmente na primeira camada na seguinte ordem: G0>G28>G7, e homogeneidade em número de poros para as demais camadas avaliadas (Figura 3). No entanto, observou-se que nos tratamentos com gesso adicional houve o incremento no volume dos poros (> 6.000  $\text{mm}^3$ ), o que promoveu a maior variabilidade espacial da estrutura do solo (Figura 2 e3).

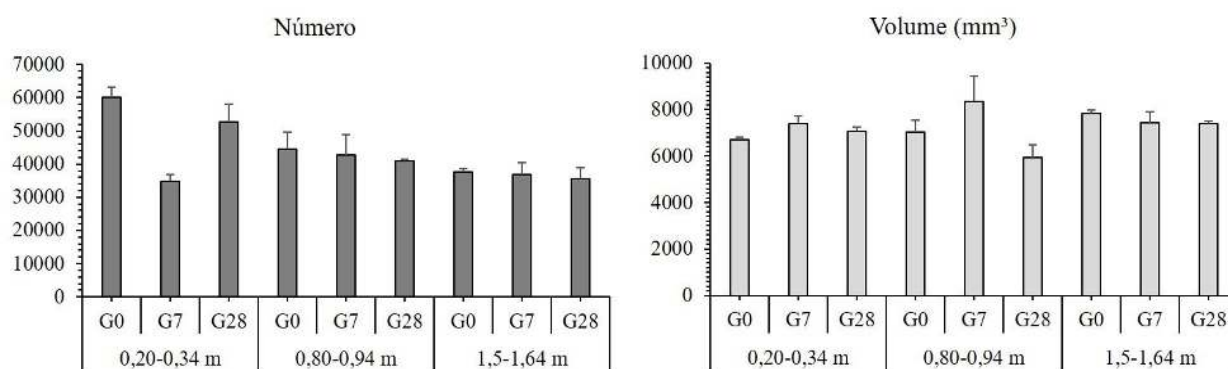


Figura 2. Número e volume total de poros do LATOSSOLO VERMELHO gibbsítico nas camadas de 0,20–0,34; 0,80–0,94 e 1,50–1,64 m nos tratamentos: G0 – ausência de gesso adicional; G7 – 7  $\text{Mg ha}^{-1}$  e G28 – 28  $\text{Mg ha}^{-1}$  de gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio. As barras correspondem ao erro padrão da média.

Nesse sentido, a maior variabilidade da organização estrutural ou trama do solo se deveu ao maior desvio padrão dos valores de atenuação de raios-X, ou seja, a densidade do solo em Unidades de Hounsfield (HU), foi maior para o G28 na camada superficial e abaixo de 1 m de profundidade. Menores valores de desvio padrão indicam a presença de componentes sólidos mais homogêneos (Figura 3) e, conseqüentemente baixa diversidade do sistema poroso. O desvio padrão refere-se à heterogeneidade interna da estrutura do solo, ou seja, valores elevados de desvio padrão indicam a presença de agregados e macroporos mais dispersos, enquanto valores mais baixos de desvio padrão indicam similarmente a falta desses componentes, ou a presença única de sólidos minerais e/ou orgânicos, por exemplo (Figura 3). Embora os valores de desvio padrão permitam a interpretação e caracterização dos componentes estruturais do solo em relação à ocorrência e distribuição de tamanho destes, esta análise não inclui informações espaciais mais detalhadas (TAINA *et al.*, 2013).



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

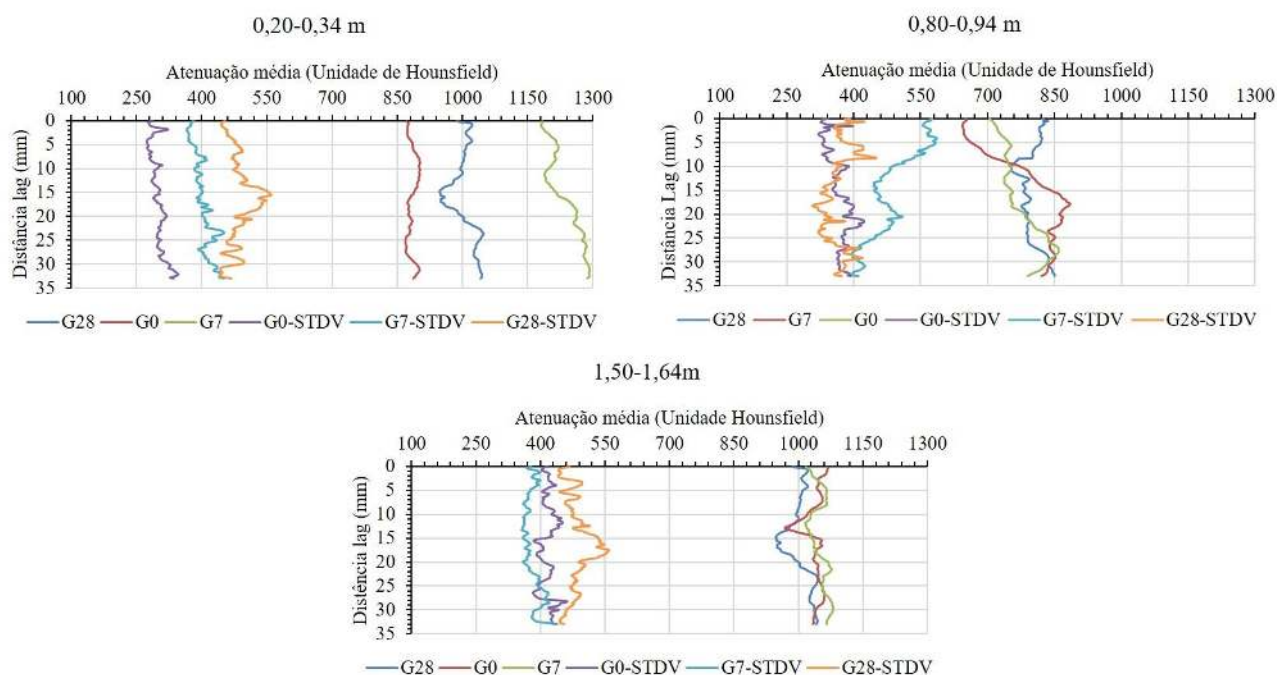


Figura 3. Atenuação média ou radiodensidade do solo em Unidades Hounsfield (HU) e desvio padrão (STDV) gerados das imagens de tomografia de raio-X (volume: 40 mm x 40 mm x 35 mm) do LATOSSOLO VERMELHO gibbsítico nas camadas de 0,20–0,34; 0,80–0,94 e 1,50–1,64 m nos tratamentos: G0 – ausência de gesso adicional; G7 – 7 Mg ha<sup>-1</sup> e G28 – 28 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio.

Ao longo do perfil do Latossolo detectou-se uma grande diversidade na morfologia dos poros (laminares, bioporos tubulares, cavidades, bioporos irregulares e empacotamento) (Figura 4). Na camada de 0,20-0,34m ocorreu o maior número de poros detectáveis nas imagens 3D na seguinte ordem G28>G0>G7.

De forma geral, os poros tipo empacotamento representaram mais de 64% dos poros encontrados ( $n > 25000$ ) em todos os tratamentos com aparente homogeneidade de distribuição exceto o G0 na primeira camada (Figura 4). Neste estudo, os poros tipo empacotamento foram obtidos a partir dos poros não classificados, ou seja, que não se adequaram aos critérios propostos por Zingg (1935) e descritos em Bullock *et al.* (1985) para a classificação da forma ou morfologia do poro, teoria essa desenvolvida para solos de clima temperado.

Os poros que apresentaram características mais próximas a um discóide, como os bioporos irregulares ( $n > 1.500$ , 4%), ou esferoidal (cavidades e vesículas,  $n > 2000$ , 7%), ocorreram em menor proporção ao longo do perfil do solo e em todos os tratamentos. Se destacaram no G28 na camada de 0,20-0,34 m os poros laminares e fissurais (triaxial,  $n > 5.500$ , 12%), bioporos tubulares (canais,  $n > 5500$ , 12%) e os de empacotamento foram o maior número ( $n > 33.000$ ) ou 64% do total de poros detectáveis na imagem 3D (Figura 4). Para o G7 e G0 também se destacaram os poros laminares e fissurais (triaxial,  $n > 3.900$ , 8,5%), bioporos tubulares (canais,  $\approx n > 3.900$ , 8,5%) em menor proporção



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

com relação ao G28, embora os poros tipo empacotamento foram mais expressivos ( $\approx n > 35.000$ , 75%).

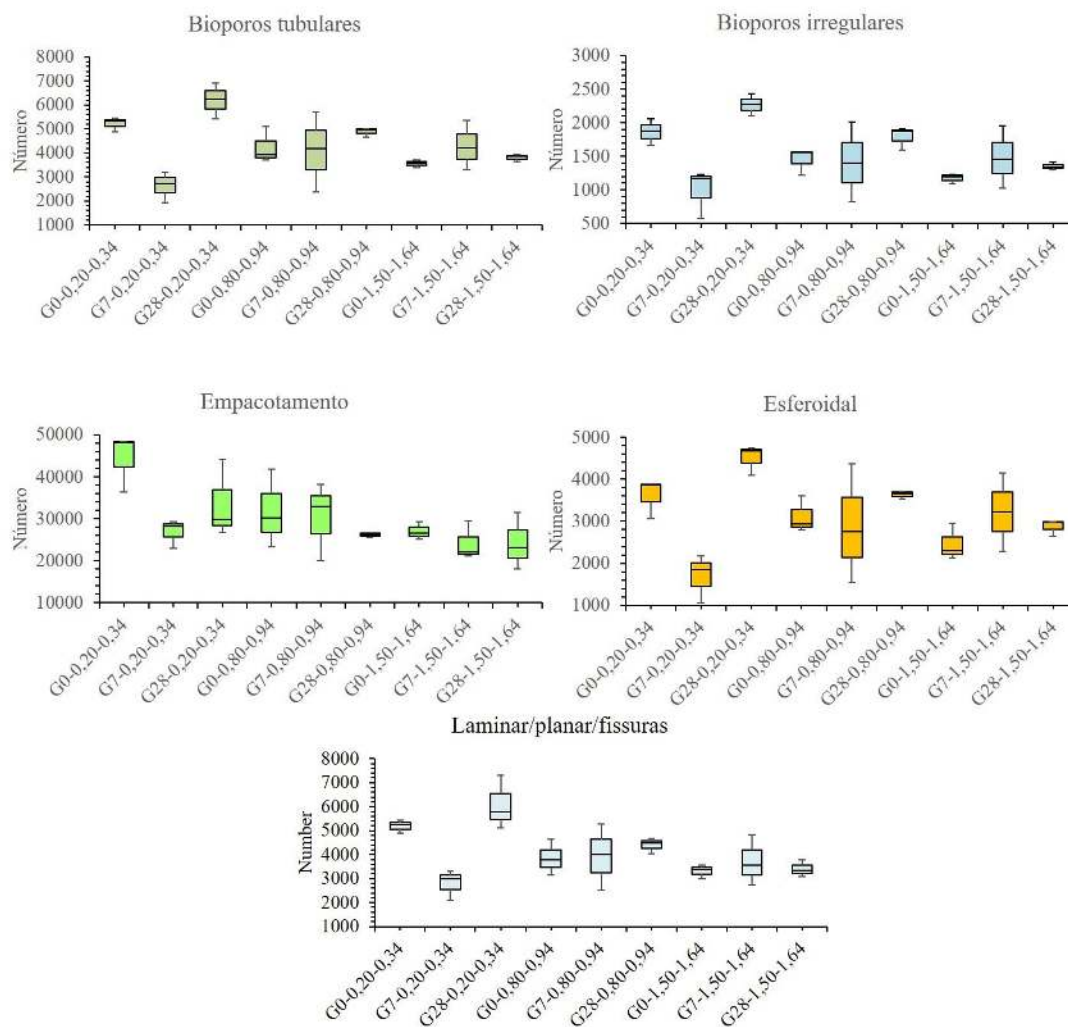
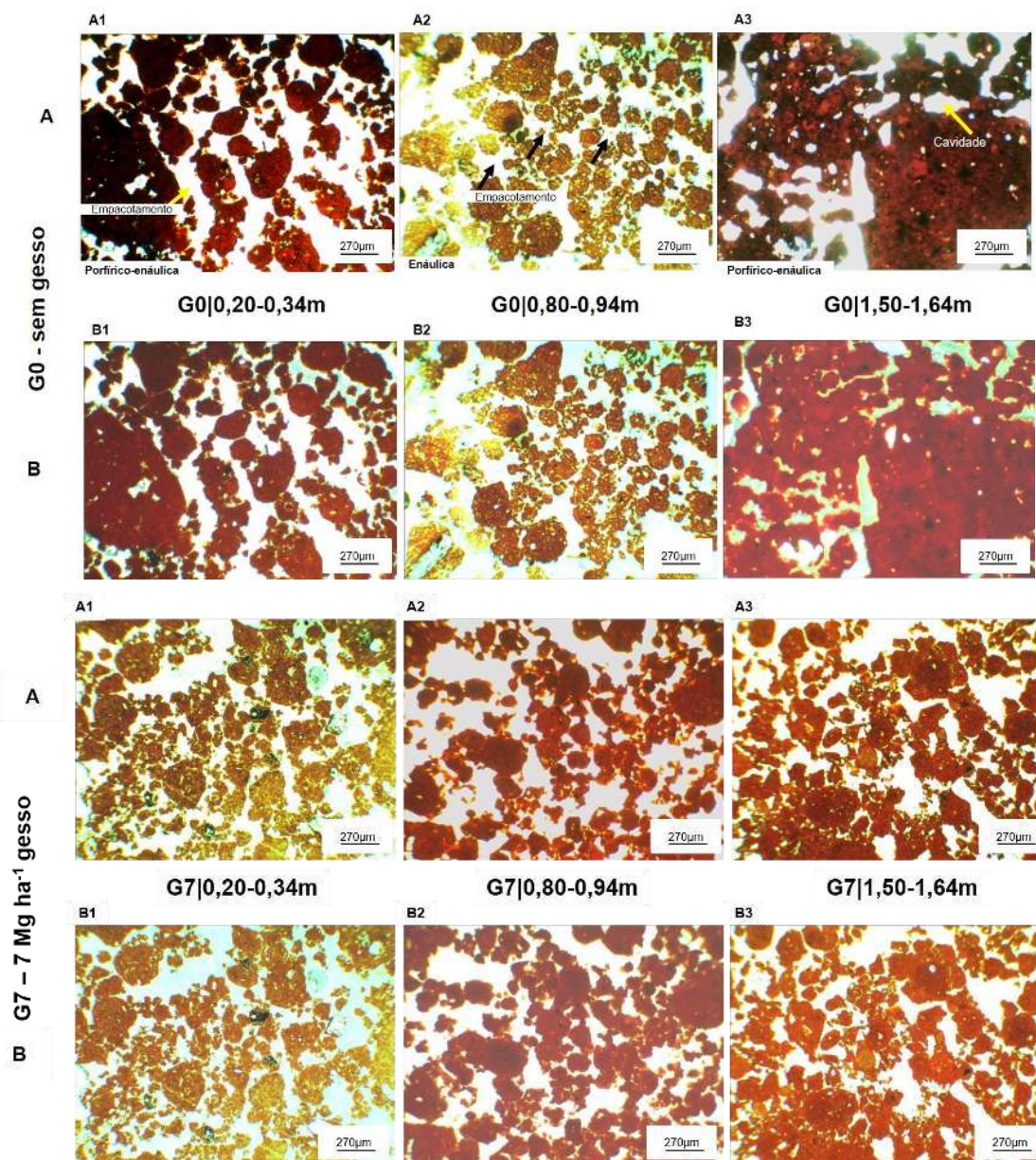


Figura 4. *Box plot* da classificação morfológica dos poros do LATOSSOLO VERMELHO gibbsítico nas camadas de 0,20–0,34; 0,80–0,94 e 1,50–1,64 m nos tratamentos: G0 – ausência de gesso adicional; G7 – 7 Mg ha<sup>-1</sup> e G28 – 28 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio.

### Descrição micromorfológica das imagens bidimensional (2D)

A descrição micromorfológica das secções finas (2D) contém a caracterização do fundo matricial, microestrutura e poros de todas as combinações de nível avaliados (dose de gesso x camada) (Tabela 2). De forma geral, o Latossolo, por ter influência da mineralogia gibbsítica, apresentou a fração fina densa bem distribuída (cores escuras na Fig. 2) e fração grossa quartzosa pouco abundante. Foi visível em todos os tratamentos a distribuição enáulica (poucos grãos de quartzo isolados entre os abundantes agregados granulares de argila) e os poros tipo empacotamento/empilhamento (90%) e cavidades (10%) distribuídas aleatoriamente (Figura 2).

Conforme houve o aumento da dose de gesso, 0 para 28 Mg ha<sup>-1</sup>, ocorreram modificações na classificação da trama (tamanho, forma e frequência dos componentes do solo: minerais, matéria orgânica, água e ar) na camada superficial de porfirica-enáulica para enáulica, ou seja, a utilização de gesso adicional (G7 ou G28) favoreceu a maior abertura da microestrutura do solo, o que favoreceu o surgimento de mais espaços vazios (Tabela 2, Figura 2).



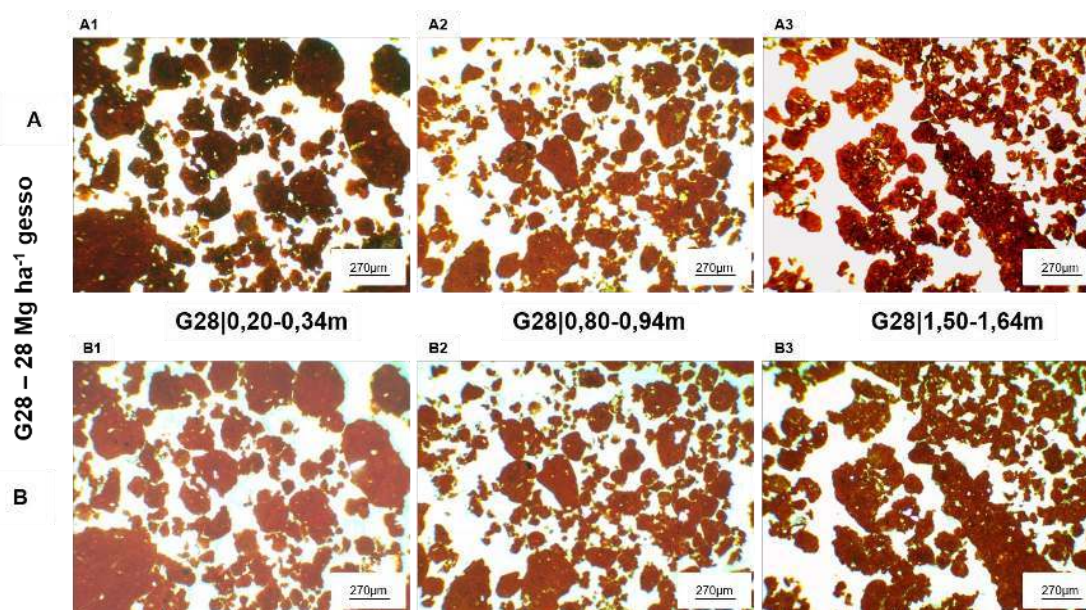


Figura 5. Secções finas do LATOSSOLO VERMELHO gibbsítico nas profundidades de 0,20–0,34; 0,80–0,94 e 1,50–1,64 m, sequencia A1 até B3 dos tratamentos: G0 – ausência de gesso adicional; G7 - 7 Mg ha<sup>-1</sup> e G28 – 28 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso adicional aplicado na superfície do solo na linha de plantio. A) imagens sob luz polarizada planar - PPL; B) luz polarizada cruzada – XPL.



**RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR**  
**ISSN 2675-6218**

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
 Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa,  
 Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

Tabela 2. Descrições micromorfológicas do LATOSSOLO VERMELHO gibbsítico nas profundidades de 0,20–0,34; 0,80–0,94 e 1,50–1,64 m nos tratamentos: G0 – ausência de gesso adicional; G7 – 7 Mg ha<sup>-1</sup> e G28 – 28 Mg ha<sup>-1</sup> gesso adicional aplicado na superfície da linha de plantio.

Tratamento	Profundidade	Distribuição relativa C/F	Microestrutura	Pedalidade <sup>(1)</sup>	Poros	Fração fina (F)	Fração grossa (C)
G0	0,20-0,34 m	Pórfiro-enáulica	Granular	Bem desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	Grãos de quartzo subangulares
	0,80-0,94 m	Enáulica	Granular	Bem desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	Grãos de quartzo subangulares
	1,50-1,64 m	Pórfiro-enáulica	Granular	Bem desenvolvida	Cavidades	Argila e óxidos de Ferro	Grãos de quartzo subangulares
G7	0,20-0,34 m	Enáulica	Granular	Moderadamente desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	grãos de quartzo subangulares
	0,80-0,94 m	Enáulica	Granular	Moderadamente desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	Não observado
	1,50-1,64 m	Enáulica	Granular	Bem desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	Não observado
G28	0,20-0,34 m	Enáulica	Granular	Moderadamente desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	Grãos de quartzo subangulares
	0,80-0,94 m	Enáulica	Granular	Bem desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	Grãos de quartzo subangulares
	1,50-1,64 m	Enáulica	Microgranular	Bem desenvolvida	Empacotamento	Argila e óxidos de Ferro	Grãos de quartzo subangulares

(1) O grau de desenvolvimento da estrutura na escala microscópica, é descrito em três tipos de pedalidade: bem desenvolvida, moderadamente desenvolvida e fracamente desenvolvida (BULLOCK *et al.* 1985).



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

### DISCUSSÃO

A forte agregação da estrutura granular do Latossolo foi facilmente visível em todas as camadas, proporcionada pela influência direta da gibbsita (Tabela 1) na organização dos agregados maiores desenvolvidos de microagregados bem individualizados (Tabela 2), como também relatado em outros estudos (FERREIRA *et al.*, 1999; REATTO *et al.*, 2009; BISPO *et al.*, 2011; SKORUPA *et al.*, 2016) e mais estáveis, como detectado por Vitorino *et al.* (2003) e Silva *et al.* (2016a), ao avaliarem a estabilidade de agregados de Latossolos oxidícos via energia ultrassônica.

Dessa forma, a análise visual das lâminas delgadas permitiu observar um pequeno aumento da porosidade total (espaços vazios) na camada superficial (0,20-0,34 m), com o incremento da dose de gesso agrícola (G28>G7>G0). Este tem como principal função fornecer cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ) às plantas, além de influenciar positivamente na atividade biológica e na floculação das argilas (Raij, 2008; Inagaki *et al.* 2017). De acordo com Silva *et al.* (2013), que trabalharam na mesma área deste estudo, os tratamentos com gesso adicional obtiveram os seguintes teores de  $\text{Ca}^{2+}$ : 5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no G7 e 4,8  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no G28. Esta concentração é adequada à floculação das argilas, salientando que esse fenômeno é condição fundamental para estabilizar os agregados do solo (RAMOS *et al.*, 2019; SERAFIM *et al.*, 2012; FERREIRA *et al.*, 2018).

Esse incremento de poros do G0 para o G28 também foi observado por Carducci *et al.* (2014, 2015, 2017), com maior diversidade de diâmetro de poros nas primeiras camadas dos Latossolos estudados (oxidíco e caulínítico), especialmente aqueles poros responsáveis pela drenagem da água (poros estruturais,  $\text{Ø} > 60\mu\text{m}$ ). Esses autores ressaltaram que, nessa avaliação em macroescala, o preparo profundo e a manutenção do resíduo vegetal agiram diretamente na melhor organização da estrutura. Entretanto, ao observar em microescala, pode-se verificar que a contribuição do gesso adicionado promoveu uma microagregação ainda mais forte além de distribuição aleatória dos poros visíveis presentes na trama do solo, ou seja na estrutura (Figura 5, Tabela 2).

Os poros apresentam geometria, morfologia e conectividade muito variada ao longo do perfil do solo promovida pela sua organização estrutural. Os poros do tipo empacotamento, as fissuras e os bioporos (canais) são poros estruturais ou inter-agregados, pois definem o padrão da estrutura do solo. Por outro lado, poros descontínuos do tipo cavidades, câmaras e vesículas (promovidos por processo compressivo ou bolhas gasosas) podem ocorrer tanto inter (entre) ou intra (dentro) agregados (LIMA *et al.*, 2005; TAINA *et al.*, 2010a,b; PIRES *et al.*, 2019a,b; BORGES *et al.*, 2019).

Nesse sentido, os poros de empacotamento típicos de solos de estrutura granular evidentes no Latossolo deste estudo foram qualificados (imagem 2D) e quantificados (imagem 3D). Estes são raros em solos de clima temperado, onde predominam argilas silicatadas e/ou expansivas, por serem pouco intemperizados e, portanto, não foram descritos por Zingg (1935) citado em Bullock *et al.* (1985) para a classificação da forma do poro, chamados então de poros não-classificados para o presente estudo. Sendo assim, pode-se considerar que se não todos, boa parte destes são os poros de empacotamento,



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

ou seja, um verdadeiro sistema complexo de poros (BORGES *et al.*, 2019), como confirmado qualitativamente nas lâminas delgadas (Figura 5 e 3).

Os poros tipo laminares e planares (triaxiais, finos e compridos) foram bem expressivos na primeira camada. Tais poros, em outros solos, podem ser provenientes da gênese dos solo (origem), quando há estrutura em blocos e argilas expansivas (TAINA *et al.*, 2010b; TAINA *et al.*, 2013). De acordo com Lima *et al.* (2005) e Pires *et al.* (2019b), para solos de clima tropical, estes poros são indicativos também de estresse físico, ou seja, quando há alguma perturbação externa ao solo que promova a mudança do arranjo das partículas minerais (argila, silte e areia), como ocorreu no plantio dos cafeeiros, ou seja, preparo do solo intenso com aração e subsolagem profunda até 0,60m, mesmo após três anos da instalação do sistema, a alteração estrutural se manteve.

A presença de bioporos tubulares ou canais, especialmente no G28 em todas as camadas, se deveu provavelmente à contribuição do sistema radicular do cafeeiro, muito profundo e bem ramificado. Carducci *et al.* (2015a) e Silva *et al.* (2016b) contabilizaram um grande número de raízes desses cafeeiros até 1,5 m de profundidade, mesmo nos plantios mais jovens (3 anos, caso daquele estudo), que continham muitas raízes finas com ramificação vertical e horizontal homogênea no perfil do solo (raízes com  $\varnothing < 1\text{mm}$ ; G0: 2,77%; G7: 6,14%; G28: 15%). É importante ressaltar que apesar de poucos ( $\leq 12\%$ ), esses bioporos tubulares são extremamente resistentes e funcionais, assim como, os poros de empacotamento, estes são responsáveis pelo rápido movimento da água no solo (LIMA *et al.*, 2005; PIRES *et al.*, 2019; BORGES *et al.*, 2019; PIRES *et al.*, 2017; TIPPKÖTTER *et al.*, 2009).

Os poros que apresentaram características mais próximas a uma esfera, como os bioporos irregulares ou câmaras ( $\sim 3,3\%$ ) e esferoidais, que são as cavidades e vesículas ( $\approx 7\%$ ) ocorreram em menor proporção, corroborando aos dados de Pires *et al.* (2017; 2019) e Borges *et al.* (2019) ao compararem os sistemas de produção de cereais convencional e conservacionista (sistema plantio direto) em Latossolo. Geralmente, poros como estes surgem pela promoção de algum grau de degradação estrutural, geralmente ocasionados por compactação e, ou pelo revolvimento do solo, o que resulta em desgaste das arestas dos agregados e que, conseqüentemente, se tornam mais arredondados e com paredes menos irregulares (LIMA *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2012).

A técnica de micromorfologia permitiu descrever de forma detalhada as feições e tramas do Latossolo gibbsítico, o que não é possível realizar em imagens tomográficas de raio-X, justamente devido à alta interação dos feixes do raio-X com o material mineral e orgânico do solo, que são convertidos em uma escala de cinza, dificultando a separação e classificação da matriz do solo (os sólidos). No entanto, a tomografia permitiu visualizar com alto nível de detalhamento desde a porosidade intra- (dentro) e inter- (entre) agregados (PIRES *et al.*, 2017; TIPPKÖTTER *et al.*, 2009; TAINA *et al.*, 2013; PIRES *et al.*, 2019a; TAINA *et al.*, 2010b) ou seja, classificou-se cinco categorias morfológicas dos poros em detrimento das duas categorias visualizadas na micromorfologia, embora tenham-se confirmado a presença de maior número de poros de empacotamento em ambas as análises de imagem



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa,  
Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

(FERREIRA *et al.*, 1999; BISPO *et al.*, 2011; SKORUPA *et al.*, 2016; PIRES *et al.*, 2019b; BORGES *et al.*, 2019; FERREIRA *et al.*, 2018).

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A microestrutura típica do Latossolo gibbsítico permaneceu ao longo do perfil do solo após a adição das doses de gesso, porém com maior alteração da porosidade na camada de 0,20-0,34 m que estava sob a ação direta do gesso agrícola e das demais práticas conservacionistas. Pela análise micromorfológica, qualificou-se uma grande quantidade de poros tipo empacotamento (70%) e cavidades (10%). Mudanças na distribuição relativa *c/f* (*coarse/fine*, partículas grossa/fina) do solo ocorreram de porfírica para enáulica conforme o incremento em gesso, ou seja, maior “abertura” da microestrutura tendendo à granularidade. Nas imagens 3D, obtidas da tomografia de raio-X detectou-se maior diversificação morfológica dos poros, especialmente no G28, com predomínio de poros laminares e planares (triaxial, 12%), bioporos tubulares ou canais (prolate, 12%) e de empacotamento/empilhamento (64%), bem como, contabilizou-se maior número ( $n > 30000$ ) e categorias de poros (5) devido a maior resolução espacial e detalhamento da técnica, a exemplo dos bioporos tubulares ( $G28 > G7 = G0$ ) e poros laminares ( $G28 > G7 = G0$ ). As técnicas se complementam, ou seja, a micromorfologia permitiu avaliar a organização estrutural com boa exatidão e qualidade sobre a relação poro-matriz com o uso da análise de imagem das lamina delgadas, e a tomografia de raio-X identificou e quantificou mais poros devido a maior resolução espacial e aos algoritmos de cálculo.

### AGRADECIMENTOS

Aos laboratórios de Micromorfologia do Solo - Universidade Federal de Lavras, pelo apoio nas descrições das lâminas e ao Laboratório de *Micropedology - School of Environmental Science - University of Guelph* – ao PhD Richard J. Heck pelo apoio na aquisição e reconstrução das imagens tomográficas de raios-X e confecção das lâminas micromorfológicas.

### REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: [10.1127/0941-2948/2013/0507](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507)

BISPO, F. H. A.; SILVA, A. C.; VIDAL-TORRADO, P.; SOUZA JUNIOR, V. S. Highlands of the upper Jequitinhonha Valley, Brazil. II – mineralogy, micromorphology, and landscape evolution. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p.1081-1091, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400002>

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F.; CÁSSARO, F. A. M.; AULER, A. C.; ROSA, J. A.; HECK, R. J.; ROQUE, W. L. X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes. *Soil & Tillage Research*, v. 189, n. 6, p. 25-35, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.019>

RECIMA21 - Ciências Exatas e da Terra, Sociais, da Saúde, Humanas e Engenharia/Tecnologia



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. UK: Waine Research Publications, 1985, 152 p.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; HECK, R. J.; ROSSONI, D. F.; DECARVALHO, T. S.; COSTA, A. L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil & Tillage Research**, v. 145, n. 1, p. 171–180, 2015a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.015>

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; HECK, R. J.; ROSSONI, D. F. Scaling of pores in 3D images of Latosols (Oxisols) with contrasting mineralogy under a conservation management system. **Soil Research**, v. 52, n. 3, p. 231-243, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR13238>

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, L. M.; BARBOSA, S. M.; SILVA, E. A. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 3, p. 284-291, 2015b. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2014>

CARDUCCI, C. E.; ZINN, Y. L.; ROSSONI, D. F.; HECK, R. J.; OLIVEIRA, G. C. Visual analysis and X-ray computed tomography for assessing the spatial variability of soil structure in a cultivated Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 173, n. 11, p. 15-23, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.006>

CASTRO, S. S. **Micromorfologia de Solos**: bases para descrição de lâminas delgadas. 2. ed. Goiânia: Unicamp/UFG –IESA, 2008, 143 p. Disponível em: <http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/micromorfologia/Apostila%20Completa/Apostila%20FEV-2008%20-%20Micromorfologia%20de%20Solos.pdf>. Acesso: 10 out. 2017.

COLTRO, L.; MOURAD, A. L.; OLIVEIRA, P. A. P. L. V.; BADDINI, J. P. O. A.; KLETECKE, R. M. Environmental profile of Brazilian green coffee. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 1, p. 16-21, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1065/lca2006.01.230>

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: café**, Brasília, v. 1, n. 1, 2021. ISSN 2318-7913. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 507-514, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300003>

FERREIRA, T. R.; PIRES, L. F.; WILDENSCHILLD, D.; HECK, R. J.; ANTONINO, A. C. D. X-ray microtomography analysis of lime application effects on soil porous system. **Geoderma**, v. 324, p. 119–130, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.015>

GE HEALTHCARE. **Microview Analysis 2.2.**: Technical Publication. Direction 2407688. Revision 1. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <http://www.oucom.30ohiou.edu/ou-microct>.

GLOBO RURAL. Estudo pioneiro aponta que café mineiro sustentável tem emissão negativa de CO<sup>2</sup>. **Revista Globo Rural**, edição 423, fev. 2021. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/Cafe/noticia/2021/02/estudo-pioneiro-aponta-que-cafe-mineiro-sustentavel-tem-emissao-negativa-de-co.html>. Acesso em: 16 ago. 2021.

GUIMARÃES, P. T. G.; GARCIA, A. W. R.; ALVAREZ, V. H. V.; PREZOTTI, L. C.; VIANA, A. S.; MIGUEL, A. E.; OLIVEIRA, J. D. **Cafeeiro**. Viçosa: FCV, 1999. (CFSMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais).



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science of the Total Environment**, v. 599–600, n. 2, p. 523–532, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.234>

IUSS Working Group Wrb. **World reference base for soil resources**. 2nd edn World Soil Resources Report No. 106. Rome: FAO, 2014.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 677-684, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000500003>

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo Hídrico Ótimo como Indicador de melhoria da Qualidade Estrutural de Latossolo Degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 71-78, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100008>

PESSOA, T. N.; COOPER, M.; NUNES, M. R.; UTEAU, D.; PETH, S.; VAZ, C. M. P.; LIBARDI, P. L. 2D and 3D techniques to assess the structure and porosity of Oxisols and their correlations with other soil properties. **Catena**, v. 210, p.105899, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105899>

PINTO, L. C.; ZINN, Y. L.; MELLO, C. R.; OWENS, P. R.; NORTON, L. D.; CURI, N. Micromorphology and pedogenesis of mountainous Inceptisols in the Mantiqueira range (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, n. 5, p. 455-462, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542015000500004>

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; ROSA, J. A.; COOPER, M.; HECK, R. J.; PASSONI, S.; ROQUE, W. L. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil & Tillage Research**, n. 165, p. 66-79, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>

PIRES, L. F.; MOONEY, S. J.; AULER, A. C.; ATKINSON, B.; STURROCK, C. J. X-ray microtomography to evaluate the efficacy of paraffin wax coating for soil bulk density evaluation. **Geoderma**, v. 337, n. 3, p. 935–944, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.017>

PIRES, L. F.; ROQUE, W. L.; ROSA, J. A.; MOONEY, S. J. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. **Soil & Tillage Research**, v. 191, n. 8, p. 197–206, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.018>

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for statistical computing, s. d. <http://www.R-project.org>. Acesso em: 2 nov. 2021.

RAIJ, B. Van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. 233 p.

RAMOS, B. Z.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; COSCIONE, A. R.; FERRAZ, R. M.; AMORIM, L. M.; LOPES, G. Ionic speciation in a dystrophic red latosol under coffee crop and high doses of gypsum. **Coffee Science**, v. 14, n. 3, p. 281-290, 2019. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1544>

RASBAND, W. **ImageJ: Image processing and analysis in Java** (Online). Bethesda, MD; USA: Research Services Branch; National Institute of Health, 2012. Disponível em: <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JR. O. A.; BROSSARD, M.; RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, v. 76, n. 2, p. 122–134, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.003>



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEEIRO  
Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa,  
Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 17-23, 1987.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação do solo**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 356 p.

SCHLÜTER, S.; WELLER, U.; VOGEL, H. J. Segmentation of X-ray microtomography images of soil using gradient masks. **Computers & Geosciences**, v. 36, n. 10, p. 1246–1251, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.02.007>

SERAFIM, M. E.; LIMA, J. M.; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI, P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012005000006>

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVINAI, W. M.; LIMA, V. M. P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 362-370, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400002>

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. S.; LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: Um estudo de caso. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 6, p. 964-977, 2011. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/12521>.

SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C.; CARDUCCI, C. E.; LIMA, J. M.; MELO, L. B. B.; BENEVENUTE, P. A. N. Stability of soil aggregates in Latosols and Cambisols via standard method and sonification. **African Journal Agriculture Research**, v. 11, n. 39, p. 3894-3903, 2016a. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11192>

SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G. C.; CARDUCCI, C. E.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, L. M.; COSTA, J. C. Increasing doses of agricultural gypsum, aggregate stability and organic carbon in Cerrado Oxisol under Coffee crop. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 25-32, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.012>

SILVA, E. A.; SILVA, S. H. G.; OLIVEIRA, G. C.; CARDUCCI, C. E. Root spatial distribution in coffee plants of different ages under conservation management system. **African Journal Agriculture Research**, v. 11, n. 49, p. 4970-4978, 2016b. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11356>

SKORUPA, A. L. A.; TASSINARI, D.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; ZINN, Y. L.; CURTI, N. Xanthic- and Rhodic-Acrudoxes under cerrado vegetation: differential internal drainage and covarying micromorphological properties. **Ciência e Agrotecnologia**, n. 40, v.4, p. 443-453, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404019916>

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th edn. Washington, DC: United States 5 Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372p.

STOOPS, G. **Guidelines for the analysis and description of soil and regolith thin sections**. Madison: SSSA, 2003. 184p.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

### ISSN 2675-6218

MICROMORFOLOGIA E TOMOGRAFIA DE RAIOS-X: POROSIDADE DE UM LATOSSOLO GIBBSÍTICO SOB SISTEMA MULTI-PRÁTICAS DE MANEJO CAFEIEIRO

Carla Eloize Carducci, Leandro Campos Pinto, Samara Martins Barbosa, Joyce Cristina Costa, Yuri Lopes Zinn, Richard John Heck

TAINA, I. A.; HECK, R. J. Utilization of Object-Oriented Software in the Image Analysis of Soil Thin Sections. **Soil Science Society of American Journal**, v. 74, n. 5, p.1670–1681, 2010a. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0359>

TAINA, I. A.; HECK, R. J.; DEEN, W.; MA, E. Y. T. Quantification of freeze\_thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography. **Canadian Journal of Soil Science**, n. 93, p. 1-21, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss2012-044>

TAINA, I. A.; HECK, R. J.; ELLIOT, T. R.; SCAIFF, N. Micromorphological and X-ray  $\mu$ CT study of Orthic Humic Gleysols under different management conditions. **Geoderma**, v. 158, n. 3/4, p. 110-119, 2010b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.009>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

TIPPKÖTTER, R.; EICKHORST, T.; TAUBNER, H.; GREDNER, B.; RADEMAKER, G. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography ( $\mu$ CT). **Soil & Tillage Research**, v. 105, n. 1, p. 12-20, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.05.001>

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 133-141, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000100018>