



Dinâmica da formação de crostas superficiais em função de práticas de preparo do solo e chuva simulada

Jaqueline Dalla Rosa

► To cite this version:

Jaqueline Dalla Rosa. Dinâmica da formação de crostas superficiais em função de práticas de preparo do solo e chuva simulada. Life Sciences [q-bio]. Universidade de Sao Paulo, 2012. Portuguese. NNT : . tel-02810300

HAL Id: tel-02810300

<https://hal.inrae.fr/tel-02810300>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Dinâmica da formação de crostas superficiais em função de
práticas de preparo do solo e chuva simulada**

Jaqueline Dalla Rosa

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2012**

Jaqueline Dalla Rosa
Engenheira Agrônoma

**Dinâmica da formação de crostas superficiais em função de práticas de
preparo do solo e chuva simulada**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Professor Dr. **MIGUEL COOPER**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2012**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA -ESALQ/USP**

Dalla Rosa, Jaqueline

Dinâmica da formação de crostas superficiais em função de práticas de preparo do solo e chuva simulada / Jaqueline Dalla Rosa.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.

145 p: il.

Tese (Doutorado) --Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Agregados 2. Chuva simulada 3. Condutividade hidráulica do solo 4. Crostas
5. Micromorfologia do solo 6. Porosidade do solo 7. Preparo do solo 8. Rugosidade do solo I. Título

CDD 631.44
D144c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, meu fôlego de vida e minha fonte de energia constante.

Ao meu orientador Miguel Cooper, pela confiança no meu trabalho, pelos ensinamentos, orientação, incentivo e paciência.

Ao pesquisador Frédéric Darboux, pela ajuda, orientação e ensinamentos durante o estágio de doutorado sanduíche na França (INRA).

Ao Programa de Pós-Graduação de Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudos (processo nº 2008 53591-08) e auxílio financeiro para realização do projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa concedida durante o Estágio de Doutorado sanduíche (PDEE) realizado no Exterior (Processo: BEX 1278/10-0).

Ao Dr. Luiz Roberto Martins Pinto pelo auxílio na realização das análises estatísticas;

A minha querida família, João & Giulia, obrigada pelo incentivo, ajuda e companheirismo.

Aos meus pais, Celso e Carmen e irmãos (Jackson, Lígia e Lia) pelo carinho incentivo e apoio de sempre.

Aos amigos Eunice e Luiz Roberto, Bia e família, Alinne Silva, Ana Paula e Eduardo e amigos da PIB pelos bons momentos compartilhados.

Aos colegas da pós-graduação, em especial à Laura, Mariana, Raul, Renata B., Renata M., Selene, Tatiana, e Thalita pelo apoio, ajuda nos trabalhos e companheirismo.

À bolsista de iniciação científica Carla Campanaro e aos estagiários pelo auxílio nos trabalhos de campo e análises realizadas.

À laboratorista Sonia pelo auxílio nas análises realizadas.

Aos laboratoristas Bernard Renaux e Lionel Cottenot, pela ajuda nos trabalhos desenvolvidos durante o estágio sanduíche, no INRA, França.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	11
1 INTRODUÇÃO	13
Referências	17
2 PROCESSO DE FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DE CROSTAS SUPERFICIAIS EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E CHUVA SIMULADA	21
Resumo	21
Abstract	21
2.1 Introdução	22
2.2 Desenvolvimento	23
2.2.1 Material e Métodos	23
2.2.2 Resultados	29
2.2.3 Discussão	42
2.3 Conclusões	45
Referências	45
3 EFEITO DA FORMAÇÃO DE CROSTAS SOBRE A POROSIDADE E ATRIBUTOS HÍDRICOS EM DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E CHUVA SIMULADA	47
Resumo	47
Abstract	47
3.1 Introdução	48
3.2 Desenvolvimento	50
3.2.1 Material e Métodos	50
3.2.2 Resultados	55
3.2.3 Discussão	83
3.3 Conclusões	88
Referências	89
4 EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO SOB CHUVA SIMULADA USANDO UM ÍNDICE DE RUGOSIDADE BASEADO EM SEMIVARIOGRAMAS	93
Abstract	93
4.1 Introdução	94
4.2 Desenvolvimento	96
4.2.1 Material e Métodos	96

4.2.2 Resultados.....	98
4.2.3 Discussão	104
4.3 Conclusões.....	107
Referências	107
5 DINÂMICA DE QUEBRA DOS AGREGADOS DO SOLO SOB CHUVAS SIMULADAS	111
Resumo	111
Abstract	111
5.1 Introdução.....	112
5.2 Desenvolvimento	114
5.2.1 Material e Métodos	114
5.2.2 Resultados e Discussão	121
5.3 Conclusões.....	131
6 CONCLUSÕES GERAIS	135
ANEXOS.....	139

RESUMO

Dinâmica da formação de crostas superficiais em função de práticas de preparo do solo e chuva simulada

As crostas são o resultado da degradação da estrutura superficial dos solos, favorecem a erosão e a degradação ambiental dos solos. Este estudo avaliou a dinâmica da formação de crostas superficiais e as consequências sobre a porosidade, condutividade hidráulica (K), retenção de água, densidade (D_s) e a rugosidade de um Argissolo Vermelho amarelo conduzido com diferentes sistemas de preparo do solo e aplicação de lâminas de chuva simulada. Avaliou-se também, através de um experimento em laboratório, os processos envolvidos na quebra dos agregados, sob chuvas simuladas. O experimento foi conduzido, nos anos de 2009 e 2010. Em parcelas de 15 x 30 m foram conduzidos os diferentes preparos do solo: preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e sem preparo (SP). Dentro das parcelas instalou-se micro-parcelas de 1m x 1m, onde foram aplicadas diferentes lâminas de chuva simulada (0, 27, 54 e 80 mm) com intensidade de 80 mm h⁻¹. Foram realizadas coletas de dados de rugosidade, medidas de K , coleta de amostras indeformadas de solo para análise da porosidade e confecção de lâminas delgadas, e também anéis cilíndricos para curva de retenção de água (CRA) e D_s do solo. No experimento de laboratório, utilizou-se dois solos (siltoso e argiloso) e duas classe de agregados (1-3 e 3-5 mm). Os agregados foram submetidos a diferentes chuvas simuladas (28mmh⁻¹ + EC forte; 28mmh⁻¹ + EC fraca; 90mmh⁻¹ + EC forte; 90mmh⁻¹ + EC fraca) e após avaliou-se o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP). A dinâmica da formação de crostas ocorreu de maneira diferenciada em ambos os sistemas de preparo. Nos sistemas de PC e PR a maior redução da porosidade, pelo efeito da chuva aplicada, ocorreu na camada da crosta e no sistema SP na camada da subcrosta. A camada da crosta foi responsável pela redução da porosidade e K , e aumento da D_s nos sistemas PC e PR. As maiores umidades volumétricas observadas nas CRA ocorreram no sistema de PR e as menores no PC e não demonstraram evolução entre as chuvas aplicadas. A rugosidade superficial do solo variou em função dos sistemas de preparo realizados. Os sistemas conservacionistas (PR e SP) apresentaram maior rugosidade no primeiro ano, no segundo ano a maior rugosidade foi observada no sistema SP. O PC demonstrou nos dois anos estudados a mesma tendência, em função das chuvas aplicadas, inicialmente ocorreu um aumento na rugosidade até uma chuva máxima diminuindo em seguida. No experimento em laboratório, as maiores reduções no DMP ocorreram até a lâmina de 3 e 2 mm para o solo argiloso e siltoso, respectivamente. Nas quantidades iniciais de chuva (lâminas iniciais) a intensidade foi determinante na redução do DMP, com o aumento da quantidade de chuva a energia cinética (EC) passou a influenciar a redução do DMP. A intensidade de 28 mm h⁻¹ promoveu as maiores reduções do DMP possivelmente pelo maior tempo de exposição dos agregados ao molhamento.

Palavras - chave: Encrostamento; Micromorfologia; Análise de imagens;
Condutividade hidráulica; Porosidade; Rugosidade; Estabilidade
de agregados

ABSTRACT

Dynamic of surface crust formation in different tillage systems and simulated rainfall

The crusts are the result of degradation of the surface structure of the soil, favoring erosion and environmental degradation of soils. This study evaluated the dynamics of the develop surface crusts and its consequences on the porosity, hydraulic conductivity (K), water retention, bulk density (D_s) and the roughness of a Typic Hapludult conducted with different systems of tillage and application of sheets simulated rainfall. Was also evaluated through the an laboratory experiment, the processes involved in the breakdown of aggregates under simulated rainfall. The experiment was conducted in the years 2009 and 2010. In plots of 15 x 30 m were installed the soil tillage: conventional tillage (CT), reduced tillage (RT) and no-tillage (NT). Inside of the plots was installed micro-plots of 1m x 1m, which were applied different sheets of simulated rainfall (0, 27, 54 and 80 mm) with intensity of 80 mm h⁻¹. Roughness data, K measurements, sampling of undisturbed soil samples for porosity analysis and preparation of thin sections, and also cylindrical rings for water retention curve (SWRC) and D_s , were collected. In the laboratory experiment two soils (Silt Loam and Clay Loam) and two aggregate classes (1-3 and 3-5 mm) were used. The aggregates were submitted to different simulated rainfall (28mmh⁻¹ + KE strong; 28mmh⁻¹ + KE weak; 90mmh⁻¹ + KE strong; 90mmh⁻¹ + KE weak) and after the mean weight diameter (MWD) was evaluated. The dynamics of crust formation occurred differently in both tillage systems. In the CT and RT systems the major reduction of the porosity, by effect of the applied rainfall, occurred in the crust layer and in the NT system occurred in the subcrosta layer. Crust formation was responsible for reducing the porosity and K , and increasing D_s , in RT and CT systems. The higher volumetric moisture contents observed in CRA occurred in the PR system and the lowest in CT. The CRA did not show changes between the applied rainfall. The surface roughness of the soil varied in relation to the tillage systems. RT and NT systems showed a higher roughness in the first year during the second year a higher roughness was observed in the NT system. The CT in the two years studied showed the same trend of evolution according to of applied rainfall, initially there was an increase in roughness up to a maximum rain and then decrease. In the laboratory experiment, the largest DMP reductions occurred in the 3 and 2 mm rainfall for the Silt Loam and Clay Loam soils, respectively. In the initial amounts of rainfall, the intensity was determinant in the MWD reduction. With the increase in the amount of rainfall, the kinetic energy influences the MWD reduction. The intensity of 28 mm h⁻¹ produced the greatest reductions in DMP, possibly due to the longer exposure of the aggregates to wetting.

Keywords: Crusting; Micromorphology; Image analysis; Hydraulic conductivity; Porosity; Surface roughness; Aggregate stability

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Descrição	Unidade
Arr	Forma de poros arredondados	-----
Arr_p	Poros arredondados pequenos	156-15600 μm^2
Arr_m	Poros arredondados médios	15600-156000 μm^2
Arr_g	Poros arredondados grandes	>156000 μm^2
Alon	Forma de poros alongados	-----
Alon_p	Poros alongados pequenos	156-15600 μm^2
Alon_m	Poros alongados médios	15600-156000 μm^2
Alon_g	Poros alongados grandes	>156000 μm^2
ACP	Análise de Componentes Principais	-----
CRA	Curva de retenção de água no solo	-----
Comp	Forma de poros complexos	-----
Comp_p	Poros complexos pequenos	156-15600 μm^2
Comp_m	Poros complexos médios	15600-156000 μm^2
Comp_g	Poros complexos grandes	>156000 μm^2
Cro	Camada analisada (crosta)	-----
DMP	Diâmetro médio Ponderado	mm
Ds	Densidade do solo	Kg dm^{-3}
g	grandes (tamanho de poros)	>156000 μm^2
K	Condutividade hidráulica	mm h^{-1}
p	pequenos (tamanho de poros)	156-15600 μm^2
PC	Preparo Convencional	-----
PR	Preparo Reduzido	-----
SP	Sem preparo	-----
Sub	Camada analisada (subcrosta)	-----
θ	Umidade volumétrica do solo	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
0, 27, 54, 80	Lâminas de chuva aplicada	mm

1 INTRODUÇÃO

A erosão compreende o desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo. A degradação da estrutura superficial do solo pela chuva (crostas superficiais) tem papel importante sobre a erosão do solo. Dessa forma, para compreensão do processo erosivo e da dinâmica envolvida na degradação da superfície do solo é importante conhecer os fatores que causam a erosão. Segundo Morgan, (2008) os fatores que controlam a erosão são as características da chuva e do solo, condições de topografia, e a natureza da cobertura do solo.

Sob chuva, a estrutura superficial do solo é alterada levando ao desenvolvimento de crostas e a redução da rugosidade. Essa alteração depende das características da chuva (intensidade, distribuição de tamanho de gota, energia cinética, entre outros), do solo (umidade inicial, textura, distribuição, tamanho e estabilidade dos agregados, matéria orgânica) e aspectos relacionados ao sistema de preparo adotado (realização de revolvimento, intensificação do revolvimento e presença de cobertura).

O processo de formação de crostas ocorre através de dois mecanismos complementares: (1) Inicialmente ocorre a quebra da estrutura superficial (agregados) em finos fragmentos e/ou partículas primárias, envolvendo vários processos como a quebra por umedecimento rápido ("slaking"), devido à compressão do ar aprisionado no interior dos agregados, impacto das gotas da chuva na superfície do solo e dispersão físico-química da argila. (2) O segundo estágio dá-se pela redistribuição das partículas e/ou fragmentos dispersos sobre a superfície do solo, concentrando no topo da superfície (AGASSI et al., 1981; BRESSON, VALENTIN, 1993; LADO et al., 2004; LEVY et al., 1986; McINTYRE, 1958; RIES, HIRT, 2008).

Crostas superficiais geralmente apresentam densidade e espessura variável, o que depende especificamente da textura e das características intrínsecas de cada tipo de solo. Promovem consequências negativas no solo como a diminuição da infiltração e condutividade de água (BEDAIWY, 2008; BRANDÃO et al., 2006; FOX et al., 1998), a redução da porosidade (FOX et al., 2004a; PAGLIAI et al., 2004; PANINI et al., 1997; ROUSSEVA et al., 2002) favorecendo assim o aumento do

escoamento superficial e da erosão do solo; e degradação de áreas agrícolas. Em função disso, o estudo e monitoramento das crostas superficiais visando seu entendimento, controle ou atenuação, são importantes para o manejo e conservação do solo e da água, especialmente em regiões de clima tropical, onde a degradação do solo e os processos de erosão são intensificados.

Durante várias décadas o estudo de crostas superficiais tem sido foco de pesquisa em degradação do solo (BEDAIWY, 2008; VALENTIN, BRESSON 1992 e 1993; DULEY, 1939; FAN et al., 2008; FOX et al., 2004b; MALAM et al., 2011; MATERECHERA, 2009; e muitos outros). A dinâmica do processo de formação de crostas é bem conhecida nos solos de clima temperado, muito ainda precisa ser explicado, no entanto, em condições de clima tropical, envolvendo os solos e os sistemas de manejo aqui adotados.

A suscetibilidade do solo à formação de crostas depende da combinação de propriedades e processos físicos, químicos e biológicos do solo, sendo mais comum a ocorrência em solos áridos e semi-áridos, com baixo teor de matéria orgânica, especialmente na camada superficial, com alto conteúdo de silte e baixa estabilidade dos agregados (ABU-AWWAD, 1998; ARSHAD, MERMUT, 1988; MERMUT et al., 1995).

Neste sentido, a matéria orgânica do solo (MO) desempenha papel fundamental na estrutura do solo, pois, atua como agente cimentante dos agregados, limitando, o colapso da estrutura em condições de molhamento (EMERSON, 1977), podendo, dessa forma, reduzir a formação de crostas superficiais. O teor de MO no solo foi considerado um dos principais fatores que controlam a estabilidade de agregados de solos com porcentagem de sódio trocável baixa (LADO, et al. 2004; ELLIOT, 1986), confirmando, assim sua importância sobre a estabilidade estrutural dos solos. Do mesmo modo, em um estudo, realizado sobre um Nitossolo Vermelho de textura muito argilosa com aplicação de doses de composto orgânico para avaliar o encrostamento do solo, observou-se que a ausência e/ou pequenas doses do composto causaram a formação de crostas, enquanto que as doses maiores promoveram melhoria na estrutura o que foi comprovado com aumento da porosidade de condução e retenção de água (TOMA, 2008).

O estudo e o detalhamento do processo de formação de crostas do solo pode ser monitorado diretamente através da mudança da morfologia ou indiretamente

através da diminuição da capacidade de infiltração ou aumento na resistência da superfície. Muitos cientistas, desde (DULEY, 1939), incluem a necessidade de usar microscópio em estudos de crostas, através de análises micromorfológicas (BRANDÃO et al., 2006; COUSIN et al., 2005; VALENTIN, BRESSON, 1992). A utilização das técnicas de monitoramento direto (análises micromorfológicas), associadas ao monitoramento indireto (testes de infiltração, condutividade hidráulica, e teste de resistência da superfície) é o mais aconselhável (VALENTIN, BRESSON, 1997), pois dessa forma pode-se obter um maior detalhamento, abordando as mudanças micromorfológicas na estrutura superficial do solo, assim como a consequência desta sobre a condutividade e infiltração de água, porosidade, entre outros.

A maioria dos estudos sobre formação de crostas baseia-se no detalhamento do processo para os sistemas de manejo que envolvem o revolvimento do solo; pouco se sabe, no entanto, sobre a dinâmica desse processo nos sistemas conservacionistas. É fato que os sistemas conservacionistas mobilizam minimamente o solo, mantendo a maior parte dos resíduos culturais como estratégia para evitar a erosão, porém muito pouco é conhecido sobre o processo de formação de crostas em condições de preparos conservacionistas. Além disso, estudos que detalhem os processos de formação de crostas, sob condições de clima tropical, ainda fazem-se necessários. Alguns dos trabalhos já desenvolvidos nessas condições foram (BRANDÃO et al. 2006; CASTILHO et al. 2011; FARIA et al. 1997; SCHAEFER et al. 2002; TOMA 2008).

A formação de crostas levando em consideração diferentes quantidades de cobertura foi estudada por Schaefer et al. (2002) que observaram no solo mais exposto com cobertura variando de 0 a 20%, a maior formação de crosta erosional, enquanto que com a superfície coberta integralmente (100% de cobertura) não ocorreu formação de crostas. Por outro lado, dois anos após a redução no preparo do solo em um vinhedo e com incorporação de plantas de cobertura ao sistema produtivo, não foi observada redução da formação de crostas comparada com o manejo convencional, que revolve o solo com frequência até 15cm de profundidade (USÓN, POCH, 2000).

Crostas superficiais, em um solo cultivado e exposto, ocasionaram a redução da porosidade da superfície, devido à diminuição dos poros de condução (PANINI et al. 1997). Da mesma forma, a redução da macroporosidade do solo, na camada de

0-6 cm, devido à perda dos poros de condução, ocorreu em função da formação de crostas, e foi observada em uma área cultivada com milho e submetida à chuva simulada (ROUSSEVA et al., 2002). A redução desses poros de condução, pode ocasionar a redução na infiltração e condutividade hidráulica, assim, como verificaram Patin et al. (2012) em um estudo realizado por um longo período (2003 à 2009), com diferentes culturas, em que a porcentagem de formação de crostas superficiais afetou a infiltração de água no solo. Entretanto, a redução do cultivo do solo, para o cultivo mínimo, associado a utilização de adubação orgânica, demonstrou efeito positivo no balanço de água, emergência e rendimento de milho de solos com presença de crostas, comparado aos solos cultivados com sistema convencional (GICHERU et al., 2004).

Os objetivos propostos com este estudo foram:

Objetivo Geral: Avaliar a dinâmica da formação de crostas superficiais em um Argissolo vermelho amarelo conduzido com diferentes sistemas de preparo do solo e aplicação de chuva simulada. Avaliar também, em um estudo em laboratório, os processos de desestruturação dos agregados do solo sob diferentes chuvas simulada.

Objetivos específicos

- Descrição micromorfológica da formação e evolução de crostas em função dos preparos de solo realizados e chuvas simulada aplicada;
- Avaliar a influência da formação de crostas superficiais sobre a porosidade, a condutividade hidráulica, a retenção de água e a D_s em função dos sistemas de preparo e chuvas simulada aplicada.
- Avaliar a rugosidade superficial do solo nos diferentes sistemas de preparo e evolução sob chuvas simulada aplicada.
- Avaliar os processos de quebra dos agregados de dois solos (um siltoso e um argiloso) sob diferentes condições de chuvas simulada aplicada.

Hipóteses testadas

- 1) No sistema de preparo convencional do solo, maior quantidade de crostas superficiais são formadas, comparado aos sistemas menos revolvidos;

- 2) No preparo reduzido e no sistema sem preparo, menor quantidade de crostas superficiais são formadas, em função da cobertura mantida na superfície do solo e do menor ou não revolvimento do solo;
- 3) As crostas causam redução da condutividade hidráulica, da porosidade e da continuidade entre os poros;
- 4) Os sistemas de preparo com maior intensidade de revolvimento causam aumento na rugosidade superficial e a chuva simulada causa redução.

Referências

- ABU-AWWAD, A.M. Irrigation management in arid areas affected by surface crust. **Agriculture Water Management**, Amsterdam, v. 38, p. 21-32, 1998.
- AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on the infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 848-881, 1981.
- ARSHAD, M.A.; MERMUT, A.R. Micromorphological and physico-chemical characteristics of soil crust types in Northwestern Alberta Canada. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 724-729, 1988.
- BEDAIWY, M.N.A. Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils. **Catena**, Amsterdam, v. 72, p. 270-281, 2008.
- BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D.; RUIZ, H.A.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M.A.; MENEZES, S.J.M.C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 30, 13-21, 2006.
- BRESSON, L.M.; VALENTIN, C. Soil surface crust formation: contribution of micromorphology, In: HUMPHREYS, A.J.R.-V.A.G.S. (Ed.). **Developments in Soil Science**. Elsevier, p. 737-762. 1993.
- CASTILHO, S.C.P.; COOPER, M.; JUHÁSZ, C.E.P. Influence of crust formation under natural rain on physical attributes of soils with different textures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1893-1905, 2011.
- COUSIN, I.; MALAM ISSA, O.; LE BISSONNAIS, Y. Microgeometrical characterisation and percolation threshold evolution of a soil crust under rainfall. **Catena**, Amsterdam, v. 62, p. 173 - 188, 2005.
- DULEY, F. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v. 4, p. 60 - 64, 1939.

ELLOIT, E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 50, p. 627-633, 1986.

EMERSON, W.W. Physical properties and structure. In J.S. RUSSELL and E.L. GREACEN (ed.). **Soil factors in crop production in a semi-arid environment**. St. Lucia: Univ. of Queensland Press, Australia. 1977. p. 78–104.

FAN, Y.; LEI, T.; SHAINBERG, I.; CAI, Q. Wetting Rate and Rain Depth Effects on Crust Strength and Micromorphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1604 -1610, 2008.

FARIA, J.C.; SCHAEFER, C.E.; RUIZ, H.A.; COSTA, L.M. **Soil physical degradation and sealing development: the effects of weed control methods**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 3., Ouro Preto, 1997. Anais... Ouro Preto, 1997. p.187-193.

FOX, D.M.; BRYAN, R.B.; FOX, C.A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 109 - 120, 2004a.

FOX, D.M.; BRYAN, R.B.; PRICE, A.G. The role of soil surface crusting in desertification and strategies to reduce crusting. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 99, p. 149-159, 2004b.

FOX, D.M.; LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. **Catena**, Amsterdam, v. 32, p. 87-100, 1998.

GICHERU, P.; GACHENE, C.; MBUVI, J.; MARE, E. Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, p. 173-184, 2004.

LADO, M.; PAZ, A.; BEN-HUR, M. Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 935-942, 2004.

LEVY, G.J.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Factors Affecting the Stability of Soil Crusts in Subsequent Storms. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 196 - 201, 1986.

MALAM ISSA, O.; VALENTIN, C.; RAJOT, J.L.; CERDAN, O.; DESPRATS, J.F.; BOUCHET, T. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 167, 22-29, 2011.

MATERECHERA, S.A. Aggregation in a surface layer of a hardsetting and crusting soil as influenced by the application of amendments and grass mulch in a South African semi-arid environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 251-259, 2009.

Mc INTYRE, D.S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 85, p. 185 -189, 1958.

MERMUT, A.R.; LUK, S.H.; RÖMKENS, M.J.M.; POESEN, J.W.A. Micromorphological and mineralogical components of surface sealing in loess soils from different geographic regions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 66, p. 71 - 84, 1995.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. 3rd ed. Blackwell Publishing. 2008, 304 p.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 131-143, 2004.

PANINI, T.; TORRI, D.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M.; SANCHIS, M.P.S. A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. **Catena**, Amsterdam, v. 31, p. 199 - 218, 1997.

PATIN, J.; MOUCHE, E.; RIBOLZI O.; CHAPLOT, V.; SENGTAHEVANGHOUNG, O.; LATSACHAK, K.O.; SOULILEUTH, B.; VALENTIN C. Analysis of runoff production at the plot scale during a long-term survey of a small agricultural catchment in Lao PDR. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 426-427, p. 79-92, 2012.

RIES, J.B.; HIRT, U. Permanence of soil surface crusts on abandoned farmland in the Central Ebro Basin/Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 72, p. 282 - 296, 2008.

ROUSSEVA, S.; TORRI, D.; PAGLIAI, M. Effect of rain in the macroporosity at the soil surface. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, p. 83 - 94, 2002.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 668-679, 2002.

TOMA, R.S. **Efeito da aplicação de composto orgânico sobre o processo de encrostamento e a recuperação de solos degradados pela erosão hídrica**. 2008. 111 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

USÓN, A.; POCH, R.M. Effects of tillage and management practices on soil crust morphology under a Mediterranean environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 191-196, 2000.

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 55, p. 225 - 245, 1992.

VALENTIN, C.;BRESSION, L.M. Soil crusting. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C.; STEWART, B.A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.89-107. (Advances in Soil Science).

2 PROCESSO DE FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DE CROSTAS SUPERFICIAIS EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E CHUVA SIMULADA

Resumo

O impacto das gotas de chuva na superfície do solo e a deposição de partículas provocam a modificação da estrutura superficial do solo promovendo o desenvolvimento de crostas. O objetivo deste estudo foi avaliar através da análise e descrição micromorfológica de lâminas delgadas a dinâmica da formação de crostas em diferentes sistemas de preparo e chuva simulada. O experimento foi conduzido nos anos de 2009 e 2010. Em parcelas de 15 x 30 m foram implantados diferentes preparos do solo: preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e sem preparo (SP). Dentro das parcelas, instalou-se as micro-parcelas de 1m x 1m, e aplicou-se diferentes lâminas de chuva simulada (0, 27, 54 e 80 mm) com intensidade de 80 mm h⁻¹. Nas micro-parcelas coletou-se uma amostra indeformada, a qual consistia em um bloco de solo de 0,07 x 0,05 x 0,12m. Os blocos foram impregnados com resina e após endurecimento e secagem total foram confeccionadas lâminas delgadas (4,5cm x 8cm) e descritas utilizando microscópio óptico. Foi confeccionada uma lâmina delgada para cada chuva (0, 27, 54 e 80 mm) e cada preparo do solo, totalizando assim, 12 lâminas para o ano de 2009 e 12 para o ano de 2010. O processo de formação de crostas ocorreu com dinâmica diferenciada em cada sistema de preparo. O preparo convencional apresentou formação de crostas a partir de 27 mm de lâmina de chuva e aumentou a camada encrostada com o aumento da chuva. O preparo reduzido e o sistema sem preparo apresentaram condições de superfície irregulares com as chuvas aplicadas, ou seja, não demonstraram modificações constantes da crosta com o aumento da lâmina de chuva, como constatado no preparo convencional.

Palavras chave: Encrostamento; Micromorfologia; Preparo convencional; Preparo reduzido; Sem preparo

Abstract

The impact of the raindrop at the soil surface and deposition of particles causes the modification of soil surface structure promoting the development of crusts. This study evaluated the dynamics of soil crusting, through description and micromorphological analysis of thin sections. The experiment was conducted in the years 2009 and 2010. In plots of 15 x 30 m were implanted soil tillage: conventional tillage (CT), reduced tillage (RT) and no tillage (NT). Inside the plots, were installed micro-plots with 1m x 1m and applied different sheet of simulated rainfall (0, 27, 54 and 80 mm) with an intensity of 80 mm h⁻¹. In these micro-plots were collected an undeformed sample, which consisted of a block of soil of 0.07 x 0.05 x 0.12 m. The blocks were impregnated with resin and after hardening and drying; thin sections were prepared (4.5 cm x 8 cm) and described using optical microscopy. A thin section was made for each rain (0, 27, 54 and 80 mm) and each soil management

practices, totaling 12 thin sections for each year. The crusts formed were different in each tillage system. In the CT system was observed crusting from 27 mm rain. These crusts increased with rain. RT and NT systems showed irregular surface conditions with the applied rainfall, i.e., non-constant evolution was noted with the increasing precipitation, as found in the CT.

Keywords: Crusting; Micromorphology; Conventional tillage; Reduced tillage; No-tillage

2.1 Introdução

O impacto das gotas de chuva na superfície do solo e a acomodação de partículas do solo provocam a modificação da estrutura superficial promovendo o desenvolvimento de crostas. Essa modificação depende das características da chuva (intensidade, altura, distribuição de tamanho de gota, energia cinética, etc.) e do solo (umidade inicial, textura, distribuição, tamanho e estabilidade dos agregados). Crosta pode ser definida como uma camada de espessura, densidade e rigidez variáveis, e ocorre na superfície do solo através da degradação superficial causada pela chuva. É caracterizada por apresentar maior densidade e resistência a penetração, além de poros menores e baixa condutividade hidráulica (SHAINBERG et al., 1992).

Crostas superficiais ocorrem sob chuva ou irrigação, através de dois estágios principais. O primeiro é a quebra da estrutura superficial (agregados) em finos fragmentos e/ou partículas primárias, envolvendo vários processos, como quebra por umedecimento rápido, por compressão do ar aprisionado no interior dos agregados por quebra mecânica pelo impacto da gota e por dispersão físico-química da argila. O segundo estágio ocorre pela redistribuição das partículas e/ou fragmentos dispersos no topo da superfície do solo (BRESSON, VALENTIN, 1993; LADO et al., 2004; RIES, HIRT, 2008).

O primeiro estágio, acima mencionado, originará crostas estruturais e, o segundo estágio, crostas deposicionais. Ou seja, crostas estruturais são caracterizadas pelo rearranjo "in situ" das partículas sem evidências de movimento lateral. Já crostas deposicionais são formadas pela translocação de partículas finas depositadas em curtas distâncias da origem. Ainda, as crostas erosionais consistem de somente uma fina, rígida e lisa camada superficial enriquecida de finas partículas (VALENTIN, BRESSON, 1992).

A degradação da superfície do solo pelas crostas ocorre em função do adensamento, obstrução e redução dos poros e aumento da resistência hidráulica. Essas conseqüências causam a redução da infiltração e da condutividade da água (BEDAIWY, 2008; BRANDÃO et al., 2006; MCINTYRE, 1958; RIES, HIRT, 2008; VALENTIN, BRESSON, 1992) e, conseqüentemente, favorecem a erosão e a degradação ambiental.

O estudo e o detalhamento do processo de formação de crostas do solo podem ser monitorados diretamente pela mudança da morfologia ou indiretamente pela diminuição da capacidade de infiltração ou aumento na resistência da superfície. Muitos cientistas, desde (DULEY, 1939), relatam a necessidade de usar microscópio em estudos de crostas, fazendo uso de análises micromorfológicas (VALENTIN, BRESSON, 1992).

A análise micromorfológica permite observar os componentes estruturais do solo, possibilitando melhor visualização do comportamento da estrutura e do espaço poroso do solo em áreas sob processo de degradação (LIMA et al., 2005). Esta técnica permite ainda observar características como a espessura da crosta, a porosidade, que inclui distribuição, forma, continuidade e tamanho de poros. A utilização das técnicas de monitoramento direto (análises micromorfológicas), associadas ao monitoramento indireto (testes de infiltração, condutividade hidráulica, e resistência da superfície) é o mais aconselhável (VALENTIN, BRESSON, 1997), pois, dessa forma, pode-se obter um maior detalhamento, abordando as mudanças micromorfológicas na estrutura superficial do solo, assim como a conseqüência desta sobre a condutividade e infiltração de água, porosidade, entre outros.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a dinâmica da formação de crostas superficiais, pela análise e descrição micromorfológica de lâminas delgadas, em um Argissolo vermelho amarelo conduzido com três sistemas de preparo do solo e aplicação de chuva simulada.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Material e Métodos

2.2.1.1 Desenvolvimento experimental

O experimento foi realizado em Piracicaba/SP, Brasil, (22°42'S, 47°36'W) sobre um Argissolo vermelho amarelo de textura arenosa (EMBRAPA, 2006). Os atributos químicos do solo para a camada de 0-20cm são: pH em $\text{CaCl}_2=5,11$; $\text{MO}=32 \text{ g dm}^{-3}$; $\text{P}=5 \text{ g dm}^{-3}$; $\text{K}=0,8 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Ca}=23 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Mg}=12 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{H+Al}=28 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Al}=0,43 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{SB}=35,8 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{CTCefetiva}=63,8 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{V}= 56 \%$. Onde: CaCl_2 : pH extraído com CaCl_2 0,01M; MO: Matéria orgânica; P: fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: magnésio; H+AL: hidrogênio + Alumínio (acidez potencial) ; SB: Soma de bases; T: CTC efetiva; V: saturação por bases. A composição granulométrica do solo estudado, com fracionamento da areia para a camada de 0-5 cm, e descrição granulométrica geral para as demais camadas encontra-se na tabela 2.1.

Tabela 2.1- Descrição granulométrica do solo estudado (Argissolo vermelho-amarelo) Piracicaba, SP

Profundidade (cm)	Argila	Silte	-----Areia-----					Areia Total
			AMG	AG	AM	AF	AMF	
			-----g kg ⁻¹ -----					
0-5	164	20	6	20	155	471	164	816
0-20	178	38	-	-	-	-	-	783
40-60	257	52	-	-	-	-	-	691
80-100	262	37	-	-	-	-	-	702

AMG: Areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; AMF: areia muito fina

O clima da região de estudos é tropical Cwa, segundo classificação de Köppen. O relevo é suavemente ondulado e a altitude é de 542m. De acordo com a estação agrometeorológica da ESALQ/USP, que está localizada próximo do experimento (22°42'S; 47°38'W) a precipitação média anual para os dez últimos anos foi de 1.193mm. As três chuvas máximas mensais, em 24 horas, observadas durante este período ocorreram em março de 2002, maio de 2005 e janeiro de 2008, com 104, 139 e 87mm, respectivamente (Base de dados meteorológicos USP/ESALQ).

Implantação do experimento

Em novembro de 2008 realizou-se um preparo inicial do solo em toda área experimental, (uma aração + 3 gradagens) de forma a padronizar as condições de superfície do solo. A profundidade da aração, deste preparo inicial foi de 25 cm. Após foi realizada implantação de uma cultura de cobertura (*Brachiaria decumbens*

Stapf.), semeada a lanço sem incorporação, e densidade de semeadura de 13kg ha⁻¹ (Figura 2.1).

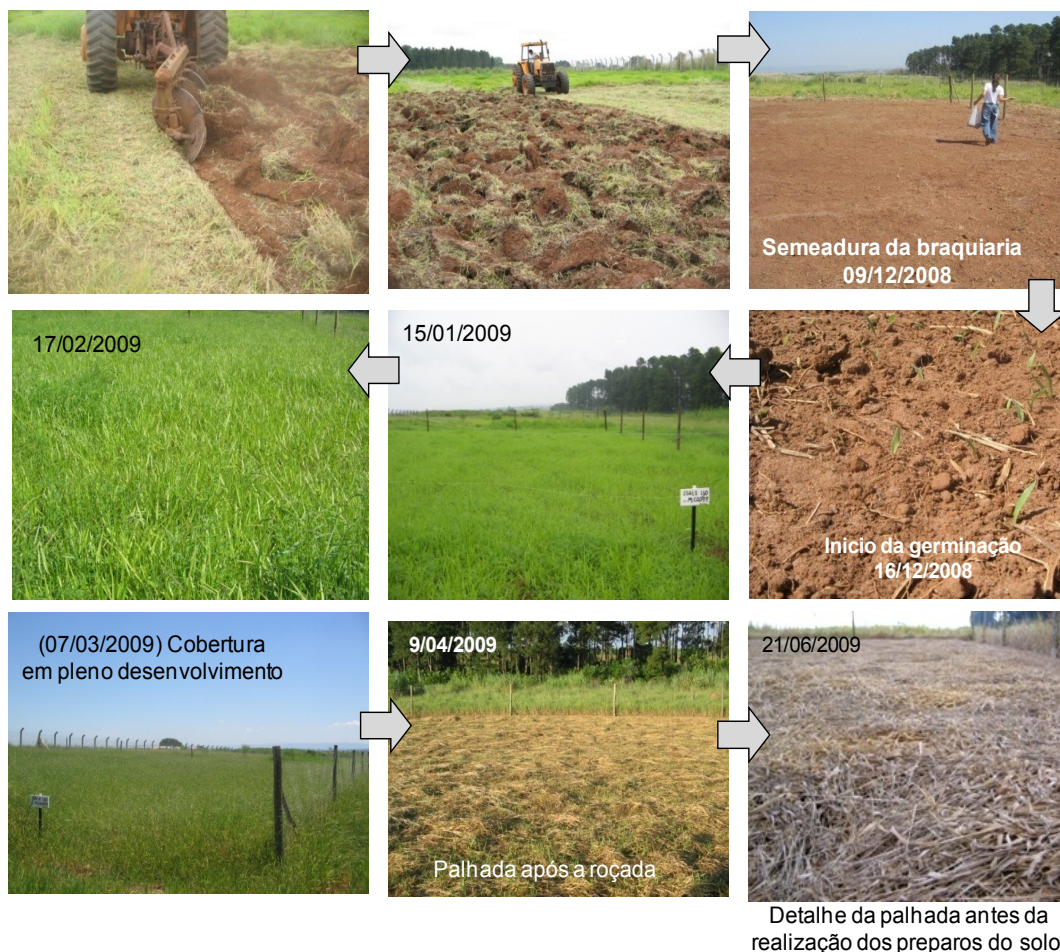


Figura 2.1 – Descrição das etapas iniciais de implantação do experimento até o estabelecimento da palhada, para o primeiro ano (2009) de estudo

Primeiro ano de condução do experimento (2009)

No início de abril de 2009 a braquiária se encontrava em estágio de pleno desenvolvimento, quando procedeu-se a roçada da massa vegetal com roçadeira motorizada manual, e o controle da rebrota das plantas foi realizado por dessecação com herbicida sistêmico Glyphosato, na dosagem de 4,0L ha⁻¹. A matéria seca produzida pela braquiária, na área de estudos, foi de 8.400 kg h⁻¹.

Em Junho de 2009 foram realizados os tratamentos que corresponderam a três sistemas de preparo do solo, com diferentes intensidades de revolvimento:

preparo convencional (PC), realizado com uma aração e duas gradagens, preparo reduzido (PR) com uma gradagem pesada e sem preparo (SP), sem movimentação na superfície do solo (Figura 2.2). As profundidades do preparo consistiram de 25 a 30 cm no PC e 15 a 20 cm no PR. Após o preparo do solo, a cobertura remanescente nas micro parcelas foi de 0%, 70 a 80% e 100 % para PC, PR e SP, respectivamente.

Cada tratamento (preparo do solo) constituiu em uma parcela de 7 x 30m, dentro das quais foram instaladas as micro parcelas de 1m x 1m. Nas micro parcelas aplicou-se diferentes lâminas de chuva simulada (0, 27, 54 e 80 mm) (Figura 2.3), para cada lâmina de chuva realizou-se três repetições, em micro-parcelas diferentes como descrito na figura 2.3. A intensidade da chuva simulada foi de 80 mm h^{-1} ($\pm 5 \text{ mm h}^{-1}$), aplicada logo após a realização dos preparos do solo, com um simulador de chuvas, operando a uma altura de 2,4 m sobre o solo. O simulador é composto por um bico em leque pendular, do tipo VeeJet Spray Nozzle (H/U-80100, Spraying Systems, Co.). A área de abrangência atingida pela chuva foi de 1 m^2 .



Detalhe dos diferentes preparos do solo



Detalhe da simulação de chuva nos diferentes preparos do solo

Figura 2.2 – Descrição do estabelecimento dos preparos do solo e das simulações de chuva. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo

Coleta e impregnação das amostras

As amostras para a análise micromorfológica foram coletadas na área experimental 24 horas após a realização da simulação de chuva, e após a realização das leituras da rugosidade do solo. Em cada micro-parcela coletou-se uma amostra indeformada, a qual consistia em um bloco de solo de 0,07 x 0,05 x 0,12 m, orientado à superfície, e acomodado em caixas de papel confeccionadas para este fim.



Figura 2.3 – Esquema do delineamento experimental e detalhe de cada tratamento antes (a), (c), (e) e após a aplicação da lâmina de 80 mm de chuva (b), (d), (f)

No laboratório, os blocos de solo foram secos ao ar durante 15 dias, e posteriormente secos em estufa por mais 48 horas a uma temperatura de 40 °C. Com os blocos já secos iniciou-se o processo de impregnação das amostras. Os blocos de solo foram colocados individualmente em potes plásticos e acondicionados em câmaras de vácuo, para facilitar a penetração da solução de impregnação (CASTRO et al., 2003). A impregnação foi realizada de acordo com metodologia proposta por (MURPHY, 1986), onde uma porção da resina poliéster

“crystal” foi misturada ao monômero de estireno, o qual é utilizado para reduzir a viscosidade da resina e facilitar a penetração na amostra (CASTRO et al., 2003). Além disso, na mistura de resina e monômero de estireno foi adicionado um pigmento fluorescente (UVITEX OB) que, sob luz fluorescente, permite a distinção entre o material sólido e os poros (MURPHY et al., 1977).

A solução de impregnação foi colocada em pequenas quantidades e aos poucos nas amostras, até esta se tornar totalmente coberta pela solução. Após totalmente imersas na solução de impregnação, as amostras foram colocadas para secar ao ar, aproximadamente por 15 a 20 dias e, quando a resina estava quase endurecida, foram transferidas para estufa a 40 °C para secagem completa.

Lâminas delgadas para microscópio óptico e descrição micromorfológica

Depois dos blocos totalmente impregnados e endurecidos, foram cortadas fatias (aproximadamente 0,5 cm de espessura) verticais e orientadas a superfície, das quais foi confeccionada uma lâmina delgada de seção fina (4,5 cm x 8 cm) para microscópio óptico. Foi confeccionada uma lâmina delgada para cada chuva aplicada (0, 27, 54 e 80 mm) e cada preparo do solo, totalizando assim, 12 lâminas para o ano de 2009 e 12 para o ano de 2010.

As lâminas delgadas foram confeccionadas no laboratório de Ciência do Solo (UR Science du sol) em Orléans, na França. As fatias foram inicialmente coladas em uma lâmina de vidro e posteriormente a face do bloco foi polida em uma lixadeira mecânica. Em seguida, o polimento fino foi realizado manualmente com carbureto de silício verde (600 mesh com grãos de 18 a 22µm), até as lâminas atingirem a espessura desejada (30 µm), tomando-se o cuidado para que a espessura fosse uniforme em toda a lâmina e fazendo o controle da espessura no microscópio por meio da extinção padrão do quartzo presente.

A descrição micromorfológica, ocorreu inicialmente com um exame prévio em LUPA, a fim de se observar as feições e o comportamento geral da lâmina em função das lâminas de chuva e preparos do solo aplicados. Posteriormente com auxílio do microscópio óptico, procedeu-se nas lâminas delgadas a descrição micromorfológica seguindo os critérios propostos por (BULLOCK et al., 1985). Realizou-se também descrição da dinâmica do processo de formação e modificação das crostas em função das lâminas de chuva aplicada nos diferentes preparos do

solo. A classificação das crostas foi realizada conforme sugerem Valentin e Bresson, (1992)

Segundo ano de condução do experimento (2010)

Dando continuidade ao trabalho, após as coletas de solo em junho de 2009, a área experimental permaneceu em pousio até novembro de 2009, quando realizou-se a ressemeadura da braquiaria (13 kg ha^{-1}) e adubação nitrogenada de cobertura com 200 kg ha^{-1} de N, realizadas à lanço sem incorporação.

Todas as etapas seguintes até o momento da segunda coleta (junho 2010) foram realizadas da mesma forma que no anterior (2009). A matéria seca produzida pela braquiaria, na área de estudos em 2010, foi de 10.400 kg h^{-1} .

Neste segundo ano de experimento, a porcentagem de cobertura remanescente nas micro parcelas após o preparo do solo, a foi de 0%, 80 a 85% e 100 % para PC, PR e SP, respectivamente. Possivelmente a maior porcentagem de cobertura no PR foi devido a maior produção de matéria seca neste ano de estudo.

É importante ressaltar que durante o período de pousio, período que antecedeu a realização dos preparos (dezembro de 2008 à maio de 2009, e julho de 2009 até maio de 2010), a área experimental foi atingida pelas chuvas naturais. Especialmente nos preparos menos revolvidos como o PR e o SP, a chuva natural pode ter influenciado a dinâmica de modificação da estrutura superficial do solo e consequentemente a formação de crostas. Em função disso, vale salientar que as chuvas naturais acumuladas para o período de estudo, foram de 554 mm (dezembro de 2008 à maio de 2009) e 1348 mm (julho de 2009 à maio de 2010) (Base de dados meteorológicos USP/ESALQ).

2.2.2 Resultados

2.2.2.1 Dinâmica da formação de crostas no ano de 2009

Formação da crosta no PC em função das lâminas de chuva aplicada

Conforme foi aumentando o volume de chuva aplicada, 0, 27, 54 e 80 mm a estrutura superficial do solo degradou e a presença de crosta foi se tornando evidente.

O processo de encrostamento foi semelhante com a aplicação de 27 e 54 mm de chuva. Constatou-se a presença de uma camada de grãos de quartzo, limpos, moderadamente a bem selecionados, de maior tamanho, na parte superior e, menor tamanho mais abaixo (conforme descrito no ANEXO A). Sobre a camada de grãos de quartzo formou-se uma fina camada de recobrimento com material fino e microagregados. Logo abaixo da camada de grãos de quartzo, ocorreu acúmulo de material fino, denotando uma laminação desse material acumulado (Figura 2.4 B, C). Esse material fino acumulado, foi decorrente da iluviação dos constituintes finos do solo (argila e matéria orgânica). O processo de desprendimento das partículas ocasionado pelo efeito do impacto das gotas de chuva proporcionou rearranjo do material grosso e promoveu a iluviação do material fino que se depositou e se acomodou (concentrou) logo abaixo da camada de grãos de quartzo.

Quando a lâmina da chuva aumentou para 80mm, a crosta formada havia maior espessura do que as chuvas de menor volume e constatou-se, da mesma forma que nas chuvas de 27 e 54 mm, a presença de camadas de grãos de quartzo verticalmente orientados e selecionados conforme o tamanho (Figura 2.4D). Ou seja, verificaram-se camadas de grãos de quartzo de tamanho maior, intercaladas com linhas de material fino e camadas de grãos de quartzo de tamanho pequeno. Do mesmo modo que observado nas chuvas de 27 e 54mm, na chuva de 80 mm também ocorreu uma fina camada de material fino acumulado, abaixo da camada de grãos de quartzo. Neste sistema de preparo observou-se o domínio de poros de empilhamento e cavidades irregulares, em todas as chuvas aplicadas (ANEXO A).

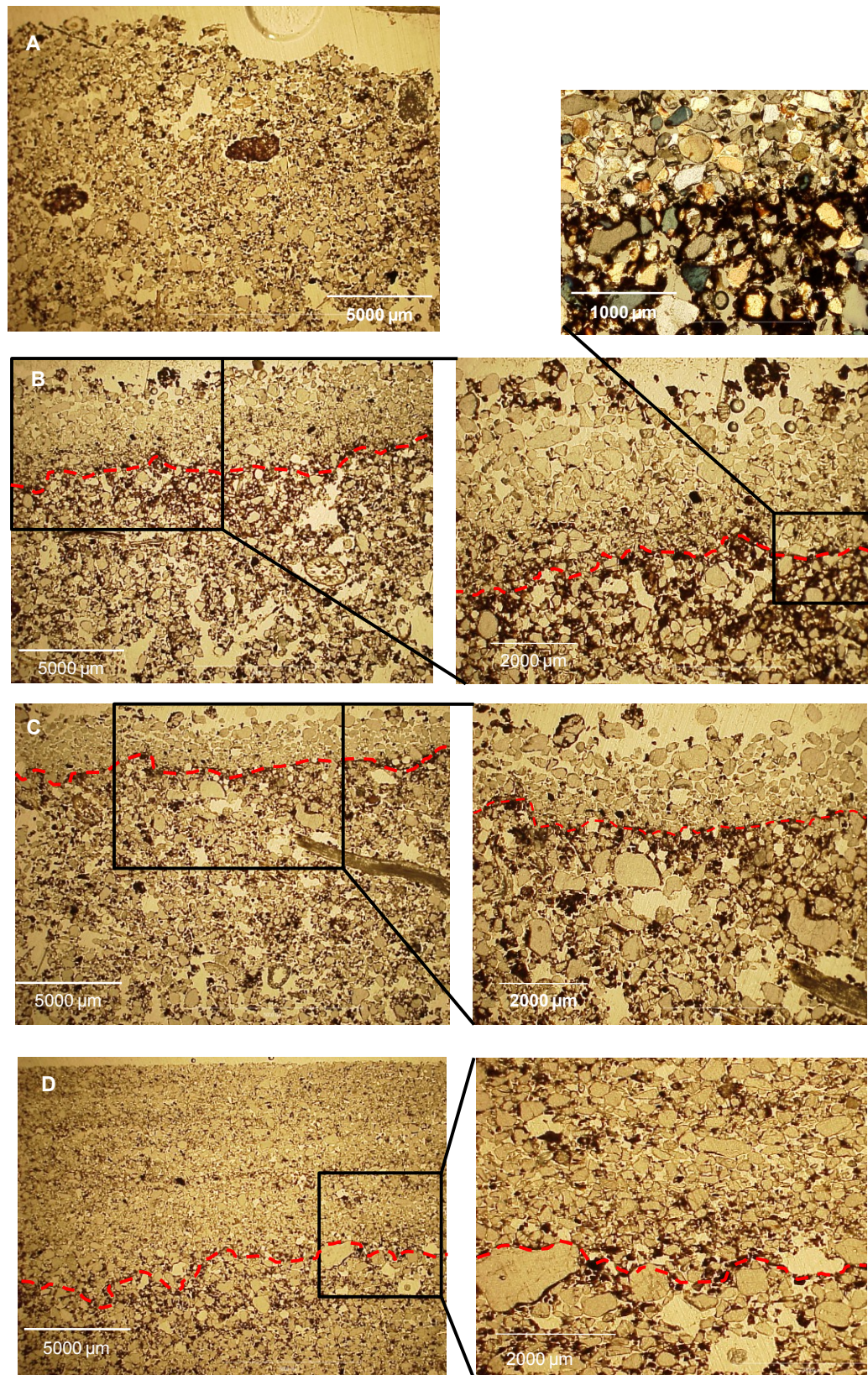


Figura 2.4 – Detalhes da crosta no PC para as lâminas de chuva aplicada em 2009, sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. A, B, C, D correspondem a 0, 27, 54 e 80 mm, respectivamente

Formação da crosta no PR em função das lâminas de chuva aplicada

Conforme a chuva foi sendo aplicada, 0, 27, 54 e 80 mm a estrutura superficial do solo demonstrou maior perturbação e disposição irregular (Figura 2.5). Apresentou uma linha mais densa composta por material fino acumulado, inclusive, onde não ocorreu simulação de chuva (PR0), demonstrando assim o efeito da chuva natural. Acima dessa linha de material fino acumulado, situou-se uma camada de material bastante perturbado, não regular ao longo da superfície e com presença de porosidade do tipo cavidades irregulares e vesículas (descrito no ANEXO B).

Com a lâmina de 27mm observou-se uma camada de solo muito irregular e dispersa de aproximadamente 8 a 10 mm de espessura, distribuída superficialmente de forma irregular. Não foi possível observar muitas feições de material orientado, como observado no PC. As feições constatadas aqui foram de material fino, acumulado em algumas áreas, material grosseiro, disposto de forma desorientada na superfície da lâmina, e algumas zonas de material grosso, orientado na camada dispersa. Poros do tipo vesículas e cavidades irregulares também ocorreram. Com aplicação da lâmina de 54 mm de chuva, o material da superfície apresentou-se também irregular, algumas zonas da superfície demonstraram organização do material por camadas, porém com menos evidencia do que observado na chuva de 27 mm.

A aplicação de 80 mm de chuva proporcionou comportamento semelhante ao observado na de 27 mm. A espessura da camada da crosta variou de 3 a 8 mm e apresentou-se desuniforme e sem organização. Presença de material fino acumulado, atravessando toda a lâmina, localizada abaixo da camada de material disperso (Figura 2.5 D).

Possivelmente, as irregularidades observadas na superfície e na formação da crosta tem relação com o semi preparo realizado, que causou quebra parcial da estrutura superficial, pela ação do implemento, e a cobertura remanescente efetuou a proteção da superfície contra o impacto direto das gotas, evitando assim que a superfície degradasse de tal forma como observado no PC.

Neste sistema de preparo (PR), houve o domínio de poros do tipo cavidades irregulares e vesículas (ANEXO B).

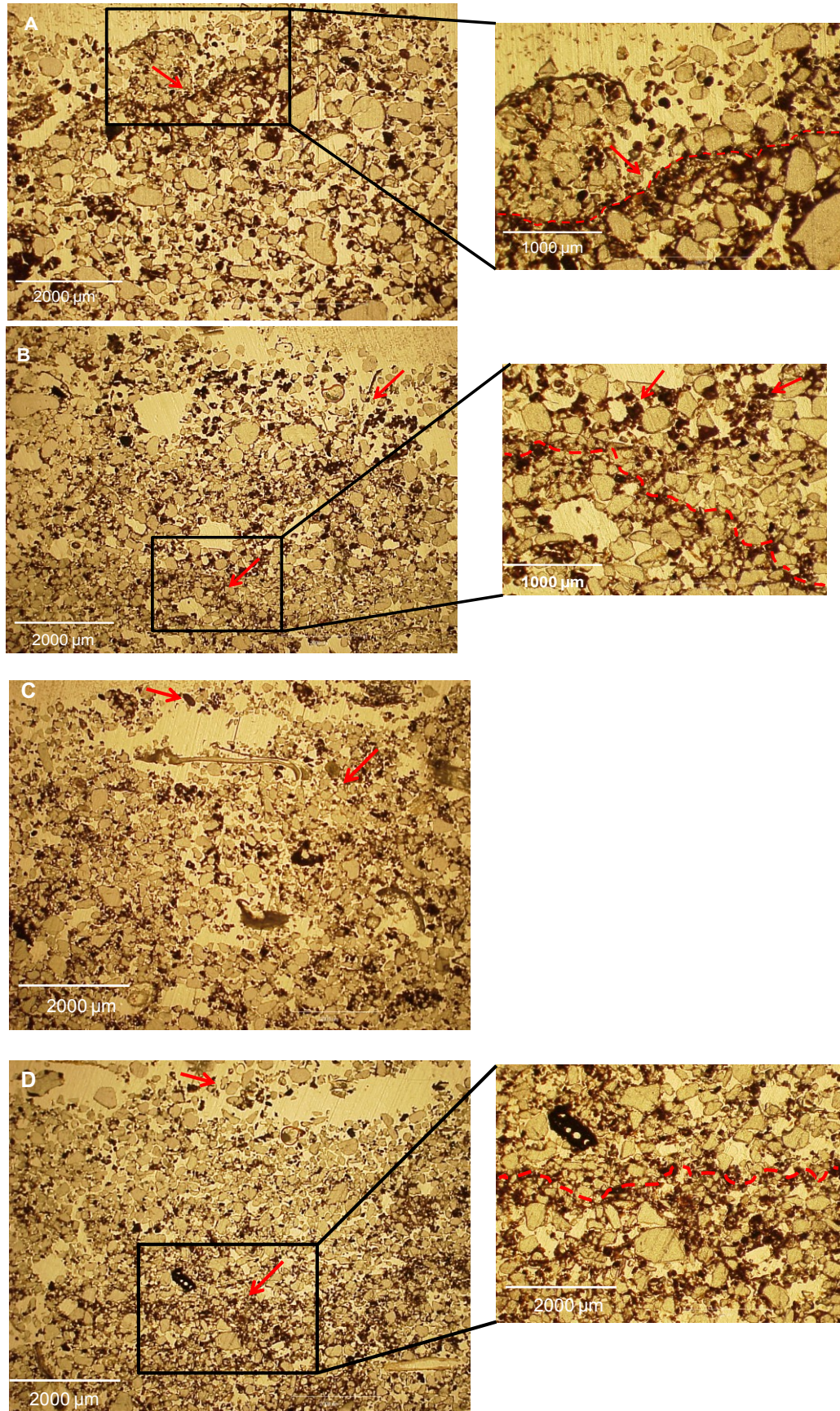


Figura 2.5 - Detalhes da crosta no PR para as lâminas de chuva aplicada em 2009, sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. A, B, C e D correspondem a 0, 27, 54 e 80 mm, respectivamente

Formação da crosta no SP em função das lâminas de chuva aplicada

Quando a chuva não foi aplicada, ocorreu recobrimento da superfície do solo com material fino acumulado, ao longo de toda a superfície do solo, observado na lâmina. Sobre esse material fino, acumularam-se grãos de quartzo, isolados e aleatórios. Essa laminação com material fino ocorreu já onde não houve aplicação de chuva simulada (0mm), indicando assim, efeito da chuva natural nesse sistema de preparo (Figura 2.6A).

Com aplicação de uma lâmina de 27 mm de chuva observou-se a formação de camadas irregulares de solo com material disperso, e desorganizado. Essa camada irregular e dispersa tinha, em média, 10 mm de espessura. Diferente da superfície onde não foi aplicada chuva (0mm), aqui não ocorreu laminação no topo da superfície com material fino. Entretanto, dentro desta camada de 10 mm ocorreram zonas irregulares com acúmulo de material fino (Figura 2.6B).

Quando a lâmina de chuva foi de 54 mm constatou-se também uma camada irregular de solo, com material muito disperso, e desorganizado. Observa-se a presença de uma lâmina de material fino acumulado, concentrada a alguns milímetros abaixo da superfície do solo, semelhante ao observado com aplicação de 27 mm de chuva. (Figura 2.6C).

Com 80 mm de chuva aplicada, a crosta foi pouco pronunciada, ocorreu somente em parte da superfície da lâmina um acúmulo de material fino, semelhante ao observado em SP0. O restante da lâmina foi bastante irregular, sem organização e orientação de material grosso (Figura 2.6D) e (ANEXO C).

Neste sistema de preparo houve o domínio de poros do tipo cavidades irregulares e vesículas (ANEXO C).

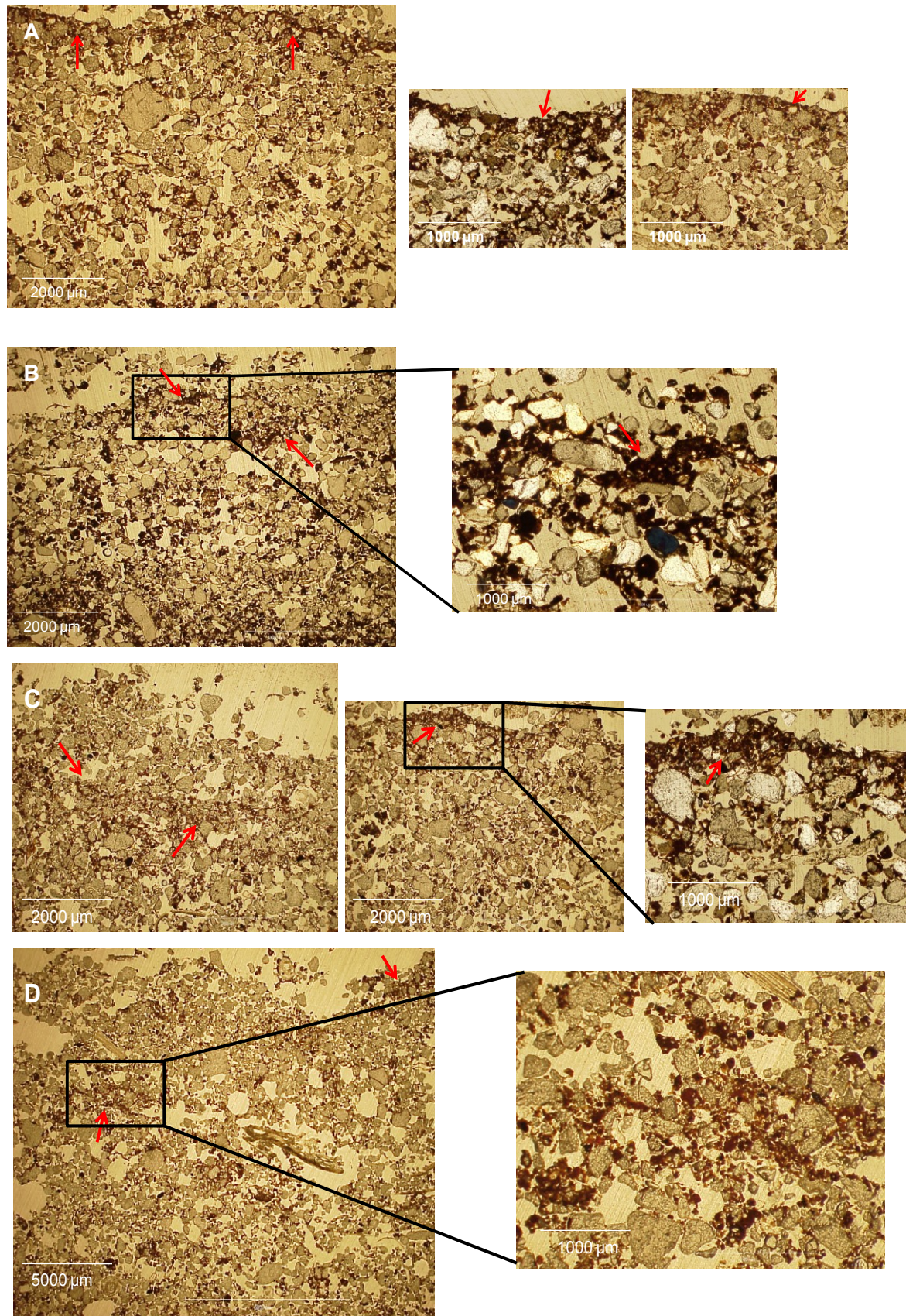


Figura 2.6 - Detalhes da crosta no SP para as lâminas de chuva aplicada em 2009, sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. A, B, C e D correspondem a 0, 27, 54 e 80 mm, respectivamente

2.2.2.2 Dinâmica da formação de crostas no ano de 2010

Formação da crosta no PC em função das lâminas de chuva aplicada

O processo de formação de crostas observado em 2010 para o PC foi muito semelhante ao observado em 2009, somente para a chuva de 54 mm observaram-se algumas feições não observadas em 2009.

Sem aplicação de chuva (0 mm) a superfície do solo não apresentou formação de crostas. (Figura 2.7A). Conforme a lâmina aplicada aumenta, (27, 54 e 80mm) a estrutura superficial do solo evoluiu e a presença de crosta foi se tornando evidente. Com a aplicação de uma lâmina de 27mm constatou-se a presença de uma camada de grãos de quartzo, organizados e selecionados em profundidade conforme o tamanho. Logo abaixo desta, ocorreu um acúmulo de material fino ao longo de toda lâmina delgada (Figura 2.7B).

Quando a chuva aplicada foi de 54 mm, observou-se, além da camada de grãos de quartzo acumulada superficialmente e da laminação com material fino, um grande acúmulo de material fino (argila e matéria orgânica) concentrado internamente na camada de grãos de quartzo (Figura 2.7C). Possivelmente, esta feição observada na lâmina foi decorrente da deposição do material fino dentro de uma depressão, pois, o material fino, disperso pela ação da chuva foi transportado e depositado nesta depressão.

Com aplicação da lâmina de chuva de 80 mm, a crosta formada apresentou maior espessura e constatou-se, da mesma forma que nas outras chuvas, a presença de camadas de quartzo acomodados em profundidade organizados conforme o tamanho (Figura 2.7D). Essas camadas de grãos de quartzo apresentaram-se intercaladas com laminações de material fino, conforme descrito no ANEXO D. O material fino acumulado, abaixo da camada de grãos de quartzo, observado com a aplicação das chuvas, é decorrente da iluviação dos constituintes finos do solo. O processo de desprendimento das partículas ocasionado pelo efeito do impacto das gotas de chuva proporcionou a reorganização do material grosso e promoveu a iluviação do material fino que se depositou (concentrou) logo abaixo da camada de grãos de quartzo. Neste sistema de preparo observou-se o domínio de poros de empilhamento e cavidades irregulares (ANEXO D).

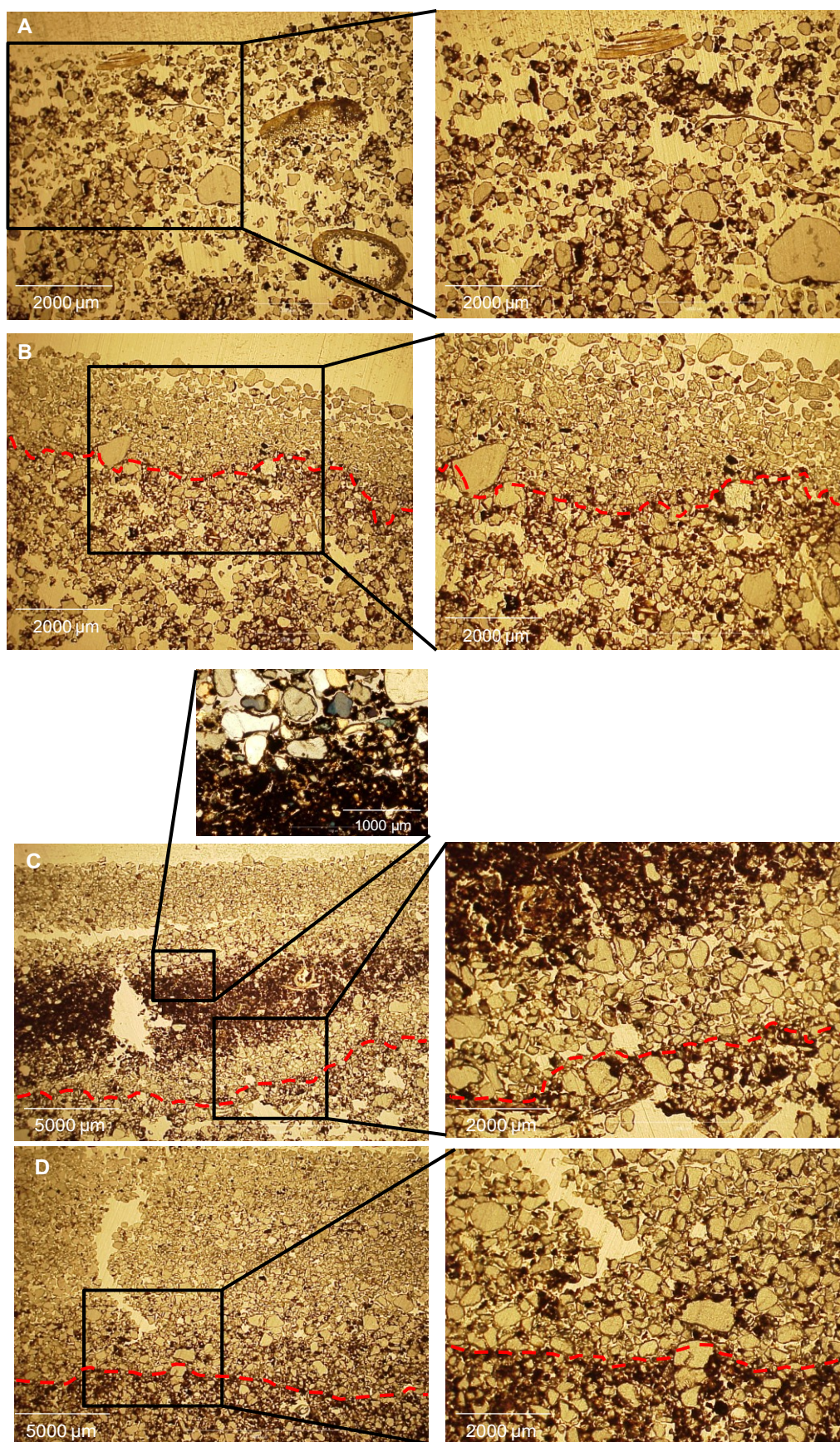


Figura 2.7 – Detalhes da crosta no PC para as lâminas de chuva aplicada em 2010, sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. A, B, C e D correspondem a 0, 27, 54 e 80 mm, respectivamente

Formação da crosta no PR em função das lâminas de chuva aplicada

Com 0 e 27 mm de lâmina de chuva aplicada, a superfície do solo apresentou-se com aspecto de disposição irregular de material, o que possivelmente é atribuído ao semi-preparo realizado. Além disso, com 27 mm de chuva aplicada observou-se algumas áreas de material depositado de forma organizada (Figura 2.8B). Com lâmina de 54 mm de chuva, a superfície demonstrou disposição irregular de material, com zonas de acúmulo de grãos de quartzo demonstrando organização incipiente (Figura 2.8C). Apresentou também laminações internas de material fino acumulado.

Quando a lâmina aumentou para 80mm a orientação em profundidade de material grosso (grãos de quartzo) foi mais evidente, porém também com frequência irregular na superfície do solo, ocorrendo somente em algumas zonas (Figura 2.8D e ANEXO E).

Esse aumento de zonas de material orientado deve-se ao aumento da chuva. Já a característica de irregularidades na disposição do material superficialmente se deve ao tipo de preparo. O semi preparo realizado incorpora parcialmente a cobertura na superfície do solo, dessa forma algumas zonas ficam protegidas e outras ficam expostas. Com a aplicação crescente da chuva, as partes da superfície do solo que encontravam-se descobertas foram atingidas, promovendo o mesmo efeito do sistema descoberto (PC) e, assim, estas zonas da superfície modificaram, causando a orientação do material grosso e promovendo a deposição do material fino. Neste sistema de preparo observou-se o domínio de poros de empilhamento, cavidades irregulares e vesículas (ANEXO E).

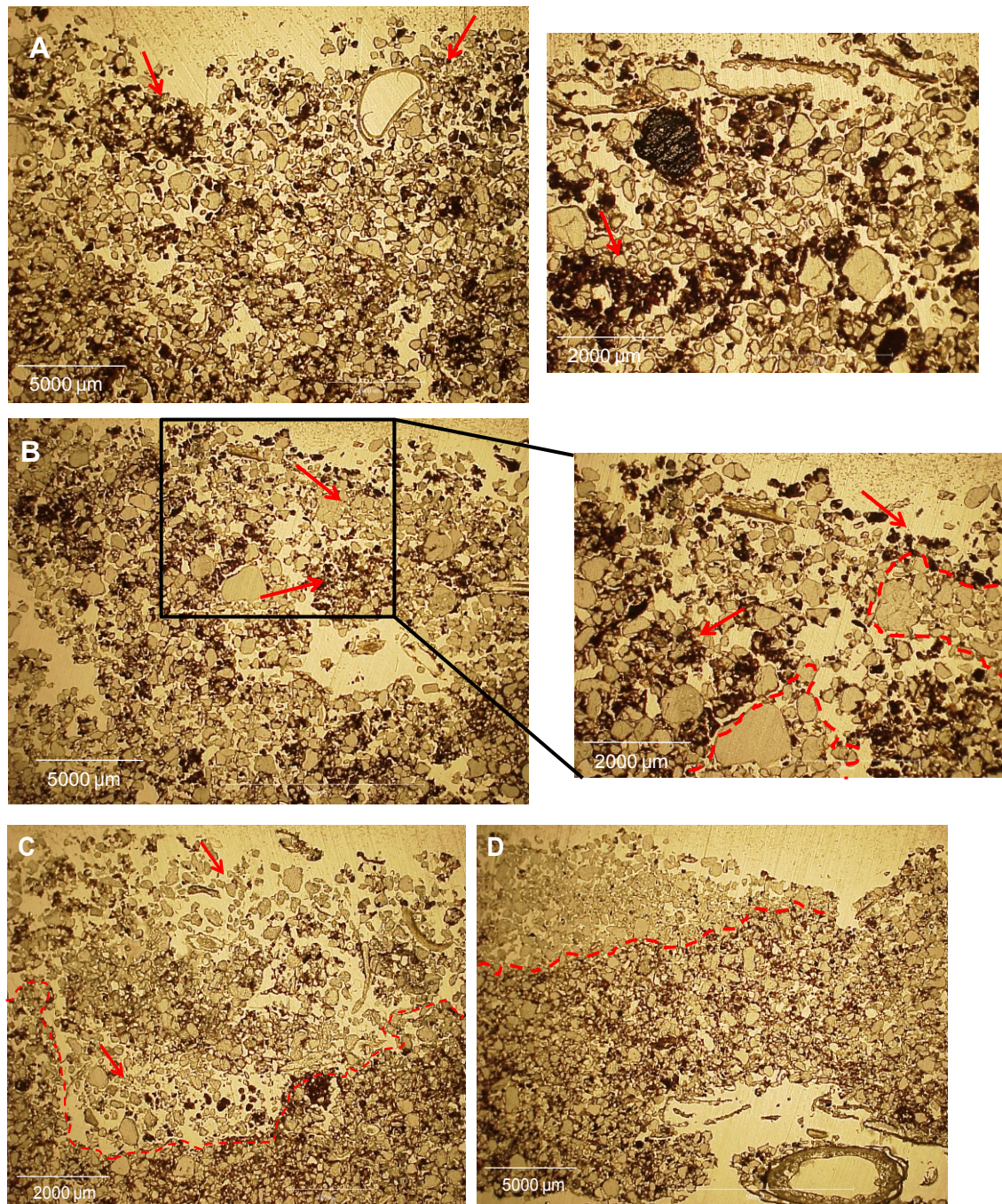


Figura 2.8 – Detalhes da crosta no PR para as lâminas de chuva aplicada em 2010, sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. A, B, C e D correspondem a 0, 27, 54 e 80 mm, respectivamente

Formação da crosta no SP em função das chuvas aplicadas

Com chuvas de 0 e 27 mm, a superfície do solo apresentou recobrimento com material fino acumulado. Tal recobrimento ocorreu somente em algumas partes da superfície da lâmina, o restante apresentou material mais solto e desorganizado (Figura 2.9A e B). A presença de material fino superficialmente ocorreu já onde não

aplicou-se chuva (0 mm), o que indica a ocorrência de efeito da chuva natural nesse sistema de preparo.

Em SP54 constatou-se a presença de uma camada de material disposto de forma irregular na superfície do solo e também recobrimento superficial com material fino. Em algumas áreas internas desta camada, verificou-se a presença de laminas de material fino acumulado (Figura 2.9C).

Com 80 mm de chuva aplicada a crosta foi pouco pronunciada, ocorreu em algumas áreas da superfície da lâmina acúmulo de material fino, semelhante ao observado em SP0 e SP27, o restante da lamina apresentou-se bastante irregular sem organização e orientação de material (Figura 2.9D).

Neste sistema de preparo não ocorreu nenhuma feição de organização de material grosso (grãos de quartzo) como observado no PC e em algumas áreas da lâmina no PR. Esse efeito pode ser atribuído a cobertura do solo, que evitou a ação desagregante das gotas da chuva na superfície do solo. As feições observadas fazem menção a uma laminação que recobre algumas zonas da superfície do solo, possivelmente ocasionada pela dispersão do material fino pela ação da chuva. Neste sistema de preparo observou-se o domínio de poros de empilhamento, cavidades irregulares, vesículas fissuras e canais (ANEXO F).

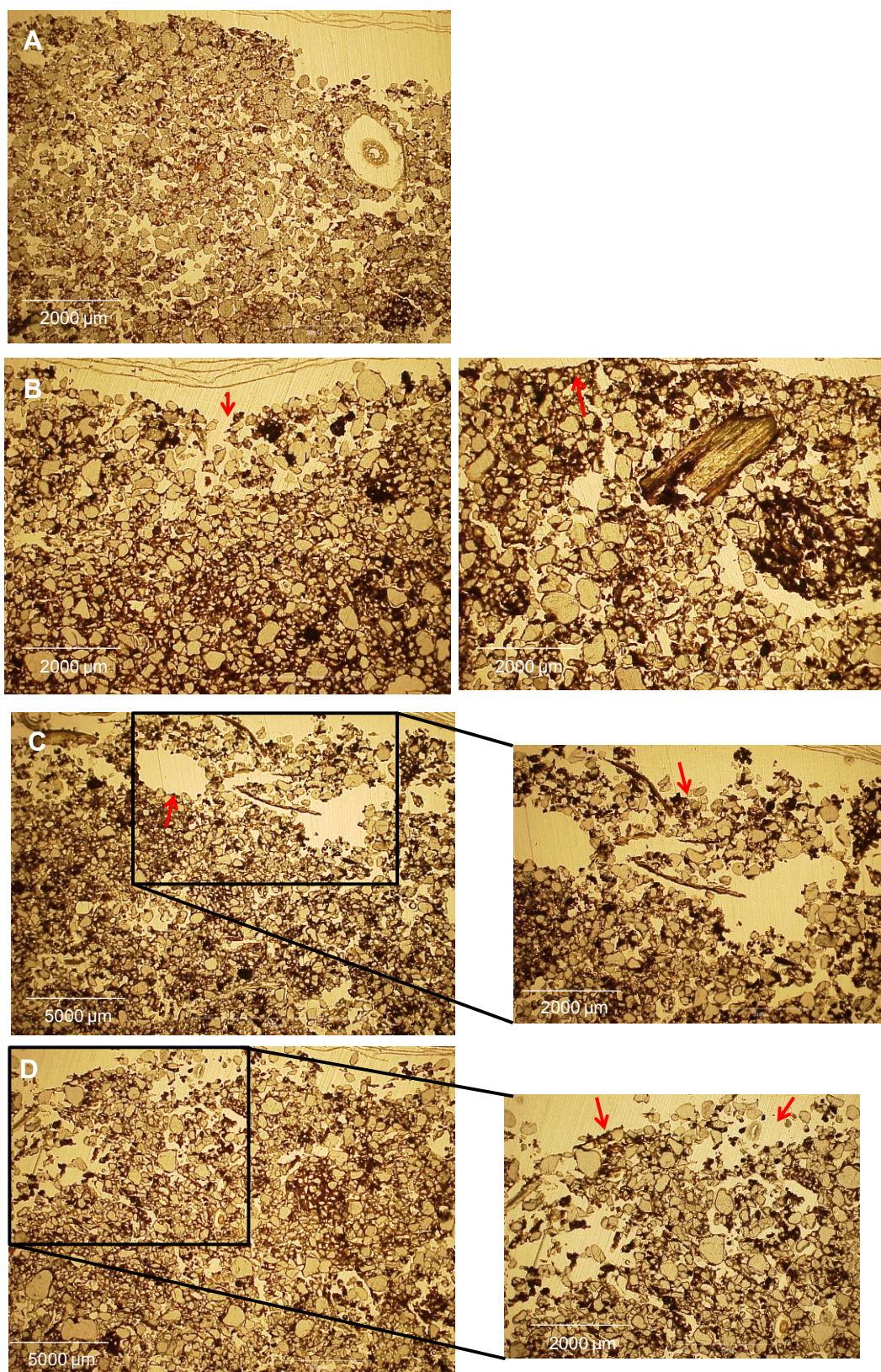


Figura 2.9 – Detalhes da crosta no SP para as chuvas aplicadas em 2010. sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. A, B, C e D correspondem a 0, 27, 54 e 80 mm, respectivamente

2.2.3 Discussão

Evolução da crosta no PC em função do aumento da lâmina de chuva

O processo de formação de crostas e conseqüente degradação da superfície do solo no PC foram semelhantes nos dois anos de estudo. Após a realização do preparo do solo, o mesmo encontrava-se bastante revolvido e desagregado, em função do intenso preparo. A aplicação da chuva sobre o solo revolvido e descoberto causou degradação da estrutura superficial levando a ocorrência de crostas.

Os agregados foram quebrados e o material da superfície foi disperso pelo efeito das gotas da chuva. Posteriormente, o material desagregado e disperso foi reorganizado e orientado superficialmente. Os grãos de quartzo se dispuseram em lâminas conforme os seus tamanhos, até que se formou uma camada de grãos de quartzo, a qual apresentou maior espessura com aumento da lâmina de chuva aplicada. O material fino que constituía a camada superficial do solo, atingido pela chuva foi sendo iluviado e se depositou formando uma lâmina abaixo da camada de grãos de quartzo.

As crostas observadas no PC foram classificadas como estruturais do tipo “*Sieving*”, segundo a classificação proposta por Valentin e Bresson (1992). São desenvolvidas primeiramente pelo impacto das gotas, formam micro depressões e com a infiltração de água o material disperso se dispõe e se organiza em camadas. A diferenciação de tamanho de grãos de quartzo e o acúmulo de material fino dentro das crostas formadas (como observado na figura 2.4 B, C, D) resulta principalmente de peneiração mecânica, de modo que as partículas finas depositam-se mais profundamente (VALENTIN, BRESSON, 1992). Além disso, a translocação da argila e acúmulo numa fina camada pode ser explicada pela percolação de água. As principais feições micromorfológicas como classificação, empacotamento e orientação de partículas grossas e finas são relacionadas com as condições hidrodinâmicas de sedimentação das partículas (BRESSON, BOIFFIN, 1990; VALENTIN, BRESSON, 1992).

A porosidade predominante nas crostas deste sistema de preparo foi do tipo empilhamento e cavidades irregulares.

Evolução da crosta no PR em função do aumento da lâmina de chuva

Neste sistema de preparo, não se observou uma modificação persistente da superfície do solo e formação de crostas com o aumento das lâminas de chuva aplicada como observado no PC. A superfície do solo apresentou-se bastante perturbada, com disposição irregular, e em algumas zonas presença incipiente de material organizado por camadas intercaladas com grãos de quartzo de tamanho grande, pequeno e laminações de material fino. O mesmo comportamento foi constatado nos dois anos de estudo.

Essas características observadas neste sistema de preparo, são decorrentes do efeito do semi preparo associado a manutenção da cobertura o que promoveu proteção contra o impacto da gota evitando assim uma orientação das partículas em toda superfície como se observou no PC.

A superfície do solo onde não aplicou-se chuva (0 mm) apresentou certa evolução em algumas zonas, ou seja, o mesmo comportamento constatado onde aplicou-se chuva. Uma explicação para isso pode ser o efeito da chuva natural, uma vez que o implemento utilizado no semi-preparo não atingiu algumas partes da superfície, e dessa forma manteve-se o efeito da chuva natural na superfície do solo.

As crostas observadas neste sistema de preparo foram diferentes das observadas no PC. O observado neste caso foi uma camada irregular com algumas feições de organização de material pelo efeito da chuva, ora por lâminas de material fino acumulado, ora por zonas com acúmulo de grãos de quartzo. Em função da heterogeneidade, as crostas neste sistema de preparo foram classificadas como estruturais do tipo “Sieving” para as áreas atingidas diretamente pela chuva, e estruturais do tipo “Slaking” nas áreas onde o material apresentou-se mais irregular com orientação incipiente, conforme classificação de Valentin e Bresson, (1992). Crostas do tipo “Slaking” consistem em uma camada tipicamente apedal e geralmente não apresentam clara distinção textural, como por exemplo, separação de partículas entre grossas e finas.

O acúmulo de material fino internamente na camada superficial é decorrente da dispersão físico-química das partículas de argila, que migram internamente no solo com a infiltração de água (AGASSI et al., 1981). A porosidade predominante nas crostas deste sistema de preparo foram cavidades irregulares e vesículas.

Evolução da crosta no SP em função do aumento da lâmina de chuva

A cobertura permanente pela palhada de braquiaria protegeu a superfície do solo do impacto direto das gotas, assim a superfície não foi atingida e não evoluiu como observado no PC. Porém, o molhamento pelas chuvas promoveu dispersão da argila e recobrimento da superfície do solo com material fino.

Esse sistema de preparo apresentou pouca evolução estrutural da superfície do solo com as lâminas de chuva aplicada. Com aplicação de 27 mm a superfície se apresentou mais perturbada, mas de maneira geral foram observadas algumas feições de acúmulo de material fino superficialmente e em outros casos internamente nos primeiros centímetros do solo.

A não perturbação e não modificação da estrutura superficial do solo neste sistema de preparo pode ser atribuída à presença abundante de cobertura que protegeu a superfície do solo da ação impactante das gotas da chuva (Figura 2.10).

Possivelmente as feições observadas de laminações de material fino acumulado foram originadas pelo efeito da chuva natural, uma vez que foram também observadas em SP0, onde não se aplicou chuva. Pelo efeito do umedecimento ocorreu a dispersão do material fino do solo que foi depositado em lâminas pela infiltração de água (AGASSI et al., 1981), possivelmente este tenha sido o processo ocorrido neste sistema de preparo, uma vez que não ocorreu desagregação e dispersão da argila pela energia cinética das gotas em função da grande quantidade de cobertura vegetal (superfície 100% coberta).

Essas feições observadas neste sistema de preparo foram constatadas nos dois anos de estudo, de maneira levemente diferenciada entre as chuvas aplicadas. As crostas neste sistema de preparo foram classificadas como estruturais do tipo “Slaking” conforme classificação de Valentin e Bresson (1992). O acúmulo de material fino ocorreu recobrindo algumas áreas da superfície e outras áreas internamente na camada superficial.

2.3 Conclusões

O processo de formação de crostas ocorreu de forma diferenciada em cada sistema de preparo.

A análise das lâminas delgadas e a descrição micromorfológica permitiram satisfatória observação e conclusão dos processos e dinâmica envolvida na formação de crostas.

O preparo convencional apresentou formação de crostas a partir de 27 mm de lâmina de chuva e aumentou a camada encrostada com o aumento da chuva.

O preparo reduzido e o sistema sem preparo apresentaram condições de superfície irregulares com as chuvas aplicadas, ou seja, não demonstraram modificações constantes da crosta com o aumento da lâmina de chuva, como constatado no preparo convencional.

Referências

AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on the infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 848-881, 1981.

BEDAIWY, M.N.A. Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils. **Catena**, Amsterdam, v. 72, p. 270-281, 2008.

BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D.; RUIZ, H.A.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M.A.; MENEZES, S.J.M.C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.13-21,2006.

BRESSON, L.M.;BOIFFIN, J. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. **Geoderma**, Amsterdam, v. 47,p. 301-325, 1990.

BRESSON, L.M.;VALENTIN, C. Soil surface crust formation: contribution of micromorphology, In: HUMPHREYS, A.J.R.-V.A.G.S. (Ed.). **Developments in Soil Science**, Elsevier, 1993. p. 737-762.

BULLOCK, P.;FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton: Waine Research Publications,1985. 153p.

CASTRO, S.S.;COOPER, M.; SANTOS, M.C.;VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 107-164, 2003.

DULEY, F. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v. 4, p. 60-64, 1939.

EMBRAPA. Centro nacional de pesquisas com solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Brasília: Embrapa sistemas de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

LADO, M.; PAZ, A.; BEN-HUR, M. Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 935-942, 2004.

LIMA, H.V.; LIMA, R.L.C.; 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**, Viçosa, v. 29, p. 677-684, 2005.

Mc INTYRE, D.S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 85, p. 185 -189, 1958.

MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A.B. Academic Publ., 1986.149p.

MURPHY, C.P.; BULLOCK, P.; TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 98, p.498-508, 1977.

RIES, J.B.; HIRT, U. Permanence of soil surface crusts on abandoned farmland in the Central Ebro Basin/Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 72, p. 282 - 296, 2008.

SHAINBERG, I.; LEVY, G.J.; RENGASAMY, P.; FRENKEL, H. Aggregate stability and seal formation as affected by drops impact energy and soil amendments. **Soil Science**, Baltimore, v. p. 54, 113-119, 1992.

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 55, 225 -245, 1992.

3 EFEITO DA FORMAÇÃO DE CROSTAS SOBRE A POROSIDADE E ATRIBUTOS HÍDRICOS EM DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO E CHUVA SIMULADA

Resumo

Crostas superficiais resultam da degradação da estrutura superficial dos solos e consequentemente favorecem a erosão. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de crostas superficiais sobre a porosidade, a condutividade hidráulica (K), densidade do solo (D_s) e a retenção de água em um Argissolo vermelho amarelo, conduzido com três sistemas de preparo do solo e com a aplicação de chuva simulada. O experimento foi conduzido, nos anos de 2009 e 2010. Em parcelas de 15 x 30 m foram instalados os preparos do solo: preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e sem preparo (SP). Dentro das parcelas, instalou-se as micro-parcelas de 1m x 1m, nas quais foram aplicadas diferentes lâminas de chuva simulada (0, 27, 54 e 80mm) com intensidade de 80 mm h⁻¹. Nas micro-parcelas, foram realizadas as medidas de K e coleta de amostras indeformadas de solo (blocos de 0,07 x 0,05 x 0,12m). Os blocos foram impregnados com resina e após o endurecimento a análise de imagens foi realizada, considerando duas camadas analisadas (crosta e subcrosta). Pela análise de imagens obteve-se a porcentagem de área e o número de poros. Coletaram-se também anéis cilíndricos (2,5cm altura x 5cm diâmetro) para realização da curva de retenção de água (CRA) e densidade do solo (D_s). As variáveis medidas neste estudo demonstraram diferenças entre os anos avaliados (2009 e 2010). Nos sistemas de preparo convencional e preparo reduzido, a maior redução da porcentagem de área de poros, pelo efeito das lâminas de chuva aplicada, ocorreram na camada da crosta. O sistema sem preparo apresentou redução da porcentagem de área de poros em função das lâminas de chuva aplicada na camada da subcrosta. A camada da crosta foi responsável pela redução da porcentagem de área de poros e condutividade hidráulica e aumento da densidade do solo nos sistemas de preparo convencional e preparo reduzido. As maiores umidades volumétricas observadas nas curvas de retenção de água ocorreram no sistema de preparo reduzido e as menores no preparo convencional. As umidades volumétricas não demonstraram modificações em função das lâminas de chuva aplicada.

Palavras chave: Encrostamento; Área de poros; Condutividade hidráulica; Preparos do solo

Abstract

The surface crusts cause degradation of the surface structure of soil and soil erosion. The objective of this study was to evaluate the influence of soil crusting on the porosity, hydraulic conductivity (K), bulk density (B_d) and water retention in a Arenic Haplustults carried with three soil tillage systems and application of simulated rainfall. The experiment was conducted in the years 2009 and 2010. In the plots of 15 x 30 m were installed different tillage systems: conventional tillage (CT), reduced tillage (RT) and no-tillage (NT). Inside the plots, were installed the micro-plots with

size of 1m x 1m, which were applied different sheet of simulated rainfall (0, 27, 54 and 80mm) with an intensity of 80 mm h⁻¹. Measurements were performed of K, and sample collecting (blocks of soil 0.07 x 0.05 x 0.12 m). Image analysis were performed, considering layers (crust and subcrust). The blocks were impregnated with resin and after induration, the image analysis was performed. For image analysis were obtained the percentage of area and number of pores. Were collected to cylindrical rings (2.5 cm diameter x 5 cm height) to perform the soil water retention curve (SWRC) and bulk density. The variables measured in this study showed differences between the evaluated years (2009 and 2010). In the conventional tillage systems and reduced tillage the larger reduction in porosity, by effect of the applied rainfall, occurred in the layer of crosta. The no-tillage system showed a reduction in porosity as a function of applied rainfall in subcrosta layer. The layer of the crust was responsible for the reduction of area percentage of pores and hydraulic conductivity and increased density of the soil in conventional tillage and reduced tillage. The highest volumetric moisture observed in the water retention curves occurred in the reduced tillage and the lowest in conventional tillage. The soil volumetric moisture showed no changes depending on the applied sheet of rain.

Keywords: Crusting; Area of pores; Hydraulic conductivity; Soil tillage

3.1 Introdução

Crosta superficiais favorecem a erosão e causam degradação em solos do mundo todo, ocorrem sob chuva ou irrigação envolvendo dois estágios, principais. O primeiro é a quebra da estrutura superficial (agregados) em finos fragmentos e/ou partículas primarias, envolvendo vários processos como quebra por umedecimento rápido, devido à compressão do ar aprisionado no interior dos agregados, quebra mecânica e dispersão físico-química da argila. O segundo estágio dá-se pela redistribuição das partículas e/ou fragmentos dispersos na superfície do solo, concentrado no topo da superfície em alguns poucos milímetros (AGASSI et al., 1981, BRESSON, VALENTIN, 1993; LADO et al., 2004; LEVY et al. 1986; MCINTYRE 1958; RIES, HIRT, 2008).

As crosta superficiais geralmente apresentam densidade e espessura variável de acordo com a textura do solo. O aumento de sua espessura e densidade resulta na diminuição da infiltração e condutividade de água (BRANDÃO et al., 2006; BEDAIWY 2008; FOX et al., 1998; MCINTYRE 1958; VALENTIN, BRESSON 1992) com o aumento do escoamento superficial e da erosão do solo. A redução da condutividade hidráulica na camada encrostada depende fortemente da forma e continuidade dos poros que podem sofrer alterações devido à ação direta da chuva na superfície do solo. A energia cinética promove a desintegração dos agregados e

desprendimento das partículas que ao se depositarem na superfície do solo obstruem os poros, promovendo a redução e/ou alteração dos poros de condução (PANINI et al., 1997, ROUSSEVA et al., 2002)

A degradação da superfície do solo por meio da formação de crostas pode ocorrer com magnitudes diferentes, e depende principalmente de fatores como as características do solo (textura e estrutura), da chuva (intensidade, duração, energia cinética, entre outros) e das práticas culturais adotadas (intensidade de revolvimento e cobertura remanescente). Dessa forma, estudos recomendam a adoção de práticas reduzidas de cultivo, objetivando prevenir a degradação estrutural, a formação de crostas e as perdas dos solos por erosão (CASTRO et al., 2006; PAGLIAI et al., 2004) reduzindo-se os impactos ambientais.

Neste sentido, avaliando diferentes quantidades de cobertura, Schaefer et al. (2002) observaram que os solos mais expostos, com cobertura variando de 0 a 20%, apresentaram maior formação de crosta erosional, enquanto que os solos com superfície coberta integralmente (100% de cobertura) não apresentaram crostas. Por outro lado, dois anos após a redução no preparo do solo em um vinhedo e com incorporação de plantas de cobertura ao sistema produtivo, não foi observada redução da formação de crostas comparada com o manejo convencional, que revolve o solo com frequência até 15 cm de profundidade (USÓN, POCH 2000).

Sob solo cultivado e exposto observou-se redução da porosidade da superfície, fato atribuído a redução dos poros de condução devido à formação de crostas (PANINI et al., 1997). Semelhantemente constatou-se redução da macroporosidade do solo, na camada de 0 - 6 cm, devido à perda dos poros de condução pela formação de crostas, em uma área cultivada com milho e submetida à chuva simulada (ROUSSEVA et al., 2002). A formação de crostas superficiais, pela chuva simulada aplicada nos sistemas de preparo convencional e plantio direto, causou a redução da condutividade hidráulica saturada (SILVA, KATO, 1997) e os autores concluíram também que o preparo convencional foi mais suscetível à formação de crostas. A condutividade hidráulica de um solo cultivado e com presença de crosta foi 3 vezes inferior em comparação ao mesmo solo sem crosta (SOUZA et al., 2007). Da mesma forma, crostas sedimentares causaram redução em 50% na taxa de infiltração do solo resultando no aumento do escoamento superficial da água (RIES, HIRT 2008), assim também verificaram Patin et al. (2012)

que a porcentagem de formação de crostas superficiais afetou a infiltração de água no solo.

Em face ao exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da formação de crostas superficiais sobre a porosidade, a condutividade hidráulica e a retenção de água em um Argissolo Vermelho Amarelo, conduzido com três sistemas de preparo do solo e com a aplicação de chuva simulada.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Material e Métodos

Desenvolvimento experimental

Os procedimentos de desenvolvimento experimental, implantação dos tratamentos e aplicação das chuvas simuladas são os mesmos descritos no Capítulo 2 (páginas 24 à 26).

Avaliação da Porosidade

A avaliação da porosidade do solo foi realizada em amostras indeformadas coletadas na área experimental vinte e quatro horas após a simulação da chuva. Em cada micro parcela foi coletada uma amostra de solo que consistiu de um bloco de solo de 0,07 x 0,05 x 0,12 m, orientado à superfície, e acomodado em caixas de papel confeccionadas para este fim (Figura 3.1 a,b,c). O procedimento de amostragem foi realizado da mesma forma para os dois anos de experimento (2009 e 2010). Após a coleta os blocos foram impregnados, conforme já descrito no capítulo 2.

Depois de totalmente secos os blocos foram cortados com serra de diamante, lixados com um disco rotatório e com carbureto de silício (granulação grosseira (220 mesh com grãos de 53 a 62 μm)) e polidos também no disco rotatório com carbureto de silício (600 mesh com grãos de 18 a 22 μm).

Após o polimento de uma das faces do bloco, foram avaliados os parâmetros de distribuição e morfologia de poros, propostos por (MURPHY et al., 1977; RINGROSE-VOASE, 1991). Foram obtidas imagens (microfotografias digitais, 1cm x 1cm), em resolução de 1024 x 768 pixels, em 10x de aumento, com uma câmera

CCD Sony® acoplada a uma lupa Zeiss® com polarizador. Foi utilizada uma fonte luminosa ultravioleta no momento da aquisição das imagens para distinguir os poros do material grosseiro (Figura 3.2). A partir das imagens obtidas, os poros foram quantificados com o auxílio de programas desenvolvidos nos pacotes computacionais Noesis® Visilog 5.4 e Microsoft® Excel.

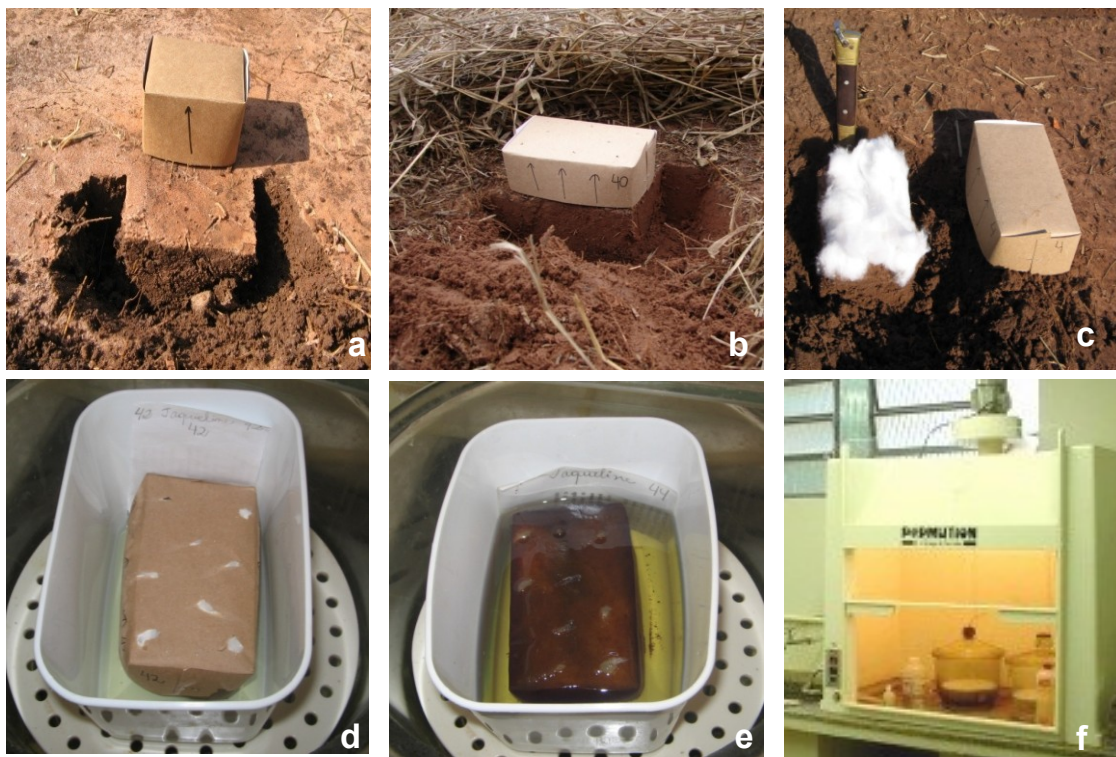


Figura 3.1 – Detalhe das amostras coletadas e impregnação. Coleta dos blocos à campo (a, b, c); detalhe da impregnação das amostras (d,e,f)

A quantificação dos poros foi realizada em duas camadas, “crosta”, a camada diretamente atingida pelas gotas da chuva e “subcrosta” a camada logo abaixo da crosta, a qual pode ser influenciada pela camada da crosta. A análise dos poros em camadas teve o objetivo de avaliar até em que profundidade o efeito das lâminas de chuva e a crosta formada causaram consequências na porosidade do solo. Cada camada (crosta e subcrosta) foi analisada com três microfotografias (Figura 3.2).

A porosidade determinada pela análise de imagens foi expressa em porcentagem de área e número de poros. Foi separada em forma de poros (arredondados, alongados e complexos), de acordo com dois índices de forma (I_1 e I_2), descritos por Cooper et al. (2005) e tamanho de poros pequeno ($156-15.600 \mu\text{m}^2$) médio ($15.600-156.000 \mu\text{m}^2$) e grande ($>156.000 \mu\text{m}^2$).

O primeiro índice utilizado (I_1), (Eq. 1), separa poros arredondados de alongados (HALLAIRE, COINTEPAS 1993).

$$I_1 = \frac{P^2}{4 \pi A} \quad (1)$$

onde P é o perímetro do poro e A é a área ocupada pelo poro.

O índice de forma (I_2), foi utilizado para a separação adequada entre poros alongados e complexos, é definido pela (Eq. 2).

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_I)_i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F)_j} \quad (2)$$

onde: NI é o número de interceptos de um objeto na direção i ($i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ e 135°), DF é o diâmetro de Feret de um objeto na direção j ($j = 0^\circ$ e 90°), m é o número de i direções e n é o número de j direções.

Os critérios para a distinção entre os grupos de forma estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Definição das classes de forma dos poros

Forma de Poros	Índices de forma	
	I_1	I_2
Arredondados	$I_1 \leq 5$	
Alongados	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexos	$I_1 > 25$	$> 2,2$

As classes de tamanho foram definidas a partir do diâmetro equivalente (Deq), para os poros arredondados e complexos (Eq. 3) (PAGLIAI et al., 1983). Já para os poros alongados foi definida a largura (L) (Eq. 4) de acordo com Pagliai et al. (1984).

$$Deq = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{4} \cdot (P \pm \sqrt{P^2 - 16 \cdot A}) \quad (4)$$

Onde: A é a área e P é o perímetro do poro

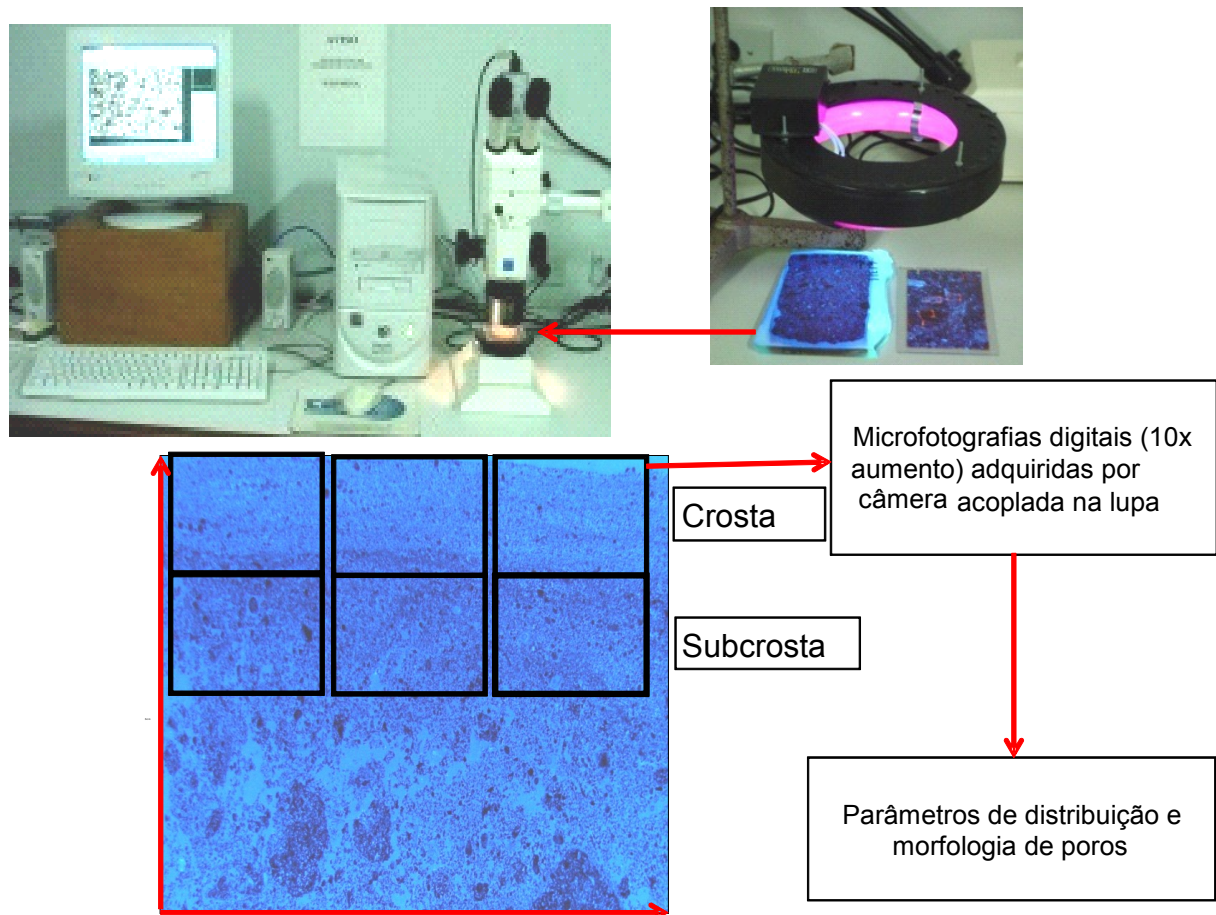


Figura 3.2 – Representação esquemática da obtenção das microfotografias adquiridas nas duas camadas analisadas e realização da análise de imagens (imagem meramente explicativa)

Avaliação da Condutividade Hidráulica (K), Curvas de Retenção de Água (CRA) e Densidade do solo (Ds)

As medições de K e as coletas dos cilindros para CRA foram realizadas na área experimental vinte e quatro horas após a realização da simulação da chuva.

A K foi medida no campo, “*in situ*”, nas micro parcelas experimentais, com um infiltrômetro de disco (PERROUX, WHITE, 1988) (Figura 3.3 a, b). O infiltrômetro consiste em um disco, o qual foi posicionado sobre uma fina camada de areia, para a padronização das imperfeições na superfície do solo. A vantagem deste em estudos de crostas é pela não alterar a integridade estrutural da crosta, uma vez que

ele é somente posicionado sobre a superfície do solo. As medidas de K foram feitas em três potenciais matriciais diferentes em cm de coluna de água (cca): -10, -3,5 e -1 cca. Posteriormente os cálculos foram realizados conforme sugerido por Ankeny et al. (1991).

Para as curvas de retenção de água (CRA) foram coletadas amostras na superfície do solo com anéis cilíndricos (2,5cm altura e 5cm de diâmetro) (Figura 3.3 c). Em cada micro parcela coletou-se um anel volumétrico, obtendo-se dessa forma três repetições para cada lâmina de chuva aplicada. As CRA foram determinadas com base na umidade volumétrica em câmara de Richards, para os seguintes potenciais matriciais -2, -4, -6, -8, -10, -33, -70, -100, e -1.500 kPa, no ano de 2009 e -2, -4, -6, -8, -10, -33, -75, -175, e -1.500 kPa, no ano de 2010. Para a obtenção dos pontos da curva, ajustou-se o modelo de van GENUCHTEN aos valores de potencial e umidade, com o uso do programa RETC (van GENUCHTEN et al., 1991).

A densidade do solo (D_s) foi calculada pela relação entre massa de solo seco em estufa (105° C) e o volume do anel.

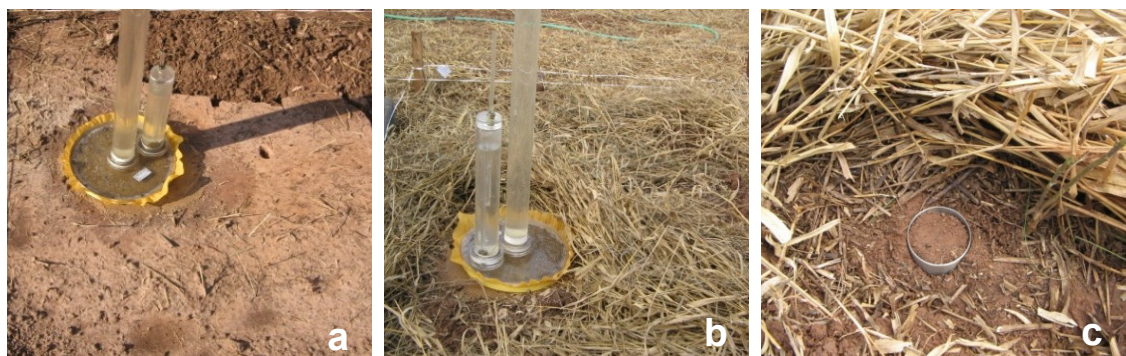


Figura 3.3 – Detalhe do teste de K no preparo convencional (a) e no sistema sem preparo (b). Cilindro volumétrico para CRA (c)

Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com parcelas sub-divididas e três repetições. Os tratamentos consistiram de três formas de preparo do solo (PC, PR e SP), aplicados nas parcelas, e lâminas de chuva simulada (0, 27, 54 e 80 mm) aplicadas nas sub-parcelas. Os efeitos dos tratamentos foram avaliados, em duas camadas do solo (crosta e subcrosta) e em dois anos consecutivos (2009 e 2010).

A fim de se observar os efeitos dos fatores de variação (preparos do solo, lâminas de chuva, camadas de solo e anos) sobre a porosidade e a K do solo, utilizou-se a análise multivariada por meio da técnica da análise dos componentes principais (ACP), apresentada por meio dos gráficos BILOT (GABRIEL, 1971; KROONENBERG, 1997). Os gráficos BILOT foram preparados considerando os dois primeiros componentes principais com as maiores variâncias e os autovalores maiores que 1,0 (ANDERSON et al., 1990; MORAAGUILERA et al., 1993). Além disso, a importância dos fatores de variação foi avaliada por meio da quantidade de variação explicada por cada um deles em relação à variação total. A APC e o gráfico biplot foram preparados com 'Biplot and Singular Value Decomposition Macros for Excel ©' (LIPKOVICH, SMITH, 2002).

Realizou-se também análise de correlação de Pearson entre porosidade, K e D_s para constatar as possíveis correlações entre essas variáveis.

3.2.2 Resultados

3.2.2.1 Porosidade do solo

3.2.2.1.1 Análise de Componentes Principais (ACP) para porcentagem de Área de Poros (% Área de poros)

Em função do grande número de fatores de variação (preparo, chuva, camada e ano) optou-se inicialmente por realizar algumas ACP de forma exploratória para compreender melhor o comportamento das variáveis e assim direcionar as ACP seguintes.

Dessa forma, optou-se inicialmente por observar os fatores de variação mais amplos (ano e camada) direcionando para os mais específicos (preparo e chuva). A ACP (Figura 3.4) demonstrou agrupamentos da porosidade nos anos avaliados. Observa-se claramente (Figura 3.6) a formação de dois agrupamentos distintos, unidos conforme o ano considerado. Pode-se perceber que o conjunto de dados de % de área de poros do ano de 2009 apresenta-se de forma diferenciada do ano de 2010. Os anos de 2009 e 2010 explicaram respectivamente 42% e 58% da variabilidade dos dados da % Área de poros (Figura 3.4).

O agrupamento de 2009 apresentou maior relação com os poros Comp_g (complexos grandes), já o de 2010 apresentou maior relação com os poros arredondados e alongados.

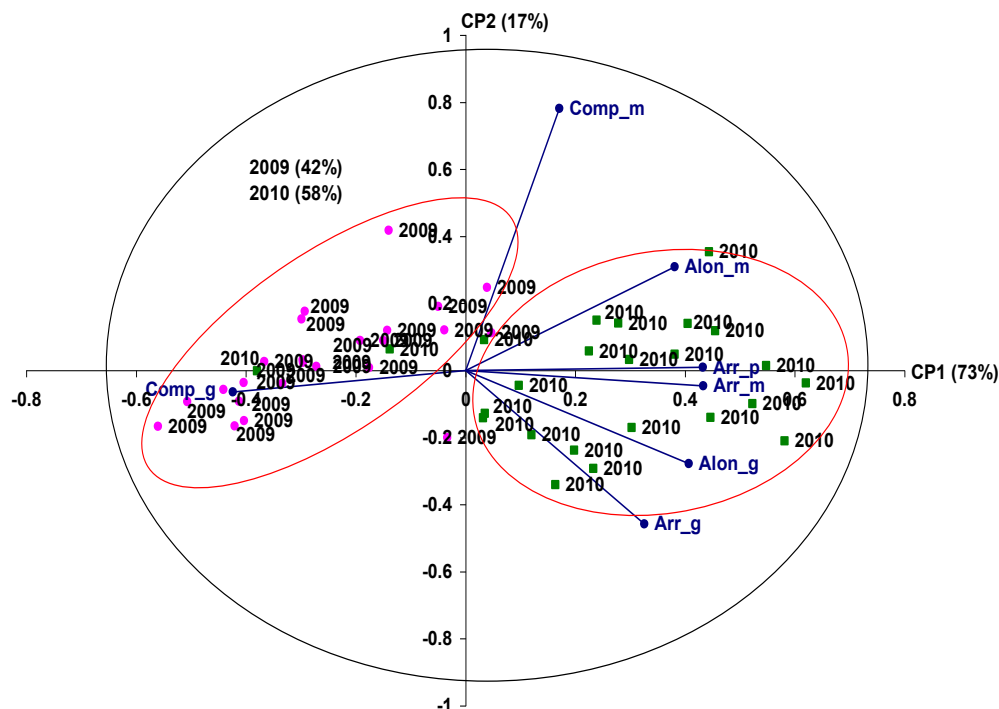


Figura 3.4 – ACP para % área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, em ambos os anos de estudo (2009 e 2010). Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2

Visto que a % de área de poros se apresentou de forma diferente nos dois anos avaliados, procedeu-se ACP para avaliar o comportamento das variáveis quando levado em consideração as duas camadas analisadas (crosta e subcrosta) separando os anos (2009 e 2010).

A % área de poros demonstrou agrupamentos para o ano de 2009 (Figura 3.5) e 2010 (Figura 3.6), que foram separados pela camada considerada. Além disso, em 2009 os agrupamentos foram distribuídos no gráfico, sugerindo que esta disposição pode estar relacionada com outros fatores de variação (preparo e chuva). No ano de 2009 a camada da crosta e subcrosta explicaram 53%, e 47% da variação total dos dados. Já em 2010, ambas responderam por 50% cada da variação total.

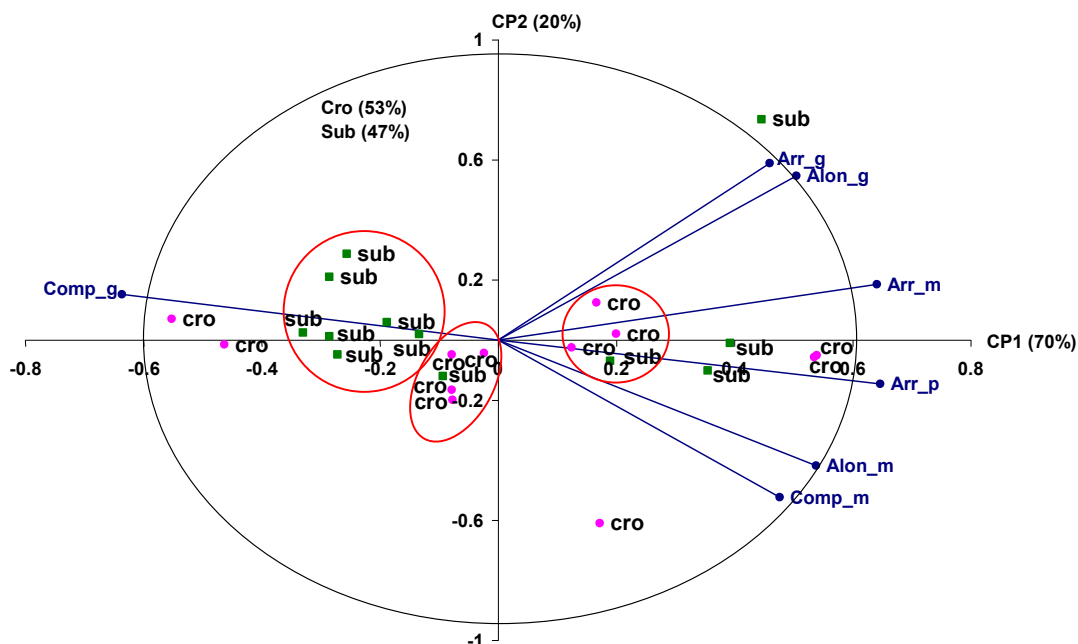


Figura 3.5 – ACP para % área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, e relação com as camadas consideradas para o ano de 2009. cro: camada da crosta; sub: camada da subcrosta. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2

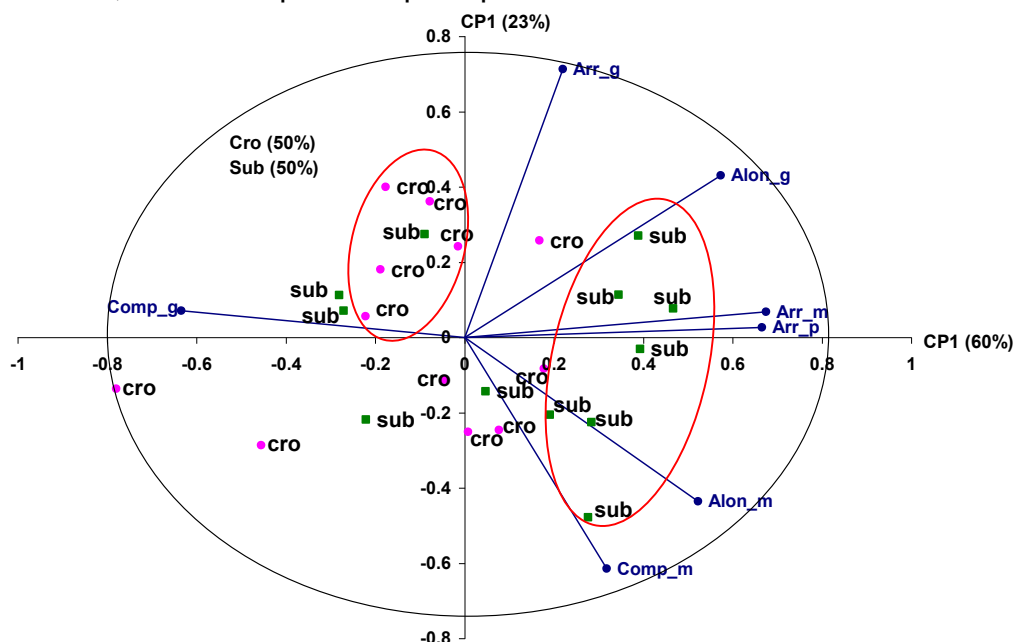


Figura 3.6 – ACP para % área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, e relação com as camadas consideradas para o ano de 2010. cro: camada da crosta; sub: camada da subcrosta. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2

Efeito dos preparos do solo e lâminas de chuva sobre a % de área de poros na camada da crosta (2009 e 2010)

Visto que as ACP apresentadas anteriormente, para fins exploratórios, demonstraram uma separação dos dados entre os anos avaliados (Figura 3.8) e também por camadas (Figuras 3.5 e 3.6) procedeu-se então continuação nas ACP para cada camada e em cada ano, a fim de se constatar os efeitos dos preparos e lâminas de chuva aplicada sobre a porosidade do solo.

A ACP da % área de poros na camada da crosta e no ano de 2009 (Figura 3.7), apresentou CP1 que explicou 74% e CP2 15% da variação total dos dados. Observa-se a formação de alguns agrupamentos, unidos em função do preparo do solo e dispostos no gráfico em função das lâminas de chuva aplicada.

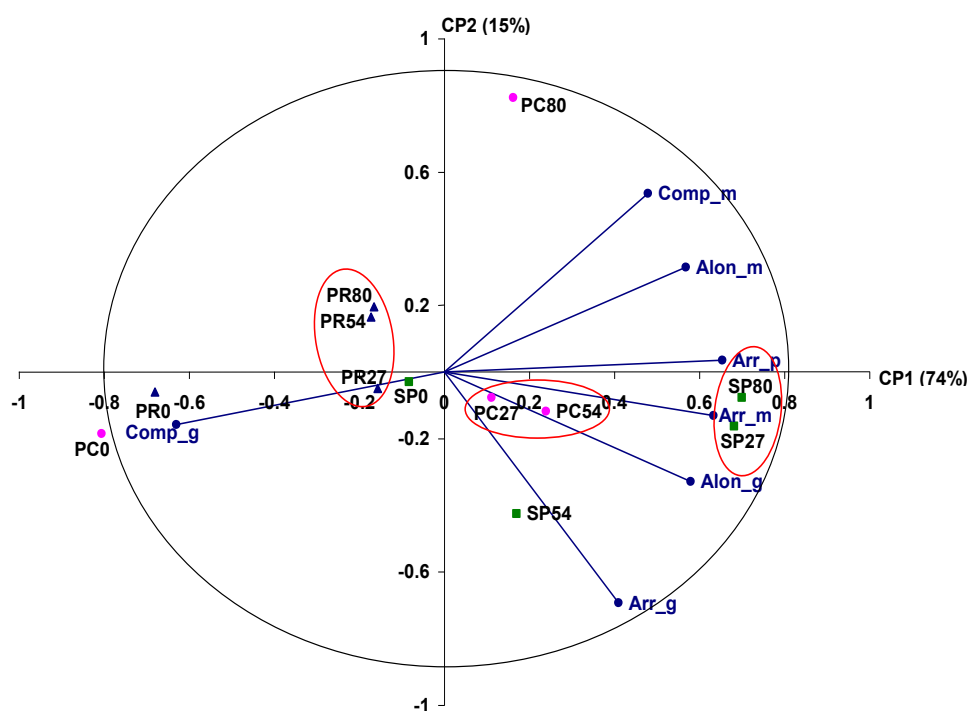


Figura 3.7 – ACP para % área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para camada crosta em 2010. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo. 0, 27, 54, 80mm de lâmina de chuva aplicadas

A % de área de poros Arr_g (arredondados grandes), Alon_g (alongados grandes), Arr_m (arredondados médios), Arr_p (arredondados pequenos), Alon_m (alongados médios) e Comp_m (complexos médios), são correlacionadas entre si e ao mesmo tempo são negativamente correlacionados com % área de poros Comp_g, sugerindo desta forma, que o aumento de uma destas classes promove diminuição das outras (Figura 3.7).

Três agrupamentos formados conforme os preparos do solo podem ser observados (Figura 3.7). Esses agrupamentos sugerem que os fatores agrupados apresentam características semelhantes entre si. Os agrupamentos observados foram PR (27, 54 e 80mm), PC (27 e 54mm) e SP (27 e 80mm), ambos apresentam redução da % área de poros Comp_g e aumento de arredondados e alongados. As médias encontram-se na tabela 3.3.

Os preparos que apresentaram maiores % área de poros Comp_g foram PC e PR onde não se aplicou chuva (0mm), o que é decorrente do preparo do solo e não ocorrência da chuva.

É possível observar também a modificação na % de área de poros dos diferentes preparos do solo em função das lâminas de chuva aplicada. O PC apresentou inicialmente grande % área de poros Comp_g onde não se aplicou chuva, (0 mm) (Tabela 3.3 e Figura 3.7).

À medida que a chuva aumenta esses poros diminuíram e a % de área de poros alongados e arredondados aumentou. Isso evidencia que os poros complexos (contínuos) presentes no PC0 foram transformados em poros alongados e arredondados (poros sem continuidade), pelo efeito e aumento da lâmina de chuva.

Essa dinâmica observada no PC ocorreu também em PR, porém em menor magnitude. Possivelmente neste preparo essa diminuição não foi tão evidente como no PC, pois os resíduos culturais permaneceram sobre a superfície do solo e ocasionam a proteção da mesma, evitando assim maior transformação dos poros complexos em arredondados e alongados. O sistema SP não apresentou uma clara modificação da % de área de poros com aumento das lâminas de chuva aplicada como observado no PC e PR. Entretanto, onde a chuva não foi aplicada (0 mm) ocorreu menor % área de poros complexos do que os demais preparos e com aumento da lâmina de chuva aplicada (27 e 80 mm) apresentou maior proporção de poros arredondados e alongados pequenos e médios (Figura 3.7).

Tabela 3.3 – Porcentagem de área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para camada da crosta e subcrosta no ano de 2009

Camada	PreparoxChuva	Arr_p	Arr_m	Arr_g	Alon_m	Alon_g	Comp_m	Comp_g	ATP
----- %-----									
Crosta	PC0	0,99	1,61	0,12	0,32	0,12	0,03	57,09	60,27
	PC27	1,48	2,82	0,20	0,47	0,33	0,16	46,63	52,09
	PC54	1,43	2,81	0,21	0,55	0,48	0,17	46,76	52,41
	PC80	1,52	2,31	0,05	0,72	0,19	0,26	43,36	48,41
Média	PC	1,35	2,39	0,14	0,52	0,28	0,15	48,46	53,29
Subcrosta	PC0	1,14	2,09	0,18	0,30	0,44	0,06	53,53	57,74
	PC27	1,45	3,38	0,52	0,44	0,78	0,09	43,59	50,26
	PC54	1,22	2,06	0,21	0,32	0,27	0,14	51,51	55,73
	PC80	1,26	2,26	0,16	0,62	0,22	0,10	49,59	54,20
Média	PC	1,27	2,45	0,27	0,42	0,43	0,10	49,55	54,48
Crosta	PR0	1,01	1,52	0,12	0,40	0,15	0,06	54,30	57,55
	PR27	1,30	2,13	0,19	0,50	0,28	0,12	48,51	53,01
	PR54	1,31	2,25	0,13	0,42	0,24	0,18	48,56	53,09
	PR80	1,23	2,08	0,16	0,48	0,22	0,18	47,55	51,91
Média	PR	1,21	1,99	0,15	0,45	0,22	0,13	49,73	53,89
Subcrosta	PR0	1,20	1,94	0,11	0,42	0,24	0,06	51,57	55,54
	PR27	1,19	1,95	0,09	0,41	0,24	0,08	50,71	54,67
	PR54	1,34	2,14	0,12	0,40	0,33	0,09	48,89	53,31
	PR80	1,14	1,87	0,19	0,34	0,34	0,05	51,46	55,38
Média	PR	1,22	1,97	0,13	0,39	0,29	0,07	50,66	54,72
Crosta	SP0	1,36	2,17	0,16	0,47	0,32	0,11	45,10	49,69
	SP27	1,75	3,10	0,37	0,67	0,45	0,24	41,76	48,33
	SP54	1,49	2,49	0,37	0,49	0,32	0,13	44,93	50,23
	SP80	1,74	3,13	0,25	0,82	0,53	0,15	39,54	46,16
Média	SP	1,59	2,72	0,29	0,61	0,41	0,16	42,83	48,60
Subcrosta	SP0	1,07	1,77	0,13	0,33	0,23	0,08	50,21	53,84
	SP27	1,47	2,54	0,19	0,58	0,40	0,14	42,65	47,97
	SP54	1,52	2,80	0,26	0,73	0,45	0,19	43,21	49,15
	SP80	1,60	2,76	0,30	0,68	0,47	0,17	41,07	47,05
Média	SP	1,41	2,47	0,22	0,58	0,39	0,15	44,29	49,50

Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande); ATP: área total de poros. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada. Crosta: camada superficial analisada; subcrosta: camada analisada logo abaixo da crosta

Dentre os preparos do solo analisados o PC teve importância de 38%, PR 21% e SP 41% para explicar as mudanças ocorridas na porcentagem de área de poros (Tabela 3.4). No PC as interações que mais contribuíram foram PC0 (22%) e

PC80 (11%). No PR foi à interação PR0 (16%) e no SP foi SP27 (17%) e SP80 (19%).

Tabela 3.4 – Fatores explicativos (Preparo x lâminas de chuvas) da variabilidade total da % área de poros para camada da crosta (ACP Figuras 3.7 e 3.8) de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP

Preparos	0	27	54	80	Total
-----2009-----					
PC	22	1	4	11	38
PR	16	1	2	2	21
SP	1	17	5	19	41
-----2010-----					
PC	14	3	9	9	34
PR	35	5	7	3	49
SP	3	5	6	2	17

PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

A ACP da % área de Poros na camada da crosta e no ano de 2010 (Figura 3.8) apresentou CP1 que explicou 63% e CP2 24% da variação total dos dados. As variáveis que se relacionaram entre si foram Comp_m e Alon_m; Arr_g e Alon_g; Arr_p e Arr_m.

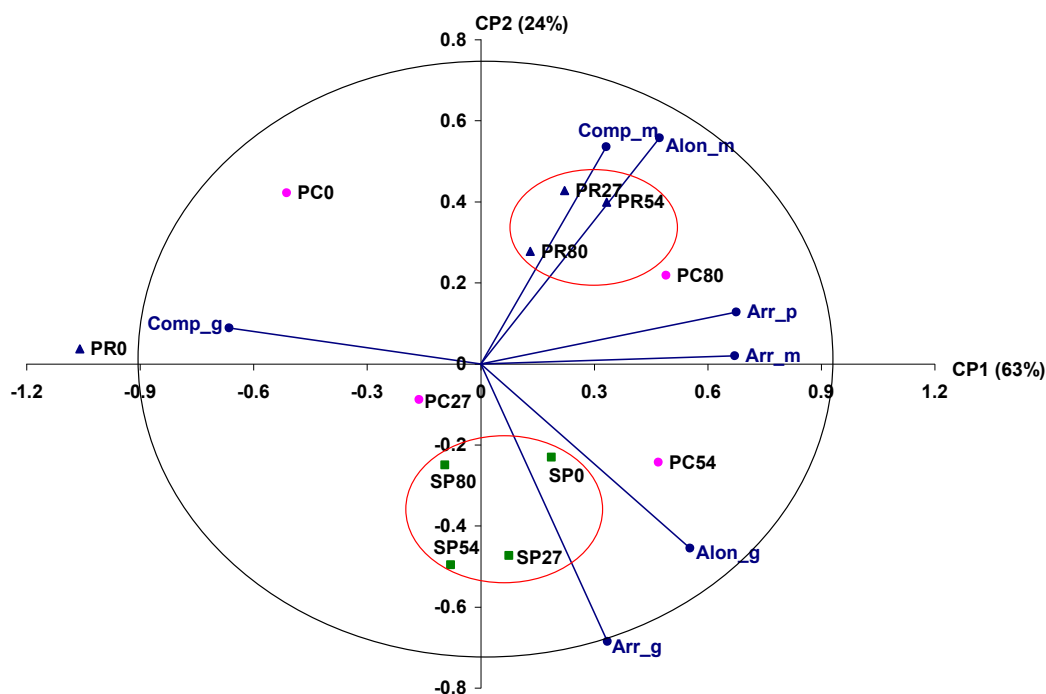


Figura 3.8 – ACP para % área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para camada crosta em 2010. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

Tabela 3.5 - Porcentagem de área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para camada da crosta e subcrosta no ano de 2010

Camada	PrepxChuva	Arr_p	Arr_m	Arr_g	Alon_m	Alon_g	Comp_m	Comp_g	ATP
------%-----									
Crosta	PC0	1,61	2,75	0,11	0,81	0,21	0,09	43,69	49,28
	PC27	1,75	3,23	0,63	0,57	0,76	0,16	41,35	48,45
	PC54	2,12	3,97	1,04	0,75	1,10	0,17	32,23	41,37
	PC80	2,33	4,22	0,47	0,84	0,94	0,16	31,61	40,56
Média	PC	1,95	3,54	0,56	0,74	0,75	0,15	37,22	44,92
Subcrosta	PC0	2,14	3,70	0,51	1,08	0,68	0,13	35,98	44,22
	PC27	2,05	3,74	0,63	0,58	0,92	0,08	36,43	44,42
	PC54	1,59	3,19	0,43	0,52	0,76	0,09	34,73	41,30
	PC80	2,58	5,00	0,77	0,89	1,22	0,09	28,01	38,56
Média	PC	2,09	3,91	0,59	0,77	0,89	0,10	33,79	42,13
Crosta	PR0	1,17	1,82	0,18	0,43	0,29	0,11	52,25	56,26
	PR27	2,08	3,80	0,35	0,86	0,68	0,18	35,26	43,22
	PR54	2,13	4,19	0,26	0,84	0,76	0,17	32,43	40,79
	PR80	2,01	3,77	0,59	0,84	0,63	0,17	39,02	47,03
Média	PR	1,85	3,40	0,35	0,74	0,59	0,16	39,74	46,82
Subcrosta	PR0	1,93	3,41	0,15	0,62	0,54	0,14	37,09	43,87
	PR27	2,39	4,63	0,39	1,04	0,78	0,16	27,01	36,41
	PR54	2,02	3,96	0,32	1,00	0,80	0,26	17,51	25,85
	PR80	2,20	4,19	0,56	0,99	0,78	0,20	31,14	40,05
Média	PR	2,13	4,05	0,35	0,91	0,72	0,19	28,19	36,55
Crosta	SP0	1,96	3,64	1,01	0,72	0,81	0,13	34,93	43,20
	SP27	1,90	3,49	0,78	0,63	1,05	0,07	34,92	42,83
	SP54	1,83	3,63	0,88	0,60	0,78	0,05	37,91	45,67
	SP80	1,75	3,57	0,59	0,63	0,74	0,08	36,00	43,36
Média	SP	1,86	3,58	0,81	0,64	0,84	0,08	35,94	43,77
Subcrosta	SP0	1,81	3,35	0,45	0,56	0,54	0,08	36,16	42,96
	SP27	2,52	4,51	0,57	0,83	1,14	0,12	21,86	31,54
	SP54	2,42	4,90	0,45	0,93	1,19	0,15	24,58	34,63
	SP80	2,51	5,08	0,61	0,88	1,27	0,16	22,15	32,65
Média	SP	2,31	4,46	0,52	0,80	1,04	0,13	26,19	35,45

Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio; g: grande), ATP: área total de poros. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80 mm: lâminas de chuva aplicada. Crosta: camada superficial analisada; subcrosta: camada analisada logo abaixo da crosta

A classe de poros Comp_g relacionou-se negativamente com Arr_p e Arr_m. O PC apresentou o mesmo comportamento observado em 2009, inicialmente em onde não aplicou-se chuva (0 mm) ocorreu maior % de área de poros Comp_g a

medida que a chuva aumentou a % de área de poros Comp_g diminuiu e aumentou a % de arredondados (Figura 3.8; Tabela 3.5).

O PR onde não foi aplicada chuva (0mm) também apresentou grande % de área de poros Comp_g. Entretanto com 27, 54 e 80mm de lâmina de chuva aplicada foram observados aumentos na % área de poros arredondados, alongados e Comp_m, e com isso redução da % área de poros Comp_g. O sistema SP manteve-se agrupado, ou seja, todas as lâminas de chuvas demonstraram comportamento semelhante. Dentre os preparos do solo analisados o PC apresentou a importância de 34%, PR 49% e SP 17% na explicação da variabilidade total dos dados (Tabela 3.4), e PC0 (14%) e PR0 (35%) foram as interações mais explicativas.

Efeito dos preparos do solo e lâminas de chuva sobre a % de área de poros na camada da subcrosta (2009 e 2010)

O CP1 explicou 71% e CP2 21% da variabilidade dos dados para % de área de poros na camada da subcrosta no ano de 2009 (Figura 3.9). É possível observar a formação de dois agrupamentos. Um primeiro uniu PC0 mm, PR80 mm, SP0 mm, PR0 mm, PR27 mm, PC54 mm e PR54 mm. Esse agrupamento demonstrou maior % de área de poros Comp_g em relação aos arredondados e alongados, porém não se observou modificação da % de área de poros com o aumento das lâminas de chuva aplicada. Outro agrupamento formado por SP (27, 54 e 80 mm) demonstrou diminuição dos poros Comp_g, e aumento dos poros alongados e arredondados, comparado com SP0, onde não aplicou-se chuva. Dessa forma, observou-se que para o SP, nesta camada da subcrosta houve modificação da % de área de poros em função das lâminas de chuva aplicada, com aumento da % de área de poros arredondados e alongados (Figura 3.9 e Tabela 3.3) o que não foi observado na camada da crosta para este sistema de preparo.

O PC teve importância de 41%, PR 17% e SP 42% na explicação dos resultados da % de área de poros (Tabela 3.6). Sendo que no PC a lâmina de chuva de 27 mm foi a que mais contribuiu, 28% do total deste preparo. Em SP as lâminas de chuva 27 e 80mm contribuíram 15% cada para o total deste preparo.

Tabela 3.6 - Fatores explicativos (Preparo x lâminas de chuvas) da variabilidade total da % área de poros camada da subcrosta (ACP figuras 3.9 e 3.10) de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP

Preparo	0	27	54	80	Total
-----2009-----					
PC	6	28	4	3	41
PR	5	4	1	6	17
SP	7	6	15	15	42
-----2010-----					
PC	5	7	12	11	35
PR	13	4	14	3	34
SP	11	5	5	9	31

PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

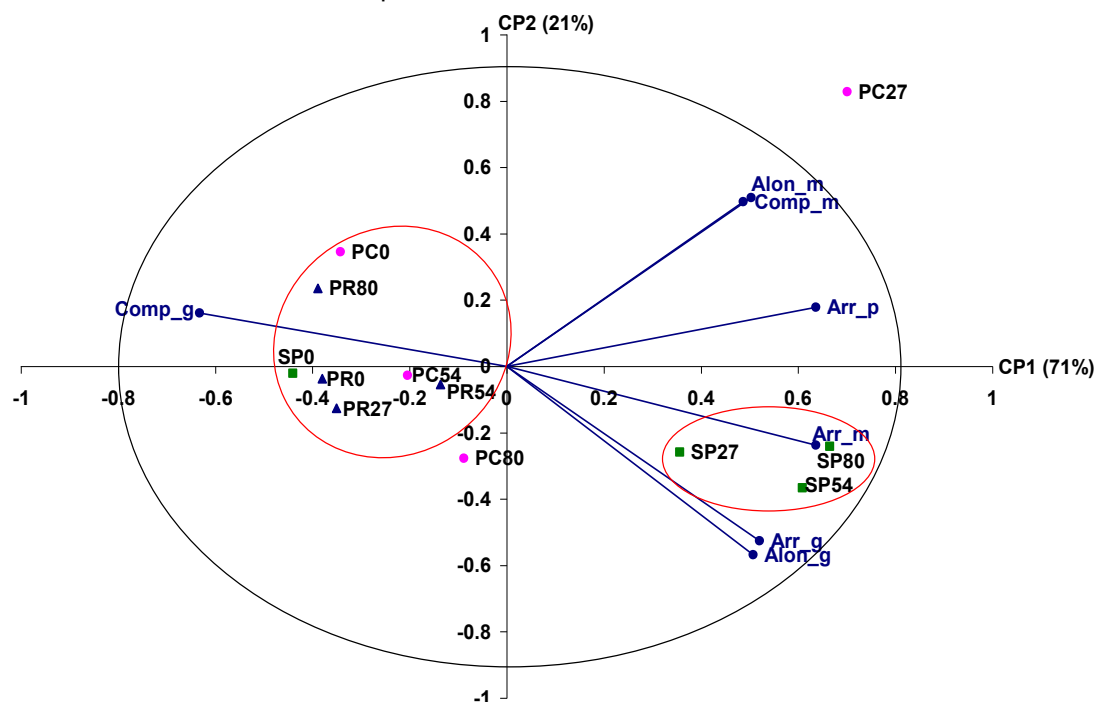


Figura 3.9 – ACP para % área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, na camada subcrosta em 2009. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80 mm: lâminas de chuva aplicada

O CP1 explicou 58% e CP2 27% da variabilidade dos dados para % de área de poros na camada da subcrosta no ano de 2010 (Figura 3.10). Nesta figura é possível observar a formação de três agrupamentos, um unindo PC54, SP0 e PR0, os quais apresentaram maior % de área de poros Comp_g e menor % dos demais

poros (arredondados e alongados). Outro agrupamento ocorreu com PR 27 e 80 mm, que demonstraram diminuição na % de área de poros Comp_g e aumento da % de área dos alongados e arredondados. E um último agrupamento ocorreu com SP27, 54 e 80mm que, apresentaram redução da % de área de poros Comp_g comparado ao SP0 mm e um aumento da % de área das demais classes de poros (Tabela 3.5 e Figura 3.10). Da mesma forma que observado no ano de 2009 para esta camada, o sistema SP demonstrou modificação da % de área de poros em função das lâminas de chuva aplicada.

Para esta camada e no ano de 2010, o PC teve importância de 35%, PR 34% e SP 31% na explicação da % de área de poros (Tabela 3.6). No PC as lâminas de chuva 54 e 80mm foram as que mais contribuíram, 12 e 11% respectivamente, para o total de 35% da explicação deste preparo. No PR, PR0 mm respondeu por 13% e PR 54 14% de um total de 34% deste preparo. SP0 11% e SP80 9% de um total de 31 %.

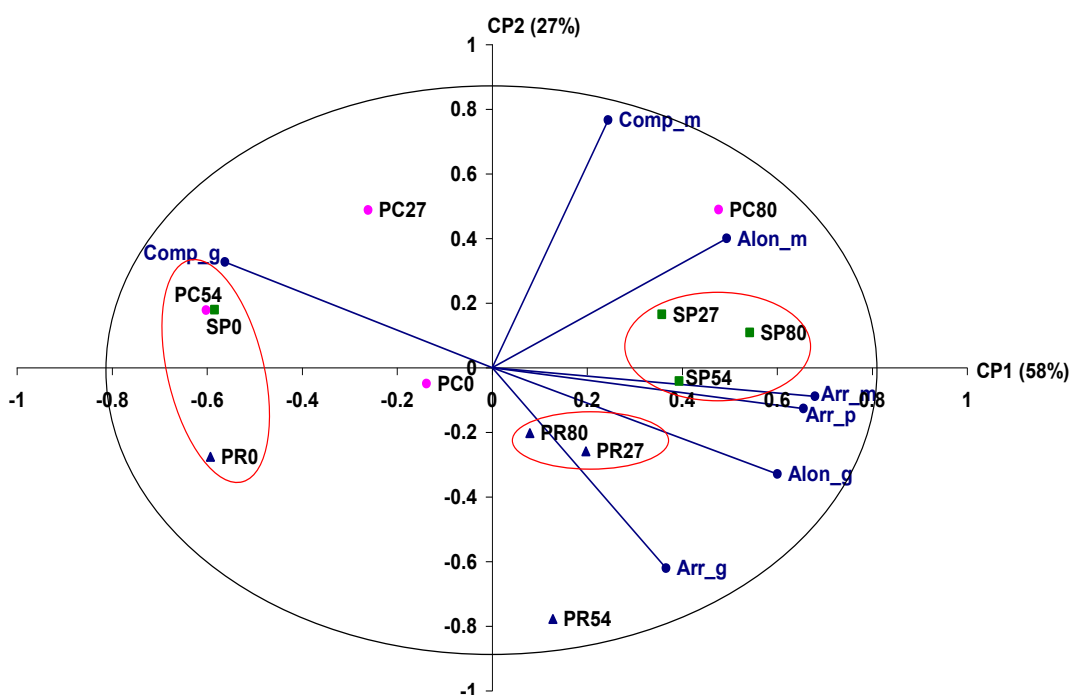


Figura 3.10 – ACP para % área de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, na camada subcrosta em 2010. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicadas

3.2.2.1.2 ACP para Número de Poros

Da mesma forma que para % área de poros, foi realizada uma análise exploratória dos dados referentes ao número de poros para compreender melhor o comportamento das variáveis e assim direcionar as ACP seguintes. A ACP (Figura 3.11), realizada para observar o comportamento da porosidade demonstrou agrupamentos nos anos avaliados. Observa-se, a formação de dois agrupamentos distintos, unidos conforme o ano considerado. Nos anos de 2009 e 2010 o número de poros diferiu entre si e explicou respectivamente 43% e 57% da variabilidade dos dados.

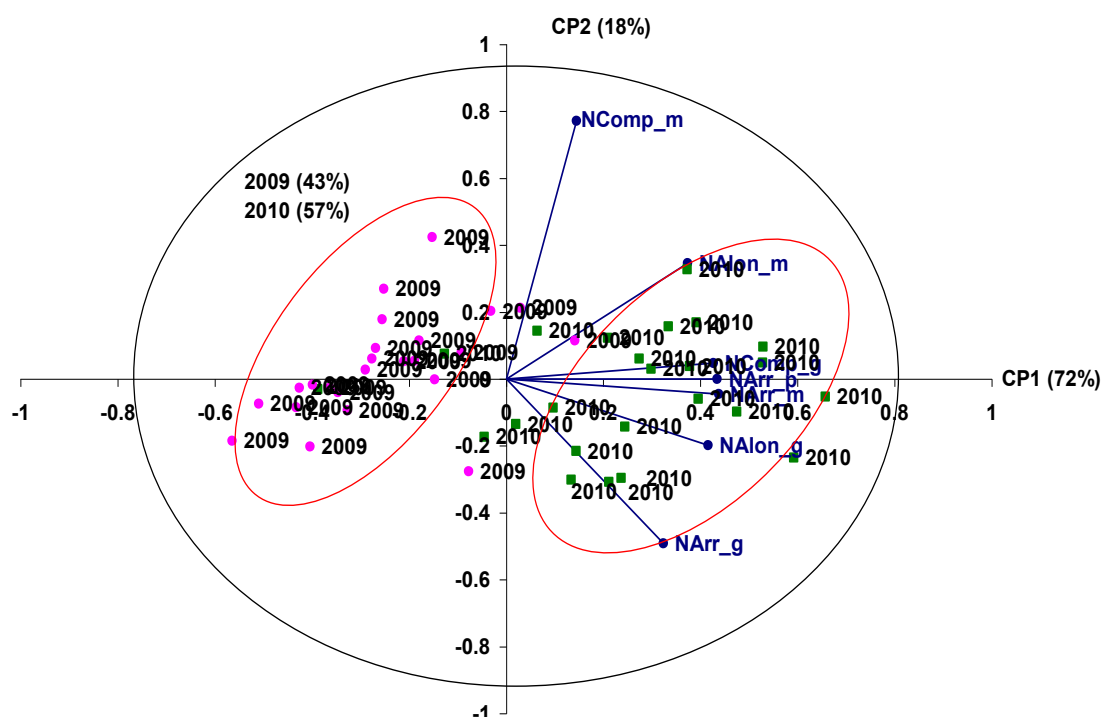


Figura 3.11 – ACP para número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, em ambos os anos de estudo. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p:156-15600, m:15600-156000 e g:>156000 μm^2) (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2

Como se observou na Figura 3.11 que o número de poros foi diferente nos anos avaliados, realizou-se então uma ACP para avaliar o comportamento das variáveis quando levado em consideração as duas camadas analisadas (crosta e subcrosta) separando os anos.

Assim, foram constatados agrupamentos, separados em função da camada considerada, para o ano de 2009 (Figura 3.12) e 2010 (Figura 3.13). A camada da

crosta, no ano de 2009, explicou 58% da variação dos dados enquanto a subcrosta explicou 42%. Já em 2010 a crosta explicou 46% e a subcrosta 54%.

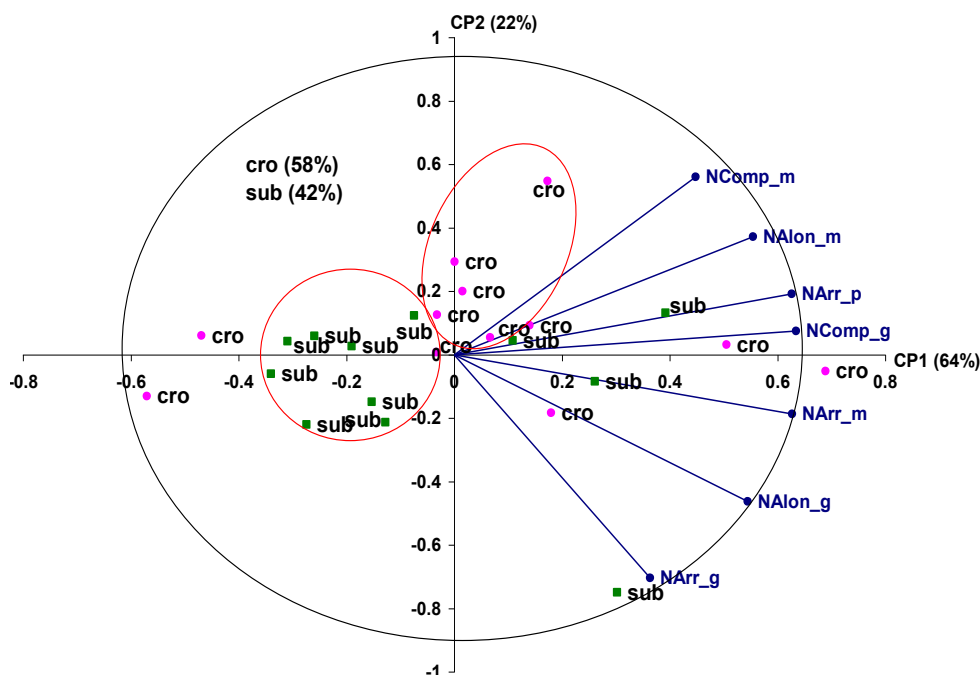


Figura 3.12 – ACP para número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, e relação com as camadas consideradas para o ano de 2009. cro: camada da crosta; sub: camada da subcrosta. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2

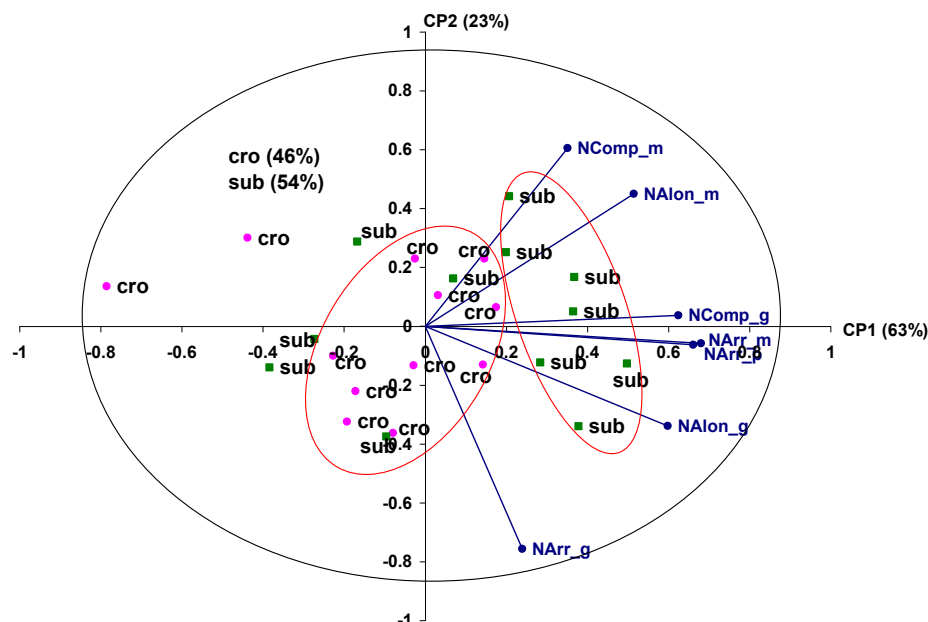


Figura 3.13 – ACP para número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, e relação com as camadas consideradas para o ano de 2009. cro: camada da crosta; sub: camada da subcrosta. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2

Efeito dos preparos do solo e lâminas de chuva sobre o número de poros na camada da crosta (2009 e 2010)

O CP1 explicou 70% e o CP2 17% da variabilidade dos dados para a ACP referente ao número de poros no ano de 2009 na camada da crosta (Figura 3.14). PC e PR onde não foi aplicada chuva (0mm) apresentaram menor número de poros, porém como visto anteriormente apresentaram maior % de área desses poros. SP 27 e 80mm apresentaram maior número de poros para quase todas as classes consideradas. O PC apresentou modificação no número de poros em função das lâminas de chuva aplicada, ou seja, menor número de poros no PC onde a chuva não foi aplicada (0 mm) e acréscimo com o aumento da chuva. Logo após o preparo, e sem ocorrência da chuva (0 mm) o PC teve menor número de poros, porém estes eram poros grandes (como comprovado pela maior % de área de poros Comp_g (Figura 3.7). A medida que a chuva foi aplicada na superfície do solo, os poros grandes eram atingidos e foram transformados e modificados em pequenos, dessa forma o número de poros aumentou.

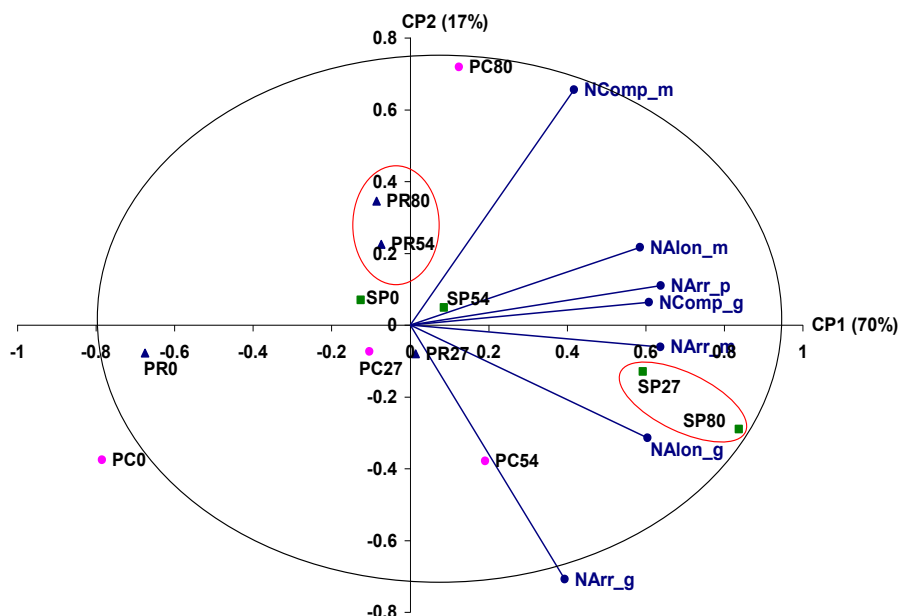


Figura 3.14 – ACP para número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, na camada crosta 2009. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros ((p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo. 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicadas

Em 2009, o PC contribuiu com importância de 38%, PR 21% e SP 41% da explicação da variabilidade do número de poros (Tabela 3.8). Sendo que no PC, as lâminas de chuva de 0 e 80mm foram os que mais contribuíram para explicar a variabilidade neste preparo do solo, 22 e 10 % respectivamente. No PR a maior contribuição foi onde a lâmina de chuva não foi aplicada (0mm) com 21% e no sistema SP para as lâminas de 27 e 80mm com 13% e 24%, respectivamente.

Tabela 3.7 - Número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para camada da crosta e subcrosta no ano de 2009

Camada	PrepxChuva	Arr_p	Arr_m	Arr_g	Alon_m	Alon_g	Comp_m	Comp_g	NTP
Crosta	PC0	256,67	54,33	1,33	4,33	1,00	0,67	3,67	322
	PC27	316,00	80,00	1,33	6,67	2,33	2,00	6,67	415
	PC54	371,33	91,67	1,67	7,67	3,33	1,67	6,67	484
	PC80	391,00	82,67	0,67	10,67	1,67	3,00	7,33	497
Média	PC	333,75	77,17	1,25	7,33	2,08	1,83	6,08	430
Subcrosta	PC0	323,67	73,33	1,33	4,33	3,00	1,33	6,33	413
	PC27	350,67	102,33	3,00	5,67	4,00	1,00	8,33	475
	PC54	334,33	74,33	1,67	4,00	2,00	1,67	6,00	424
	PC80	337,33	75,33	1,00	8,00	1,67	1,33	7,67	432
Média	PC	336,50	81,33	1,75	5,50	2,67	1,33	7,08	436
Crosta	PR0	286,67	52,67	1,00	5,33	1,00	1,00	5,00	353
	PR27	363,00	70,67	1,33	7,67	2,33	1,67	9,00	456
	PR54	374,00	76,67	1,00	6,00	2,00	2,33	7,67	470
	PR80	352,33	68,67	1,00	7,33	2,00	2,67	7,33	441
Média	PR	344,00	67,17	1,08	6,58	1,83	1,92	7,25	430
Subcrosta	PR0	265,00	65,33	1,00	6,00	2,00	1,00	5,33	346
	PR27	333,00	64,67	1,00	5,67	1,67	1,33	5,67	413
	PR54	359,33	70,67	1,00	5,67	2,00	1,33	5,33	445
	PR80	318,33	63,33	1,33	4,67	2,33	0,67	6,00	397
Média	PR	318,92	66,00	1,08	5,50	2,00	1,08	5,58	400
Crosta	SP0	379,00	74,00	1,00	6,67	2,00	1,67	7,33	472
	SP27	452,67	96,33	2,00	9,33	3,00	2,67	9,33	575
	SP54	407,00	86,67	1,00	6,67	2,33	1,67	9,00	514
	SP80	473,33	102,67	2,00	11,67	3,67	2,00	11,33	607
Média	SP	428,00	89,92	1,50	8,58	2,75	2,00	9,25	542
Subcrosta	SP0	308,00	58,67	1,00	5,00	1,67	1,33	6,33	382
	SP27	347,33	70,00	1,33	8,33	3,00	2,00	8,33	440
	SP54	411,67	93,00	1,33	9,67	3,00	2,33	9,67	531
	SP80	383,00	77,67	2,00	9,00	3,00	2,00	8,67	485
Média	SP	362,50	74,83	1,42	8,00	2,67	1,92	8,25	460

Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande); NTP: número total de poros. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm de lâmina de chuva aplicada. Crosta e subcrosta: camadas analisadas

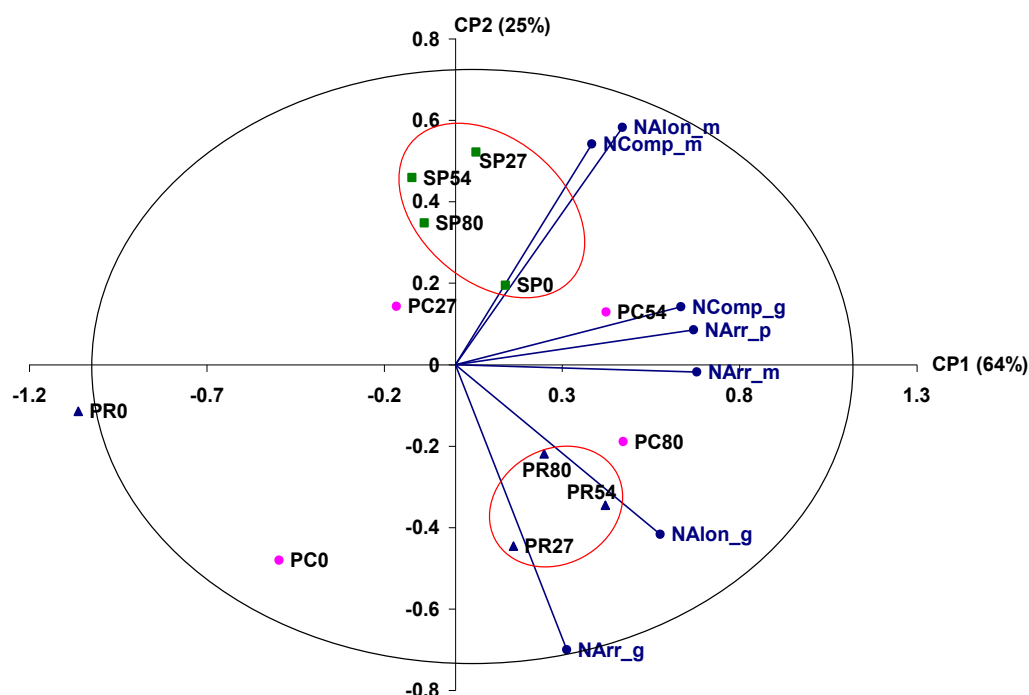


Figura 3.15 – ACP para número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, na camada crosta 2010. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo. 0, 27, 54, 80mm de lâmina de chuva aplicada

Tabela 3.8 – Fatores explicativos (preparo x lâminas de chuvas) da variabilidade total do número de poros para camada da crosta (ACP Figuras 3.14 e 3.15) de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP

Preparo	0	27	54	80	Total
-----2009-----					
PC	22	1	5	10	38
PR	15	1	2	3	21
SP	1	13	3	24	41
-----2010-----					
PC	13	3	7	8	32
PR	35	5	9	3	52
SP	2	5	5	3	16

PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

No ano de 2010, o CP1, para número de poros, explicou 64% e o CP2 25% da variação total dos dados para camada da crosta (Figura 3.15). O PC apresentou o mesmo comportamento que em 2009, menor número de poros em PC0 e aumento destes com o aumento da lâmina de chuva (Tabela 3.9), praticamente para todas as

classes de poros. Os agrupamentos observados em PR e SP indicam comportamento semelhante entre os fatores agrupados, ou seja, demonstraram semelhança entre o número de poros para as lâminas de chuva consideradas. Da mesma forma que em 2009, PR e PC onde não foi aplicada chuva (0mm) apresentaram menor número de poros.

Tabela 3.9 - Número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para camada da crosta e subcrosta no ano de 2010

Camada	PrepxChuva	Arr_p	Arr_m	Arr_g	Alon_m	Alon_g	Comp_m	Comp_g	NTP
Crosta	PC0	422	93,3	1	10,7	1,7	1,3	9,0	539
	PC27	463,89	104,67	3,56	8,00	3,44	1,89	9,67	595
	PC54	564,50	128,89	4,11	10,00	4,72	2,17	12,94	727
	PC80	614,22	137,11	2,56	11,22	4,78	2,00	12,44	784
Média	PC	516,15	116,00	2,81	9,97	3,65	1,85	11,01	661
Subcrosta	PC0	551,00	126,33	1,67	14,67	5,00	1,33	10,67	711
	PC27	533,00	117,33	3,67	7,22	4,78	1,00	11,56	679
	PC54	423,28	100,17	2,44	6,61	3,89	1,22	8,39	546
	PC80	672,78	157,22	4,22	11,67	6,22	1,33	13,22	867
Média	PC	545,01	125,26	3,00	10,04	4,97	1,22	10,96	700
Crosta	PR0	333,33	62,00	1,33	6,33	1,67	1,33	5,00	411
	PR27	561,39	122,67	2,11	11,61	3,11	2,06	11,00	714
	PR54	560,17	134,00	1,83	11,00	4,67	2,33	13,67	728
	PR80	540,67	122,33	2,78	11,00	3,89	2,11	12,22	695
Média	PR	498,89	110,25	2,01	9,99	3,33	1,96	10,47	637
Subcrosta	PR0	524,33	110,67	1,00	8,67	3,00	2,00	12,00	662
	PR27	624,39	148,39	2,39	14,00	4,78	1,94	16,50	812
	PR54	524,67	128,78	1,44	12,89	4,89	2,89	14,78	690
	PR80	575,67	135,44	2,33	13,00	4,11	2,33	14,00	747
Média	PR	562,26	130,82	1,79	12,14	4,19	2,29	14,32	728
Crosta	SP0	519,67	117,50	3,00	9,33	4,33	1,33	13,50	669
	SP27	506,33	113,17	3,94	8,28	4,83	1,06	12,11	650
	SP54	485,94	113,28	3,39	7,94	4,39	0,83	10,44	626
	SP80	470,83	111,00	3,33	8,00	3,83	1,17	12,33	611
Média	SP	495,69	113,74	3,42	8,39	4,35	1,10	12,10	639
Subcrosta	SP0	477,50	108,33	1,83	7,50	3,17	1,00	12,00	611
	SP27	655,22	149,78	2,83	10,83	5,83	1,56	13,17	839
	SP54	622,89	155,89	2,61	11,89	5,78	2,11	14,72	816
	SP80	653,33	161,33	3,50	11,67	6,50	2,00	16,67	855
Média	SP	602,24	143,83	2,69	10,47	5,32	1,67	14,14	780

Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande); NTP: número total de poros. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada. Crosta: camada superficial analisada; subcrosta: camada analisada logo abaixo da crosta

A importância de contribuição dos tratamentos em explicar a variação no número de poros, para o ano de 2010, foi de 32%, 52% e 16% para PC, PR e SP respectivamente (Tabela 3.8). No PC, as lâminas de chuva 0 e 80mm foram as que mais contribuíram com 13 e 8 % respectivamente. Para o sistema PR, a maior contribuição foi onde não aplicou-se chuva (0mm) com 35% de explicação.

Efeito dos preparos do solo e lâminas de chuva sobre o número de poros na camada da subcrosta (2009 e 2010)

O CP1 explicou 60% e CP2 25% da variabilidade dos resultados para número de poros na camada da subcrosta no ano de 2009 (Figura 3.16). Pode-se observar a formação de dois grupos, um primeiro unindo PC, PR e SP0, o qual apresentou menor número de poros (Tabela 3.7). Um segundo agrupamento formado por SP 27, 54 e 80mm o qual apresentou maior número de poros.

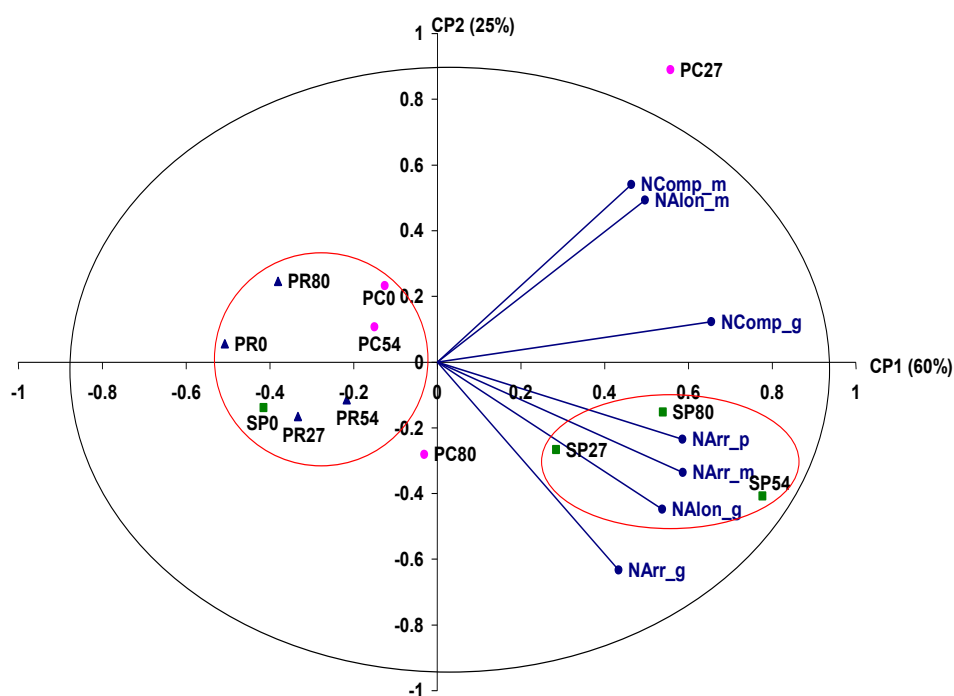


Figura 3.16 – ACP para número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, na camada subcrosta 2009. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

Observa-se que os sistemas de preparo PC e PR não apresentaram modificações no número de poros em função das lâminas de chuva aplicada. Já o SP demonstrou essas modificações, com aumento do número de poros arredondados e alongados pelo aumento das lâminas de chuva aplicada (Figura 3.16). Neste ano de 2009 e para subcrosta, o número de poros teve uma importância explicada por 34%, 24% e 42 % para PC, PR e SP respectivamente (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Fatores explicativos (preparo x lâminas de chuva) da variabilidade total do número de poros na camada da subcrosta (ACP figuras 3.16 e 3.17) de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP

Preparo	0	27	54	80	Total
-----2009-----					
PC	3	24	3	3	34
PR	10	4	3	6	24
SP	6	5	21	10	42
-----2010-----					
PC	6	8	18	11	42
PR	10	6	9	3	27
SP	11	4	4	11	31

PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

No ano de 2010, para camada da subcrosta, o CP1 explicou 60% e CP2 25% da variabilidade dos resultados (Figura 3.17). O PC não demonstrou modificações no número de poros em função das lâminas de chuva aplicada. O PR, demonstrou uma tendência de aumento do número de poros em função do aumento da lâmina de chuva aplicada (27, 54 e 80 mm) (Figura 3.17 e Tabela 3.8). O sistema SP, como já observado no ano anterior, demonstrou aumento do número de poros em função do aumento da lâmina de chuva aplicada, o que é constatado pelo agrupamento SP (27, 54 e 80) da Figura 3.17. Esse agrupamento apresentou maior número de poros especialmente arredondados e alongados, quando comparado ao SP0, onde a chuva não foi aplicada.

Na Tabela 3.10 pode-se observar a porcentagem que cada preparo do solo explica a variação no número de poros, sendo 42%, 27% e 31% para PC, PR e SP, respectivamente.

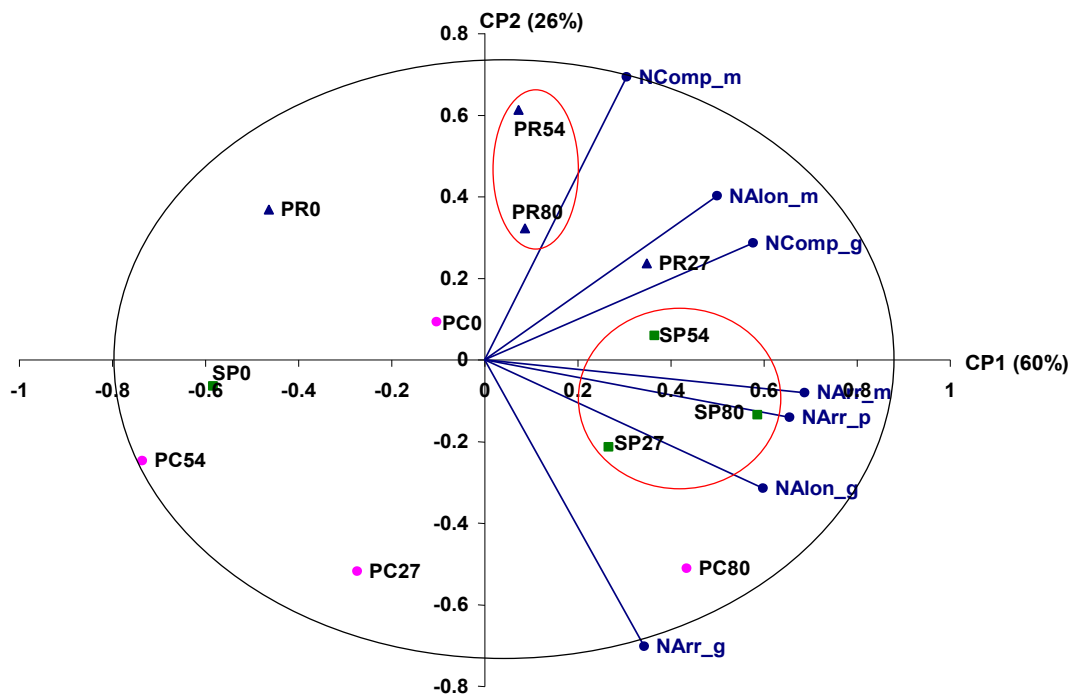


Figura 3.17 – ACP para número de poros de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, na camada subcrosta 2010. Forma (Arr: arredondados; Alon: alongados; Comp: complexos) e tamanho de poros (p: pequeno; m: médio e g: grande). CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2. PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

3.2.2.2 Condutividade Hidráulica (K) e Densidade do solo (D_s)

3.2.2.2.1 Avaliação da K

A ACP geral (Figura 3.18), realizada com todos os dados para uma observação exploratória, demonstrou uma separação dos valores de K entre os anos avaliados, sugerindo dessa forma, que a K foi diferente entre os anos de estudo com maiores valores observados em 2009. O componente principal 1 (CP1) explicou 89% da variação total dos dados, enquanto o componente principal 2 (CP2) 7 %. Já a variação entre os anos de estudo foi de 49% em 2009 e 51% em 2010.

Efeito dos preparos do solo e lâminas de chuva sobre a K nos anos de 2009 e 2010

Em função do observado na Figura 3.18, onde a K apresentou uma separação distinta entre os anos avaliados, ou seja, demonstrou que as médias

observadas em 2009 foram diferentes daquelas observadas em 2010, optou-se por realizar uma ACP separando os anos de estudo (Figuras 3.19 e 3.20) para observar mais especificamente o comportamento deste atributo em cada ano (2009 e 2010) e em função de cada preparo do solo realizado e lâminas de chuva aplicada.

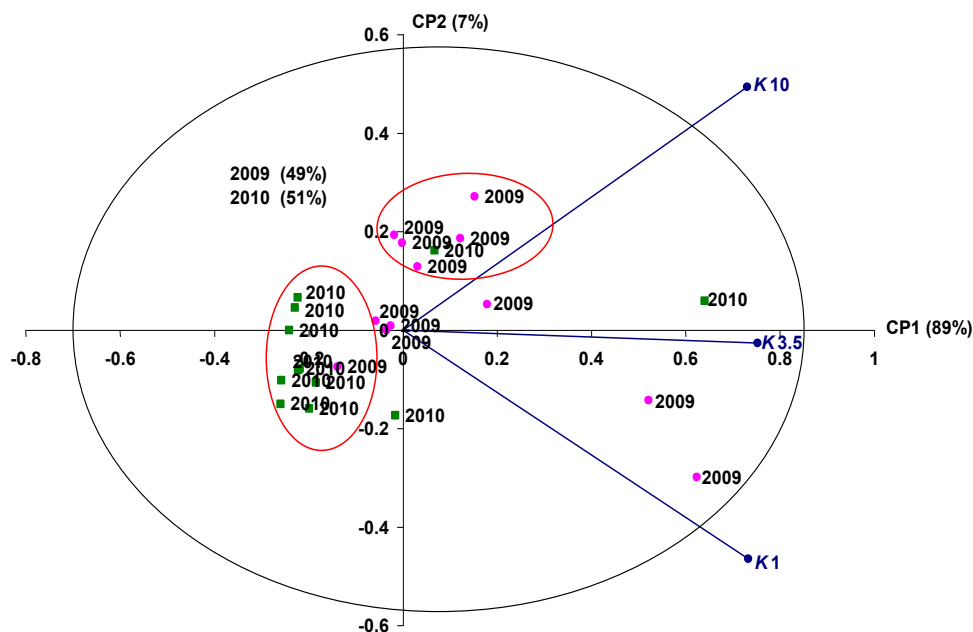


Figura 3.18 – ACP para K de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para ambos os anos de estudo. K1, K3.5, K10: condutividade hidráulica no potencial -1, -3,5 e -10cca respectivamente. CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2; PC: preparo convencional, PR: preparo reduzido e SP: sem preparo. 0, 27, 54 e 80mm: lâminas de chuva aplicada

No ano de 2009 (Figura 3.19) o CP1 explicou 83% e o CP2 10% da variação total dos dados. A ACP proporcionou agrupamentos evidentes separados conforme o preparo do solo e posicionados conforme a quantidade de chuva aplicada.

O PC e PR apresentaram redução da K em função do aumento das lâminas de chuva aplicada. O PC foi separado em dois grupos, o primeiro correspondeu a 0 e 27 mm de lâmina de chuva aplicada, o qual apresentou altos valores de K (Figura 3.19 e Tabela 3.12) e o segundo grupo, refere-se as lâminas de 54 e 80 mm, que causaram redução da K. O PR formou um grupo para as chuvas de 27, 54 e 80 mm, o qual demonstrou menor K comparado a onde não foi aplicada chuva (0 mm). No SP não foram constatadas modificações pelo aumento das lâminas de chuva, o que pode ser constatado pelo agrupamento de todas as lâminas de chuva. Dos três preparos, SP foi o que apresentou a menor K (Tabela 3.12 e Figura 3.19).

Os fatores de variação (preparos do solo x lâminas de chuva) que mais explicaram a variabilidade na K foram PC0 e PC27 com importância de 39 e 25% respectivamente (Tabela 3.11). Já a importância relativa explicada somente pelos preparos do solo foi de 68% (PC), 25% (SP) e 7% (PR).

Tabela 3.11- Fatores explicativos (preparo x lâminas de chuva) da variabilidade total da K (ACP Figuras 3.19 e 3.20) de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP

Preparo	0	27	54	80	Total
-----2009-----					
PC	39	25	1	3	68
PR	1	1	2	3	7
SP	4	4	5	13	25
-----2010-----					
PC	75	5	2	2	84
PR	2	1	1	2	7
SP	3	2	3	1	9

PC: preparo convencional; PR: preparo reduzido; SP: sem preparo; 0, 27, 54, 80mm: lâminas de chuva aplicada

Tabela 3.12 - K e D_s em função dos preparos e chuvas aplicadas em um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP

Preparox Chuva	K_1	$K_{3.5}$	K_{10}	D_s	K_1	$K_{3.5}$	K_{10}	D_s
	-----2009-----				-----2010-----			
	-----mm h ⁻¹ -----		Kg dm ⁻³		-----mm h ⁻¹ -----		Kg dm ⁻³	
PC0	614	229	71	1,19	503	237	89	1,31
PC27	398	313	56	1,35	157	108	48	1,29
PC54	152	147	50	1,26	48	25	22	1,39
PC80	148	147	57	1,31	47	28	20	1,48
Média	328	209	58	1,28	189	100	45	1,37
PR0	254	133	51	1,21	219	90	24	1,43
PR27	168	81	46	1,31	137	28	13	1,49
PR54	130	78	45	1,29	123	36	16	1,54
PR80	116	73	44	1,38	50	31	16	1,50
Média	167	91	46	1,30	132	46	17	1,49
SP0	152	91	32	1,36	70	31	9	1,60
SP27	159	80	32	1,37	87	34	14	1,59
SP54	148	68	32	1,39	88	27	7	1,66
SP80	134	50	21	1,40	90	34	14	1,40
Média	148	72	29	1,38	84	32	11	1,56

K_1 , $K_{3.5}$, K_{10} : condutividade hidráulica no potencial -1; -3,5 e -10cca respectivamente;
 D_s : densidade do solo

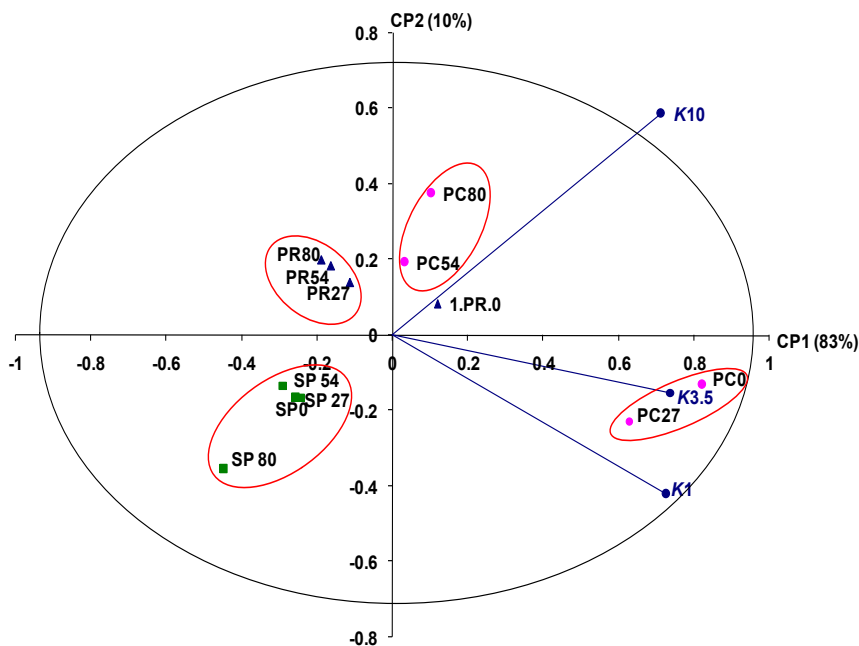


Figura 3.19 – ACP para *K* de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para o ano de 2009. K1, K3.5, K10: condutividade hidráulica no potencial -1, -3,5 e -10 cca respectivamente. CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2 PC: preparo convencional, PR: preparo reduzido e SP: sem preparo. 0, 27, 54 e 80mm lâminas de chuva aplicada

A ACP para o ano de 2010 (Figura 3.20) apresentou CP1 de 96% e CP2 de 3,5%. Os preparos do solo (fatores explicativos da variabilidade) contribuíram com importância relativa de 84% (PC), 9% (SP) e 7% (PR) na explicação da *K* (Tabela 3.11). A interação (preparo do solo x lâmina de chuva) que mais contribuiu para a explicação da variabilidade dos dados foi PC0 que explicou 75%.

Neste ano de estudo não houve uma distinção tão clara entre os preparos do solo como observado no ano de 2009. Mesmo assim, ainda foi possível observar alguns agrupamentos separados conforme os preparos do solo e dispostos no gráfico em função das lâminas de chuva aplicada. PC e PR apresentaram redução da *K* em função do aumento das lâminas de chuva aplicada.

Os maiores valores de *K* ocorreram no PC 0 e 27mm e no PR 0mm (Tabela 3.12 e Figura 3.20), o mesmo comportamento observado em 2009. Houve a formação de outros dois grupos, um unindo PC (54 e 80mm) com PR (80mm) e outro unindo o preparo SP (0, 27, 54 e 80mm) com PR (27 e 54mm), sendo que estes grupos formados apresentaram *K* baixa. O sistema de preparo SP não demonstrou alteração da *K* em função das lâminas de chuva aplicada.

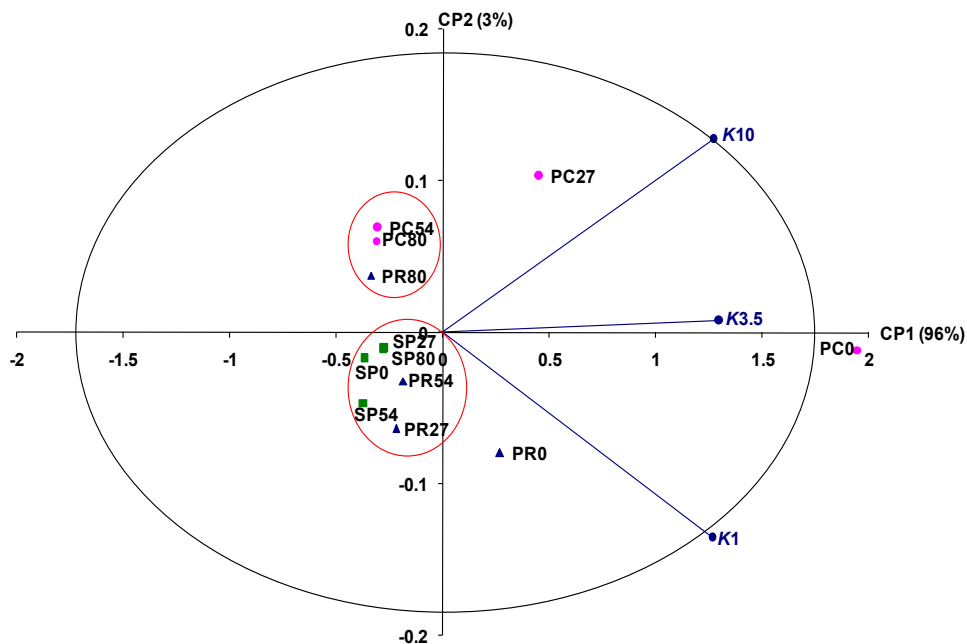


Figura 3.20 – ACP para K de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP, para o ano de 2010. K1, K3.5, K10: condutividade hidráulica no potencial -1, -3,5 e -10 cca respectivamente. CP1: Componente principal 1; CP2: Componente principal 2; PC: preparo convencional, PR: preparo reduzido e SP: sem preparo. 0, 27, 54 e 80mm: lâminas de chuva aplicada

3.2.2.2.3 Avaliação da densidade do solo (Ds)

A Ds apresentou aumento generalizado em PC e PR em função do aumento das lâminas de chuva aplicada (Tabela 3.12), já o SP apresentou valores semelhantes. Os maiores valores de Ds foram observados no SP seguido por PR e PC para os dois anos de estudo.

O aumento da Ds observado no PC e PR, em função do aumento das lâminas de chuva aplicada nos dois anos de estudo, indicou a ocorrência de adensamento superficial. Esse adensamento foi ocasionado pela ação direta da chuva sobre a superfície do solo.

3.2.2.3 Curvas de Retenção de Água (CRA)

3.2.2.3.1 Efeito de tratamentos em 2009 e 2010

A umidade de saturação entre os sistemas de preparo no ano de 2009 foi de 0,52; 0,48 e 0,48 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o PR, PC e SP, respectivamente, com maiores valores no sistema PR (Figura 3.21A), devido a maior % de área de poros observada

neste sistema de preparo (Tabela 3.4). A menor umidade de saturação no PC deve-se ao intenso revolvimento do solo associado com a superfície descoberta os quais promoveram a formação de crostas superficiais e consequente redução da porosidade com aplicação das lâminas de chuva. Já o SP apresentava cobertura como proteção superficial, porém a falta de mobilidade não permitiu formação de poros, consequentemente apresentou também menor umidade de saturação.

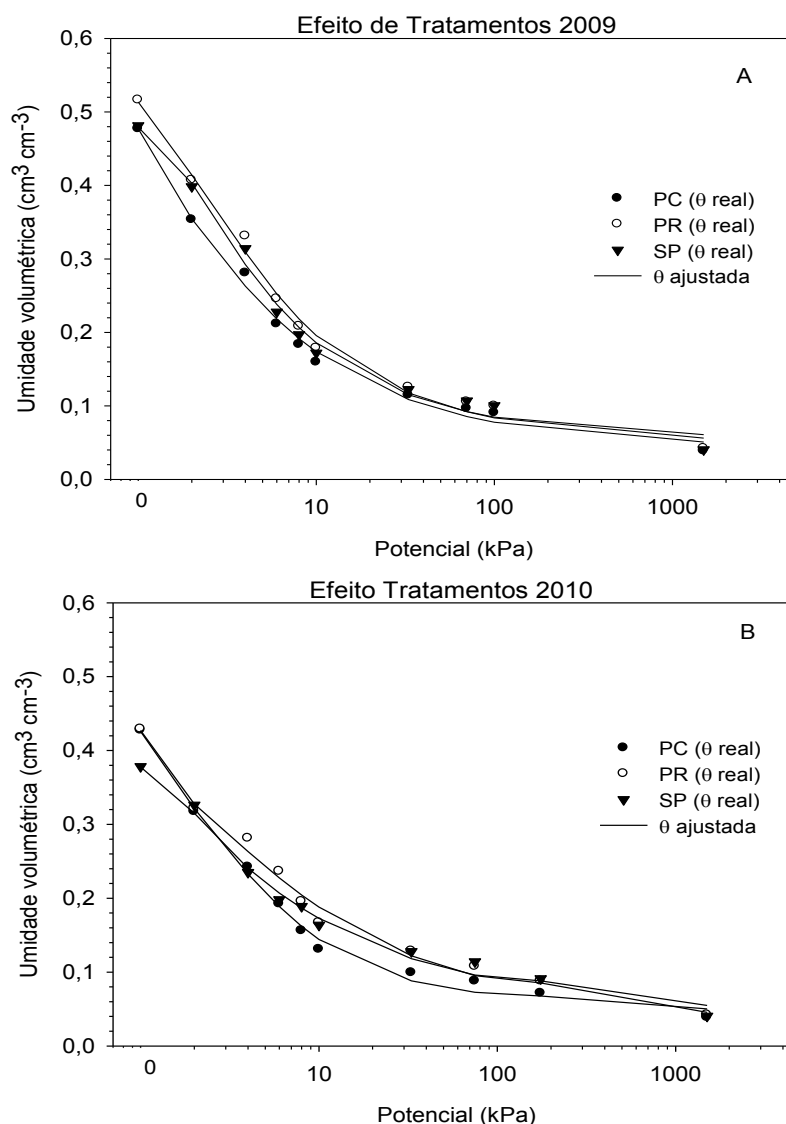


Figura 3.21 – Efeito dos preparos do solo sobre a CRA em dois anos de estudo (camada 0 – 2,5 cm) para um Argissolo Vermelho amarelo em Piracicaba, SP

Com a aplicação das pressões de sucção (-2 e -4 kPa) o PR demonstra ainda maior umidade volumétrica, seguido do SP e PC. A redução da umidade no PC, para os potenciais iniciais, demonstra a redução da porosidade neste sistema de preparo.

A umidade de saturação no ano de 2010 foi menor que em 2009 (Figura 3.21 B), PR e PC apresentaram neste ano a maior umidade, seguidos do SP. Os valores foram $0,43 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para PR e PC e $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o SP. No potencial de -2 kPa a umidade volumétrica para ambos os preparos do solo foi muito semelhante. Para os potenciais de -4 e -6 kPa maior umidade volumétrica foi constatada no PR, enquanto, PC e SP apresentaram valores semelhantes nestes potenciais (Figura 3.21 B).

3.2.2.3.2 Efeito das lâminas de chuva aplicada em 2009

Onde não aplicou-se chuva (0 mm) pode-se observar uma distinção entre os tratamentos, com menor retenção de água no PC e maior para PR e SP (Figura 3.22). Essa distinção foi observada para os primeiros potenciais aplicados, até -6 kPa, posteriormente com o aumento dos potenciais pequenas diferenças foram ressaltadas entre os tratamentos. Essa mesma tendência permaneceu com 27 mm de chuva, porém com menor distinção entre PC e os demais preparos do solo.

Com aplicação de 54 mm a retenção de água mostrou-se maior no PR até -8 kPa, os demais preparos foram semelhantes entre si. E com a chuva de 80 mm, somente na umidade de saturação observou-se uma maior diferença entre os preparos, onde o PR apresentou maior umidade de saturação. Para os demais potenciais, os preparos do solo foram semelhantes entre si, demonstrando que mesmo o PR que apresentava uma tendência de maior retenção de água até a chuva de 54 mm, passou a apresentar redução com a aplicação de 80 mm de chuva, onde as curvas dos três sistemas de preparo foram semelhantes entre si.

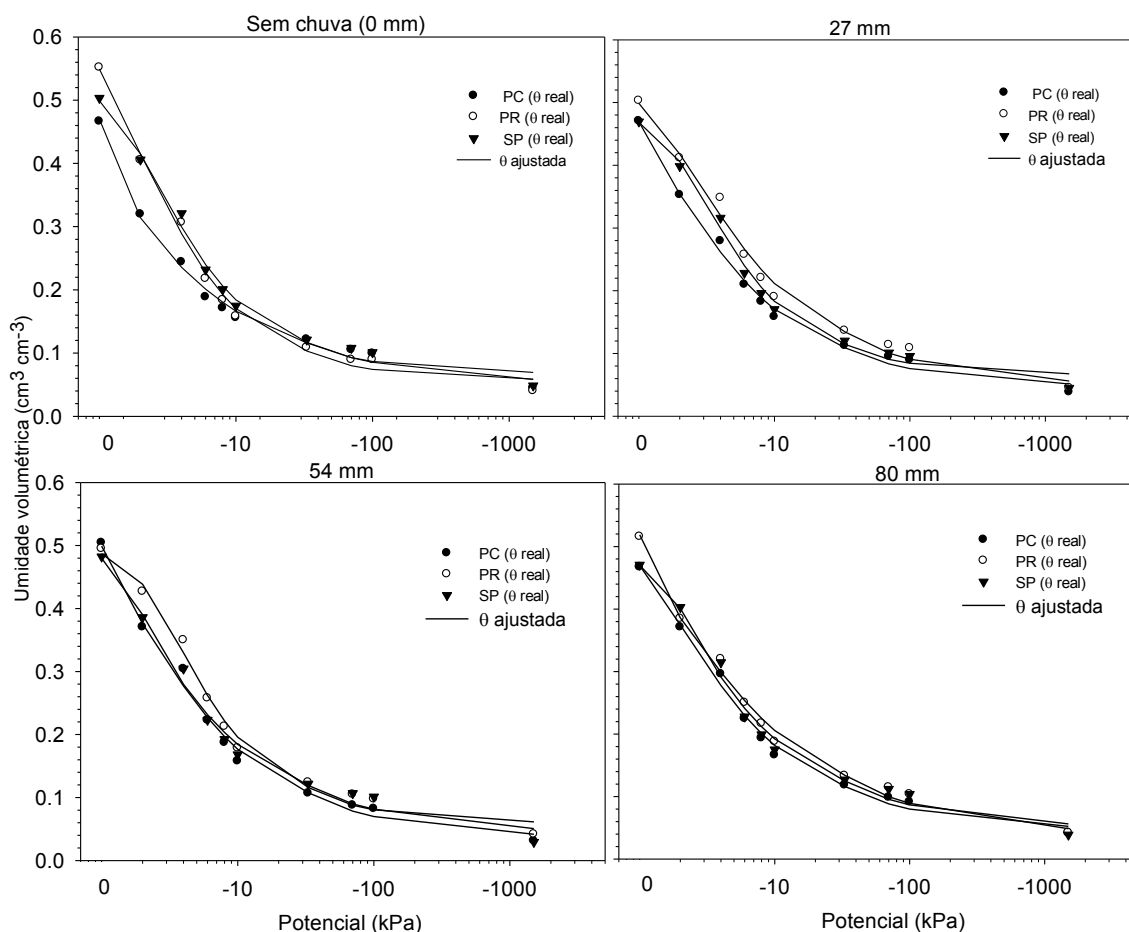


Figura 3.22 – Efeito das lâminas de chuvas aplicadas no ano de 2009 para a camada 0 – 2,5cm de um Argissolo Vermelho amarelo em Piracicaba, SP

3.2.2.3.3 Efeito das chuvas aplicadas em 2010

No ano de 2010, onde não se aplicou chuva (0 mm) a umidade de saturação foi de 0,46; 0,44 e 0,38 cm³ cm⁻³ para PC, PR e SP respectivamente. Para os potenciais de - 8 até -175 kPa, houve uma tendência, onde PR e SP apresentaram maior retenção de água do que o PC (Figura 3.23). Para as lâminas de chuva de 27mm e 54mm a tendência foi também semelhante ao observado em 0 mm, onde a umidade de saturação foi a mesma para PR e PC (0,42 cm³ cm⁻³) e SP apresentou menor umidade de saturação (0,36 cm³ cm⁻³). Para os demais potenciais, observa-se uma tendência de menor retenção de água no PC.

Com aplicação de 80mm de lâmina de chuva a umidade de saturação dos sistemas de preparo foi de 0,44cm³ cm⁻³ para o PR e de 0,39 cm³ cm⁻³ para PC e SP. Para os

demais potenciais a tendência foi muito semelhante as lâminas de chuva descritas anteriormente, onde a retenção de água foi menor no PC.

Observa-se nas chuvas de 0, 27 e 54mm que a maior umidade de saturação ocorreu no PR e PC. Com o aumento da chuva (80mm), a umidade de saturação diminuiu no PC, possivelmente pela crosta que se formou com o efeito da chuva, o que diminuiu a porosidade da camada superficial, causando assim redução da umidade de saturação.

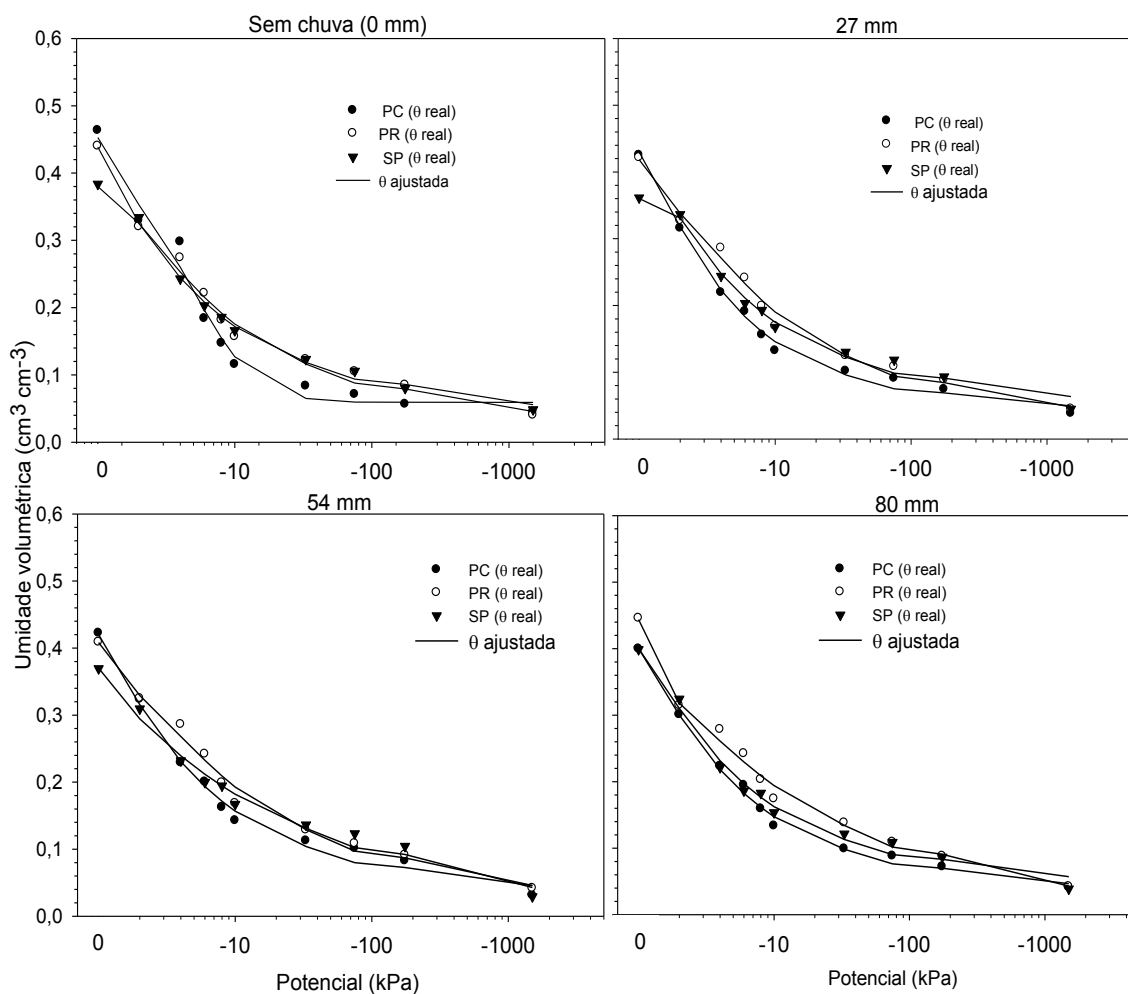


Figura 3.23 – Efeito das lâminas de chuvas aplicadas no ano de 2010 para a camada 0 – 2,5cm de um Argissolo Vermelho amarelo em Piracicaba, SP

3.2.3 Discussão

3.2.3.1 Evolução da porosidade, K , D_s e CRA nos anos avaliados (2009 e 2010)

Porosidade

De maneira geral, a magnitude dos valores da porcentagem de área de poros foi maior em 2009 do que em 2010. Observou-se que a % de área de poros Comp_g foi a classe predominante nos dois anos. Porém em 2010 esta classe apresentou redução, comparada à 2009 e as classes de poros Arr_p, Arr_m, Arr_g, Alon_m, Alon_g apresentaram aumento (Tabelas 3.3 e 3.5).

O número de poros apresentou maior magnitude dos valores no ano de 2010 comparado a 2009. A classe de poros Arr_p foi a predominante em ambos os anos, porém em 2010 foi maior que em 2009. As demais classes consideradas também foram maiores em 2010 (Tabelas 3.7 e 3.8).

A redução da porcentagem de área resultou em aumento do número de poros. Como esse efeito ocorreu em ambos os sistemas de preparo, possivelmente seja explicado pela ocorrência de um adensamento na estrutura, pelo período em que a área ficou em pousio (1 ano) ou até mesmo por uma característica intrínseca desse solo.

K , D_s e CRA

A K foi menor no ano de 2010 comparado com 2009 e a D_s apresentou aumento (Tabela 3.12), comportamento este verificado em todos os sistemas de preparo. Possivelmente, o aumento da D_s e a redução da porosidade promoveram também a redução da K .

Os valores de umidade volumétrica da CRA foram maiores no ano de 2009 comparados com 2010, até o potencial de 6 kPa, para todos os sistemas de preparo. A partir de 8 kPa, a umidade volumétrica foi semelhantes entre os anos avaliados, para ambos sistemas de preparo.

O aumento constatado na D_s e a redução na porosidade promoveram redução na K , e da mesma forma, ocasionaram também, a redução da umidade volumétrica do solo, no ano de 2010 comparado à 2009.

3.2.3.2 Modificações na porosidade das camadas analisadas (crosta e subcrosta) em função do preparo do solo e lâminas de chuva aplicada

No PC e PR, a porcentagem de área de poros Comp_g diminuiu na camada da crosta, com a aplicação de chuva simulada, nos dois anos de estudo. Esta tendência de redução da porosidade, mais próximo da superfície pela formação de crostas também já foi observada por Fox et al. (2004). Por outro lado, neste mesmo solo do estudo, não foram observadas diferenças significativas na morfologia dos poros, após eventos de chuvas naturais (CASTILHO, et al. 2011). O SP apresentou, de maneira geral, porcentagem de área de poros semelhantes para as diferentes lâminas de chuva aplicada, na camada da crosta e nos dois anos de estudo, demonstrando não haver influência das chuvas aplicadas nesta camada.

A redução da porcentagem de área de poros Comp_g observada em PC e PR ocasionou aumento na porcentagem de área e do número de poros arredondados e alongados, assim também como já constatado por Fox et al. (2004). Essa redução foi decorrente do impacto das gotas na superfície do solo (FOX et al., 2004). Com isso, os poros complexos (contínuos) e grandes, foram destruídos e/ou transformados em poros arredondados e alongados (sem continuidade). Poros na camada da crosta tendem a ser arredondados e não ligados uns aos outros, de modo que se tornam ineficientes na transmissão de água (PANINI et al., 1997). Em um solo cultivado convencionalmente, com presença de crostas superficiais, observou-se a redução da porosidade de condução nas camadas superficiais ocasionando consequente redução do movimento de água em profundidade (PAGLIAI et al., 2004). Os autores enfatizam ainda, que essa redução da porosidade, além de dificultar o crescimento radicular das culturas pode aumentar as perdas de solo por erosão. Entretanto, Toma, (2008) observou menor quantidade dos poros arredondados, sem condução (vesículas), nas crostas superficiais com aplicação de doses de composto orgânico, porém quando o composto não foi aplicado, ou as doses foram baixas, houve formação de poros arredondados (vesículas) nas crostas.

Na camada da subcrosta, no PC, as respostas da % de área de poros em relação às chuvas aplicadas, apresentaram-se semelhantes indicando não haver efeito das lâminas de chuva aplicada nessa camada. Já o PR em 2009 apresentou % de área de poros semelhante com o aumento das lâminas de chuva, porém em

2010 ocorreu redução. O sistema SP, na camada da subcrosta, nos dois anos, demonstrou redução da % de área de poros Comp_g e conseqüente aumento dos arredondados.

3.2.3.3 Efeito dos preparos do solo e lâminas de chuva aplicada sobre a *K*

A condutividade hidráulica é mais dependente da estrutura do que da textura, assim, práticas culturais adotadas que alterem a estrutura do solo, influenciam diretamente a condutividade hidráulica.

A maior *K* foi observada no PC onde a chuva não foi aplicada (0mm), e com a lâmina inicial de chuva (27mm). Posteriormente, com o aumento das lâminas de chuva para 54 e 80 mm, a *K* diminuiu e os valores neste sistema de preparo chegaram próximos do PR e SP. A grande redução da *K* constatada nas lâminas de chuva maiores tem relação com a redução dos poros Comp_g e aumento dos poros arredondados (Tabelas 3.4 e 3.5), ou seja, diminuíram os poros condutores e aumentaram os poros sem conectividade. Essa redução na *K* também tem relação com a laminação de material fino acumulado abaixo da camada de grãos de quartzo, como observado no capítulo 2 (descrições micromorfológicas). O material fino acumulado pode ocasionar obstrução de poros e conseqüentemente reduzir a *K*. Entretanto, avaliando o mesmo solo deste estudo, Castilho, et al., (2011) não observaram modificações significativas na condutividade hidráulica após eventos de chuvas naturais ($> 25\text{mm h}^{-1}$) e formação de crostas, fato, possivelmente atribuído a distribuição temporal das chuvas, pois, durante o período de intervalo entre uma chuva e outra, a crosta formada sofre rachaduras e, dessa forma, as medidas de condutividade hidráulica das chuvas subseqüentes não serão constatadas.

A redução da condutividade hidráulica em sistemas de preparo convencional pela aplicação da chuva simulada foi também observada por Silva e Kato (1997) e por Souza et al. (2007), assim como Ries e Hirt (2008) que também constataram redução em 50% na taxa de infiltração de água no solo e conseqüente aumento do escoamento superficial.

O PR também apresentou altos valores de *K* onde a chuva não foi aplicada (0mm) que foram reduzindo com o aumento das lâminas de chuva. A magnitude de redução da *K* neste sistema de preparo do solo no ano de 2010 foi mais evidente que em 2009. O sistema SP foi o que apresentou os valores de *K* mais baixos, nos

dois anos de estudo, e também apresentou maior magnitude de redução em 2010 do que em 2009 (Tabela 3.12).

No SP não foram observadas grandes reduções em função do aumento das lâminas de chuva aplicada. Os valores de K foram semelhantes entre si, o que pode ser atribuído ao não revolvimento do solo neste sistema de preparo.

Possivelmente, o que pode ter relação com a proteção superficial pela grande quantidade de cobertura acumulada, que não é presente no PC e parcialmente no PR, evitando assim o impacto direto das gotas na superfície do solo e consequentemente a redução da % de área de poros Comp_g e da K .

3.2.3.4 Relação da porosidade com a K em função dos preparos do solo e lâminas de chuva aplicada

Para melhor compreensão da relação entre as variáveis estudadas, foi realizada uma análise de correlação de Pearson para as camadas analisadas e os anos estudados. Assim, pode-se observar na camada da crosta, no ano de 2009, que a K correlacionou-se negativamente com a % de área de poros Arr_p (-0,34*), Comp_m (-0,33*) e positivamente com % de área de poros Comp_g (0,49**) (Tabela 13). Isso comprova que quanto maior a % de área de poros Comp_g, maior será a K . Fato evidenciado no PC e PR, onde não aplicou-se chuva (0mm), que apresentaram as maiores % de área de poros Comp_g e, conseqüentemente, os maiores valores de K . A medida que as lâminas de chuva aumentaram, a % de área de poros Comp_g diminuiu, e a % de área de poros arredondados e alongados aumentou, e consequentemente a K diminuiu também.

A modificação ocasionada no arranjo dos poros, em função das lâminas de chuva aplicada, foi responsável pela redução da K e aumento da Ds. Redução da porosidade, pela formação de crosta decorrente da ação da chuva, foi também relatada por (FOX et al., 2004; PAGLIAI et al., 2004; PANINI et al., 1997; ROUSSEVA et al., 2002; VALENTIN, BRESSON, 1992). Do mesmo modo, com aplicação de chuva simulada, uma pequena redução na macroporosidade foi responsável por grande diminuição da condutividade hidráulica saturada, em sistemas de preparo convencional e plantio direto (SILVA, KATO 1997).

A condutividade hidráulica não depende somente da porosidade total, mas também da distribuição de formas de poros e classes de tamanho. Poros redondos são menos eficazes na transmissão de água do que irregulares (FOX et al., 2004;

VALENTIN 1991). Dessa forma é perfeitamente compreensível a causa da correlação positiva entre poros Comp_g e a K, e negativa com os arredondados e alongados, uma vez que a K depende fortemente da forma e continuidade dos poros.

A Ds correlacionou-se positivamente com % área de poros Arr_p (0,35*) e Alon_g (0,34*) e negativamente com Comp_g (-0,44**) e K (-0,37*) (Tabela 3.13), isso enfatiza que o aumento da Ds constatada com a aplicação das chuvas também diminuiu a % de área de poros Comp_g e aumentou a % de área de poros Arr_p e Alon_g e essa dinâmica ocasionada na porosidade reduziu a K. Correlação negativa de macroporos com a densidade do solo e positiva com a condutividade hidráulica foi também reportada por Silva e Kato (1997).

Da mesma forma, no ano de 2010, ainda para a camada da crosta, observou-se correlação negativa da K com % de área de poros Arr_p (-0,41*), Arr_m (-0,44**), Arr_g (-0,49**), Alon_g (-0,62**) e positiva com Comp_g (0,44**). A Ds neste ano também apresentou correlação negativa com K (-0,38*) (Tabela 3.13).

A K na camada da subcrosta, não apresentou correlações significativas com as variáveis analisadas nos dois anos. Nesta camada, somente a Ds correlacionou-se positivamente com % área de poros Arr_m (0,38*) e negativamente com Comp_g (-0,53**) e K (-0,37) em 2009 e com K (-0,38*) em 2010.

Tabela 3.13 – Correlação de Pearson entre K e % de área de poros para diferentes camadas e anos de estudo de um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP

Crosta 2009								
	Arr_p	Arr_m	Arr_g	Alon_m	Alon_g	Comp_m	Comp_g	K ¹
K ¹	-0.34*	-0.26	-0.06	-0.30	-0.30	-0.33*	0.49**	1
Ds	0.35*	0.32	0.11	0.27	0.34*	0.23	-0.44**	-0.37*
Crosta 2010								
K ¹	-0.41*	-0.44**	-0.49**	0.01	-0.62**	-0.18	0.44**	1
Ds	0.16	0.31	0.29	0.09	0.27	-0.08	-0.19	-0.38*
Subcrosta 2009								
K ¹	-0.15	-0.03	0.14	-0.24	0.17	-0.23	0.23	1
Ds	0.32	0.38*	0.29	0.31	0.31	0.30	-0.53**	-0.37*
Subcrosta 2010								
K ¹	-0.08	-0.20	-0.13	0.17	-0.26	0.00	0.23	1
Ds	0.19	0.24	-0.01	0.17	0.16	0.19	-0.32	-0.38*

¹ valores de K para o potencial -1 cca; * e ** significativo a 5 e 1% respectivamente

3.2.3.5 CRA

De maneira geral foram observadas poucas diferenças de umidade volumétrica em função das lâminas de chuva aplicada em ambos os sistemas de preparo e anos de estudo (2009 e 2010). A umidade volumétrica não demonstrou alteração com o aumento das chuvas aplicadas, o que pode ser atribuído ao tipo de solo.

Em ambos os anos foi possível observar uma tendência do PR em apresentar maior retenção de água, e o PC menor retenção. Efeito que provavelmente seja em função das características de cada preparo. O PR em função do semi-revolvimento promoveu a formação de poros e a cobertura parcialmente incorporada promoveu proteção da superfície do solo. Já o PC em função da alta intensidade de revolvimento e pela permanência da superfície integralmente exposta ao efeito da chuva, sofreu alteração estrutural devido a desagregação e formação da crosta, consequentemente redução dos poros e da retenção de água.

As maiores diferenças observadas entre os sistemas de preparo, ocorreram até - 6 kPa, o que comprova que mudanças decorrentes de formação de crostas são mudanças estruturais, perceptíveis nos primeiros potenciais.

As pequenas diferenças observadas podem ter ocorrido em função da crosta se concentrar superficialmente e o tamanho da amostra da CRA ser de 2,5cm, e possivelmente, o efeito da crosta formada se dilua na amostra. Castilho et al., (2011) também não observaram diferenças nas curvas de retenção, avaliando esse mesmo solo com eventos de chuvas naturais.

3.3 Conclusões

As variáveis medidas neste estudo demonstraram diferenças entre os anos avaliados (2009 e 2010).

Nos sistemas de preparo convencional e preparo reduzido, a maior redução da porcentagem de área de poros, pelo efeito das lâminas de chuva aplicada, ocorreram na camada da crosta.

O sistema sem preparo apresentou redução da porcentagem de área de poros em função das lâminas de chuva aplicada na camada da subcrosta.

A camada da crosta foi responsável pela redução da porcentagem de área de poros e condutividade hidráulica e aumento da densidade do solo nos sistemas de

preparo convencional e preparo reduzido. Correlações significativas entre condutividade hidráulica, densidade do solo e porcentagem de área de poros ocorreram nesta camada.

Este estudo também permitiu, conforme relatos já descritos na literatura, a observação da redução dos poros irregulares (Complexos) e aumento dos arredondados pelo efeito da chuva.

A porosidade medida pela análise de imagens e a condutividade hidráulica foram as variáveis que melhor explicaram as alterações causadas nos diferentes sistemas de preparo do solo em função das chuvas aplicadas.

As maiores umidades volumétricas observadas nas curvas de retenção de água ocorreram no sistema de preparo reduzido e as menores no preparo convencional. As umidades volumétricas não demonstraram modificações em função das lâminas de chuva aplicada.

Referências

AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on the infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 848-881, 1981.

ANDERSON, W.F.; BEUTE, M.K.; WYNNE, J.C.; WONGKAEW, S. Statistical procedures for assessment of resistance in a multiple foliar disease complex of peanut. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 80, p. 1451-1459, 1990.

ANKENY, M.D.; AHMED, M.; KASPAR, T.C; HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 467-470, 1991.

Base de dados meteorológicos, USP/ESALQ. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/postoaut.html>. Acesso em: 20 de set. 2011. USP/ESALQ-Departamento de Engenharia e Biosistemas.

BEDAIWY, M.N.A. Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils. **Catena**, Amsterdam, v. 72, p. 270-281, 2008.

BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D.; RUIZ, H.A.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M.A.; MENEZES, S.J.M.C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 30, 13-21, 2006.

BRESSON, L.M.; VALENTIN, C. Soil surface crust formation: contribution of micromorphology, In: HUMPHREYS, A.J.R.-V.A.G.S. (Ed.). **Developments in Soil Science**, Elsevier, 1993. p. 737-762.

CASTILHO, S.C.P.; COOPER, M.; JUHÁSZ, C.E.P. Influence of crust formation under natural rain on physical attributes of soils with different textures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1893-1905, 2011.

CASTRO, L.G.; COGO, N.P.; VOLK, L.B.D. Alterations in soil surface roughness by tillage and rainfall in relation to water erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 339-352, 2006.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; CHAPLOT, V. Origin of microaggregates in soils with ferrallic horizons. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 256-263, 2005.

FOX, D.M.; BRYAN, R.B.; FOX, C.A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 109 - 120, 2004a.

FOX, D.M.; LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. **Catena**, Amsterdam, v. 32, p. 87-100, 1998.

GABRIEL, K.R. The Biplots graphic display of matrices with application to principal component analysis. **Biometrika**, London, v. 58, p. 453-467, 1971.

HALLAIRE, V.; COINTEPAS, J.P. Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. **Agronomie**, Paris, v.13, p. 155-164, 1993.

KROONENBERG, P.M. Introduction to biplots for GxE tables. 1997. Disponível em <http://www.fsw.leidenuniv.nl/~kroonenb/document/biplot.zip>. Acesso em: 12 fev. 2012.

LADO, M.; PAZ, A.; BEN-HUR, M. Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 935-942, 2004.

LEVY, G.J.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Factors Affecting the Stability of Soil Crusts in Subsequent Storms. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 196 - 201, 1986.

LIPKOVICH, I.; SMITH E.P. "Biplot and Singular Value Decomposition Macros for Excel®." **Journal of Statistical Software**, [s.1], v.7, p.1-15, 2002. Disponível em: <http://www.jstatsoft.org/v07/i05>. Acesso em: 12 fev.2012.

Mc INTYRE, D.S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 85, p. 185 -189, 1958.

MORAAGUILERA, G.; NIETOANGEL, D.; TELIZ, D.; CAMPBELL, C.L. Development of a prediction model for papaya ringspot in Veracruz, Mexico. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 77, p. 1205-1211, 1993.

MURPHY, C.P.; BULLOCK, P.; TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 98, p.498-508, 1977.

PAGLIAI, M.; La MARCA, M.; LUCAMANTE, G.; GENOVESE, L. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 34, p. 391-403, 1983.

_____. Effects of zero and conventional tillage on the length and irregularity of elongated pores in a clay loam soil under viticulture. **Soil & Tillage Research** v. 4, p. 433 - 444, 1984.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 131-143, 2004.

PANINI, T.; TORRI, D.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI, M.; SANCHIS, M.P.S. A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. **Catena**, Amsterdam, v. 31, p. 199 - 218, 1997.

PATIN, J.; MOUCHE, E.; RIBOLZI O.; CHAPLOT, V.; SENGTAHEVANGHOUNG, O.; LATSACHAK, K.O.; SOULILEUTH, B.; VALENTIN C. Analysis of runoff production at the plot scale during a long-term survey of a small agricultural catchment in Lao PDR. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 426-427, p. 79-92, 2012.

PERROUX, K.M.; WHITE I. Designs for disk permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1205-1215, 1988.

RIES, J.B.; HIRT, U. Permanence of soil surface crusts on abandoned farmland in the Central Ebro Basin/Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 72, p. 282 - 296, 2008.

RINGROSE-VOASE, A.J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 29, p. 777-813, 1991.

ROUSSEVA, S.; TORRI, D.; PAGLIAI, M. Effect of rain in the macroporosity at the soil surface. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, p. 83 - 94, 2002.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 668-679, 2002.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 213-220, 1997.

SOUZA, E.S.; ANTONINO, A.C.D.; LIMA, J.R.S.; GOUVEIA NETO, G.C.; SILVA, J.M.; SILVA, I.F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 2, p. 69-74, 2007.

TOMA, R.S. **Efeito da aplicação de composto orgânico sobre o processo de encrostamento e a recuperação de solos degradados pela erosão hídrica.** 2008. 111 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

USÓN, A.; POCH, R.M. Effects of tillage and management practices on soil crust morphology under a Mediterranean environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 191-196, 2000.

VALENTIN, C. Surface crusting in 2 alluvial soils of northern niger. **Geoderma**, Amsterdam, v. 48, p. 201-222, 1991.

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 55, 225 -245, 1992.

Van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. The RETC code for quantifying the Hydraulic Conditions of unsaturated soils. U.S Salinity Laboratory Riverside - California. 1991. 85p.

4 EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO SOB CHUVA SIMULADA USANDO UM ÍNDICE DE RUGOSIDADE BASEADO EM SEMIVARIOGRAMAS

Resumo

Os fatores que contribuem para a maior alteração da rugosidade superficial do solo são os sistemas de preparo e as condições pluviométricas. Este estudo avaliou o comportamento da rugosidade superficial em função de diferentes sistemas de preparo do solo e aplicação de chuva simulada. O experimento foi conduzido, nos anos de 2009 e 2010. Em parcelas de 15 x 30 m foram aplicados diferentes preparos do solo: preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e sem preparo (SP). Dentro das parcelas foram instaladas as micro-parcelas com tamanho de 1m x 1m, nas quais foram aplicadas diferentes lâminas de chuva simulada (0, 27, 54 e 80 mm) com intensidade de 80 mm h⁻¹. O microrrelevo do solo foi medido com um rugosímetro à laser com resolução horizontal de 1-cm. As leituras das alturas foram submetidas à análise geoestatística pelo método dos semivariogramas, e o índice utilizado para representar a rugosidade do solo (IR) foi extraído dos semivariogramas. O sistema de preparo reduzido e sem preparo apresentaram maior rugosidade no primeiro ano, já no segundo ano a maior rugosidade foi observada no sistema sem preparo. O RI, apresentou diferença significativa entre as lâminas de chuva aplicada, para o mesmo tratamento, somente no sistema sem preparo e no segundo ano. No preparo convencional o RI não apresentou diferenças entre as lâminas de chuva aplicada, e demonstrou a mesma tendência nos dois anos estudados, inicialmente ocorreu um aumento até uma quantidade máxima de chuva reduzindo em seguida. Diferenças entre os anos estudados ocorreram somente no sistema sem preparo, que apresentou maior rugosidade no segundo ano em relação ao primeiro, os demais preparo convencional e preparo reduzido foram similares e não apresentaram diferenças significativas entre os dois anos avaliados.

Palavras-chave: Preparos do solo; Microrrelevo; Geoestatística

Abstract

Among the factors that contribute to greater changes in soil surface roughness are the tillage systems and rainfall conditions. This study evaluated the changes of surface roughness under different tillage systems and the application of artificial rain. The experiment was conducted in 2009 and 2010. In the plots of 15 x 30 m were applied the tillage systems: conventional tillage (CT), reduced tillage (RT) and no tillage (NT). Inside plots were installed the micro plots with 1 m x 1 m size, which were applied in different layers of simulated rainfall (0, 27, 54 and 80 mm) with an intensity of 80 mm h⁻¹. Soil microrelief was measured with a portable laser scanner with a 1-cm horizontal resolution. The height readings were submitted to geostatistical analysis through the semivariogram method, and the index used to

represent the roughness of the soil (RI) was extracted from the semivariograms. The reduced tillage and no-tillage systems presented higher roughness in the first year, but in the second year, the greatest RI was observed in the no-tillage system. The RI values in the same treatment differed between applied rainfalls only in no-tillage for the second year. In conventional tillage, the RI did not differ between the applied rainfalls, but showed the same trend in the two years studied: initially an increase of roughness occurred until a maximum rain amount, then it decreased. Differences between the years studied occurred only in no-tillage, which showed greater RI in the second year in comparison to the first one, conventional tillage and reduced tillage were similar and did not differ between the two years evaluated.

Keywords: Tillages; Microrelief; Geostatistics

4.1 Introdução

O microrrelevo do solo refere-se à configuração da superfície do solo. A rugosidade do solo é definida pelas mudanças nas alturas em referência a forma geral do microrrelevo (DARBOUX, 2011) e, índices de rugosidade são medidas específicas usadas para a quantificação dos componentes da rugosidade (ex. amplitude vertical, correlação espacial). O conhecimento da dinâmica do microrrelevo é fundamental na compreensão da erosão hídrica do solo. Os principais processos relacionados à erosão hídrica como o armazenamento de água nas depressões, o desprendimento do solo pelo cisalhamento ou pelo efeito das gotas da chuva e o transporte de sedimentos, ocorrem inicialmente ao nível da microescala da superfície do solo e são fortemente influenciados pela dinâmica do microrrelevo.

Diferentes elementos que variam de grãos individuais, agregados, torrões, preparo e declividade contribuem para a conformação do microrrelevo e suas respectivas escalas (HUANG, BRADFORD, 1992), entretanto, o preparo do solo e as condições pluviométricas são os principais contribuintes para sua alteração (ALLMARAS et al., 1966; TACONET, CIARLETTI, 2007). Vários estudos têm demonstrado que o preparo aumenta a rugosidade do solo quando comparado ao sistema sem preparo, e que a chuva é o principal fator que causa o seu decréscimo (BERTOL et al., 2006; ELTZ, NORTON, 1997; LAMPURLANES, CANTERO-MARTINEZ, 2006; PANACHUKI et al., 2010; ZOBECK, ONSTAD, 1987). Neste contexto, sistemas conservacionistas de manejo são empregados devido aos benefícios que promovem no solo, especialmente no potencial de redução da erosão do solo. Dentre os sistemas utilizados, o preparo reduzido tem apresentado grande

expansão no Brasil nos últimos anos. Este aumento é consequência do conjunto de benefícios promovidos comparado aos outros sistemas de preparo: aumento da rugosidade do solo (BERTOL et al., 2006; PANACHUKI et al., 2010; ZOBECK, ONSTAD, 1987), proteção da superfície do solo com resíduos culturais e aumento do rendimento operacional de máquinas e economia de combustíveis (HADLOW, MILLARD, 1978). A alta rugosidade promovida por este sistema de preparo, associada aos resíduos culturais, atua como estratégia para conservação do solo e da água, por que (1) aumenta a capacidade do solo em reter e infiltrar água, (2) reduz a velocidade e o volume de escoamento superficial da água e, consequentemente, (3) reduz as perdas de sedimentos (BERTOL et al., 2006; CASTRO et al., 2006; DARBOUX, HUANG, 2005; GOVERS et al., 2000; MWENDERA, FEYEN, 1994).

A forma mais comum de expressar a rugosidade da superfície do solo é utilizando um índice que, por um simples número, representa a conformação da superfície do solo. Vários índices têm sido descritos e usados na literatura. Um dos primeiros índices que foi definido é o índice de rugosidade aleatória (RR) (ALLMARAS, 1966), o qual representa a distribuição aleatória do microrrelevo. Usado por muitos autores (ALLMARAS et al., 1966; BERTOL et al., 2006; GARCIA MORENO et al., 2010; HANSEN et al., 1999; JESTER, KLIK, 2005; KAMPHORST et al., 2000; ONSTAD, 1984) este índice é usualmente calculado pelo desvio padrão das alturas após remoção do efeito da declividade e marcas do preparo. Uma das suas maiores limitações é a descrição somente da componente vertical da rugosidade, ou seja, não considera a organização espacial das alturas (HUANG, BRADFORD, 1992). De acordo com Huang e Bradford (1993), um índice de rugosidade deve considerar a correlação espacial da topografia e ter estrutura dependente da escala.

Outro índice de rugosidade conhecido como LD (diferença de elevação limite), representa a média da diferença absoluta de altura entre dois pontos da superfície do solo (LINDEN, VAN DOREN, 1986). Este índice, tem relação com a componente espacial da rugosidade e pode representar a capacidade da superfície em armazenar a enxurrada (BERTOL et al., 2006). Um terceiro índice emprega o conceito de tortuosidade (BOIFFIN, 1984) e descreve a relação entre o comprimento de um perfil de uma superfície e a distância entre o ponto inicial e final desta superfície. Pode representar a capacidade de determinadas superfícies em reduzir a

enxurrada, entretanto, depende da escala de tomada das medidas (BERTOL et al., 2006).

Outra forma de expressar a rugosidade da superfície é utilizando técnicas geoestatísticas, fazendo uso dos semivariogramas. Este método é comum em estudos de rugosidade (DARBOUX et al., 2002; ELTZ, NORTON, 1997; HUANG, BRADFORD, 1992; LINDEN, VAN DOREN, 1986; MORENO et al., 2008a; VAZQUEZ et al., 2010). O semivariograma informa a relação entre a diferença das elevações e o comprimento de escala (HUANG, BRADFORD, 1992). Características estas que não podem ser avaliadas, por exemplo, quando se utiliza o índice RR por que este não considera a relação espacial entre as medidas das alturas.

O objetivo deste estudo foi comparar a rugosidade superficial em diferentes sistemas de preparo e sua evolução sob chuva simulada em dois anos consecutivos. A rugosidade superficial foi quantificada usando um índice baseado em semivariogramas.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Material e Métodos

Os procedimentos de desenvolvimento experimental, implantação dos tratamentos e aplicação das chuvas simuladas são os mesmos descritos no Capítulo 2 (páginas 24 à 26).

Coleta de dados de Rugosidade

As coletas de dados para análise da rugosidade superficial foram realizadas 24 horas após a realização da simulação de chuva, em todas as parcelas (Figura 4.1).

Nas parcelas do PC e PR, as leituras foram realizadas diretamente sobre a superfície do solo, já no sistema SP fez-se a retirada manual da cobertura do solo com tesoura de poda. A aquisição dos dados foi realizada com um rugosímetro portátil à laser (Figura 4.1) adaptado de Arvidsson e Bölenius (2006), onde cada leitura (z) foi feita em 10 mm x 10 mm (resolução horizontal), gerando um grid de 10.000 pontos amostrados em cada micro parcela de 10.000 cm².

As leituras são fornecidas pelo rugosímetro em milivolt e foram transformadas para milímetro através de um fator de conversão eq. (1), (2) e (3). Posteriormente foram submetidas a análise geoestatística, pelo cálculo dos semivariogramas.

$$P1 = x * 10 \quad (1)$$

$$P2 = y * 10 \quad (2)$$

$$P3 = \frac{(z*1,5)}{4096} \quad (3)$$

Onde:

x e y: distância entre pontos;

1,5: distância percorrida pelo raio laser (sensor – superfície do solo – retorno ao sensor);

4096: fator de conversão de milivolt para milímetro;



Figura 4.1 – Detalhes do rugosímetro, utilizado para as medidas de elevações da superfície do solo

Análise do microrelevo

Semivariogramas

Semivariogramas são comumente usados para analisar o grau de dependência espacial entre amostras (DARBOUX et al., 2002; ELTZ e NORTON, 1997; HUANG, BRADFORD, 1992; LINDEN, VAN DOREN, 1986; VAZQUEZ et al., 2010). Os dados obtidos foram submetidos a análise geoestatística por meio do cálculo dos semivariogramas experimentais (DARBOUX et al., 2002), os quais foram estimados sobre 2/3 (ou seja, 69 cm) da grande parte da distância determinada à campo. Um semivariograma pode ser definido pela seguinte eq. (4):

$$\gamma(\ell) = \frac{1}{2N} \sum [z(x) - z(x + \ell)]^2 \quad (4)$$

Onde: γ é a semivariância, ℓ é a lag distância entre pontos, $z(x)$ é a elevação em x e N é o número de pares considerados.

Índice de rugosidade (IR)

O Índice de Rugosidade (IR) utilizado neste trabalho para representar a rugosidade do solo, foi extraído dos semivariogramas, em uma área denominada “alcance”, a qual separa uma área de forte dependência espacial à curta distância de uma área de baixa dependência espacial, em uma distância maior. Este índice foi escolhido em função de diversos estudos que têm demonstrado a importância de considerar a componente espacial e estrutura dependente da escala em estudos de rugosidade do solo (DARBOUX et al., 2002; ELTZ, NORTON, 1997; HUANG, BRADFORD, 1992; LINDEN, VAN DOREN, 1986; MORENO et al., 2008; VAZQUEZ et al., 2010). Neste estudo, não foi realizada a remoção das tendências de declividade e das marcas de preparo, pois as micro-parcelas apresentavam declividade nula e as marcas criadas pelos preparos foram consideradas relevantes feições da rugosidade.

Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao cálculo dos semivariogramas e do erro padrão (EP) da média de cada distância, pela seguinte equação $EP = dp/\sqrt{n}$. Para o (IR) aplicou-se o teste de médias SNK ($p < 0,05$), e ajustes de equações de regressão.

4.2.2 Resultados

4.2.2.1 Diferenças entre os preparos do solo e lâminas de chuva aplicada

4.2.2.1.1 Comportamento da Rugosidade e Índice da Rugosidade (IR) em 2009

De maneira geral os sistemas conservacionistas de manejo, PR e SP, apresentaram maior rugosidade (Figura 4.2). Uma maior distinção entre os tratamentos foi observada onde não foi aplicada chuva (0 mm), sendo PR o sistema

mais rugoso, seguido do SP e PC com menor rugosidade. Com a aplicação da chuva, os sistemas conservacionistas mantiveram a maior rugosidade, exceto para 54 mm em que o sistema SP foi semelhante ao PC. A maior rugosidade no PR é atribuída ao semi-preparo realizado, o qual promoveu a formação de microelevações e depressões, e ainda pela presença de palhada semi-incorporada na superfície do solo, que protegeu o solo do efeito da chuva. O sistema SP também apresentou alta rugosidade mesmo eliminando a palhada.

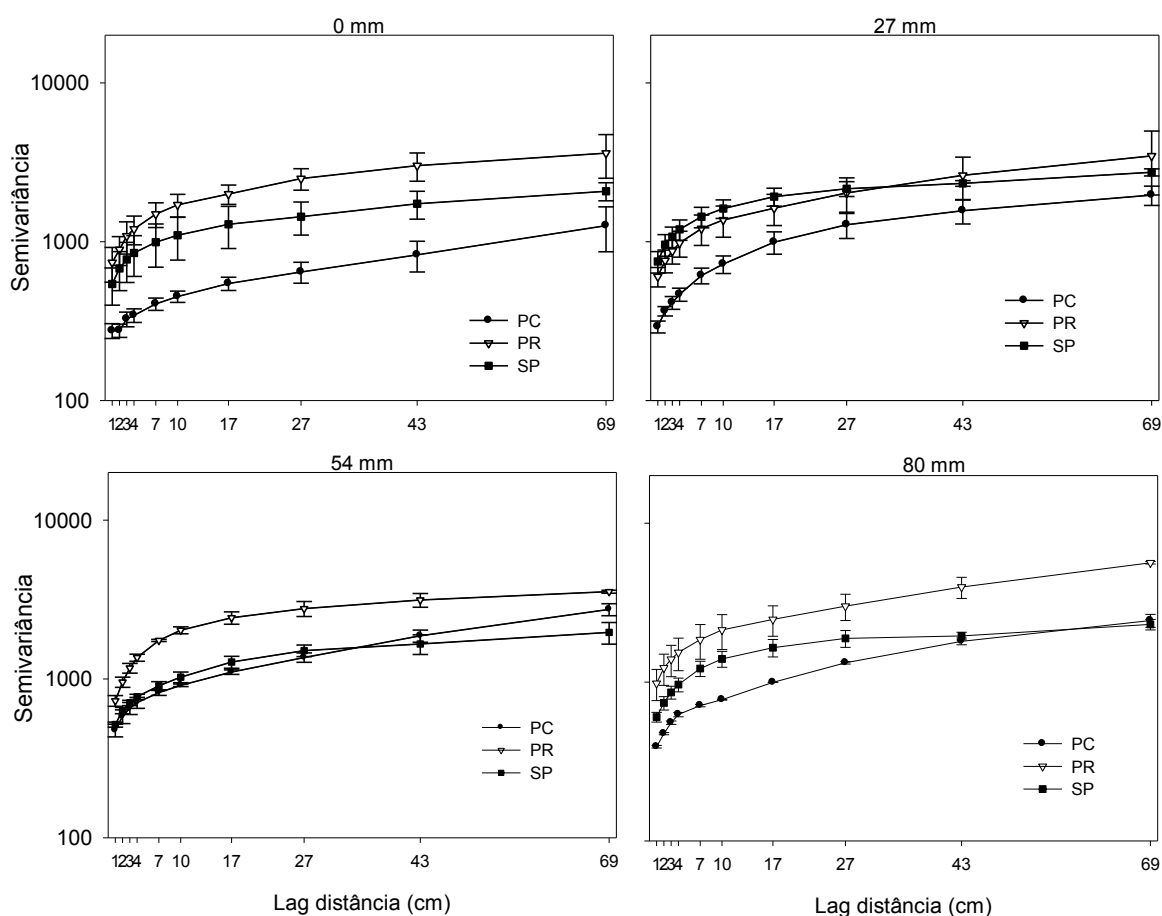


Figura 4.2 – Semivariogramas experimentais para o ano de 2009 nos diferentes sistemas de preparo e lâminas de chuva aplicada sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba-SP. Preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e sem preparo (SP). 0, 27, 54 e 80 mm: lâminas de chuva aplicada

De maneira geral, após as lâminas de chuva aplicada o PC foi o tratamento menos rugoso e os sistemas conservacionistas PR e SP os mais rugosos. Comparando os sistemas de preparo entre si, pode-se observar que em 0 e 27mm de lâmina de chuva, os sistemas conservacionistas não diferiram estatisticamente entre si, mas diferiram do PC, apresentando maior IR. Com o aumento da lâmina de

chuva para 54 mm, PC e SP não diferiram entre si, mas sim do PR e com uma lâmina de chuva ainda maior, de 80mm, todos os tratamentos foram diferentes entre si com maior IR no PR (2.131cm²) seguido pelo SP (1.399 cm²) e PC (773 cm²). Maior índice de rugosidade aleatória (RR) no cultivo mínimo também já foi constatado por (PANACHUKI et al., 2010; ZOBECK, ONSTAD, 1987).

Observando cada tratamento, ao longo das lâminas de chuva aplicada, não foram constatadas diferenças estatisticamente significativas. O PR e SP apresentaram um comportamento semelhante ao longo das lâminas de chuva aplicada, já o PC apresentou aumento inicial na rugosidade até a lâmina de 54mm, quando diminuiu com 80mm de lâmina de chuva (Figura 4.3a).

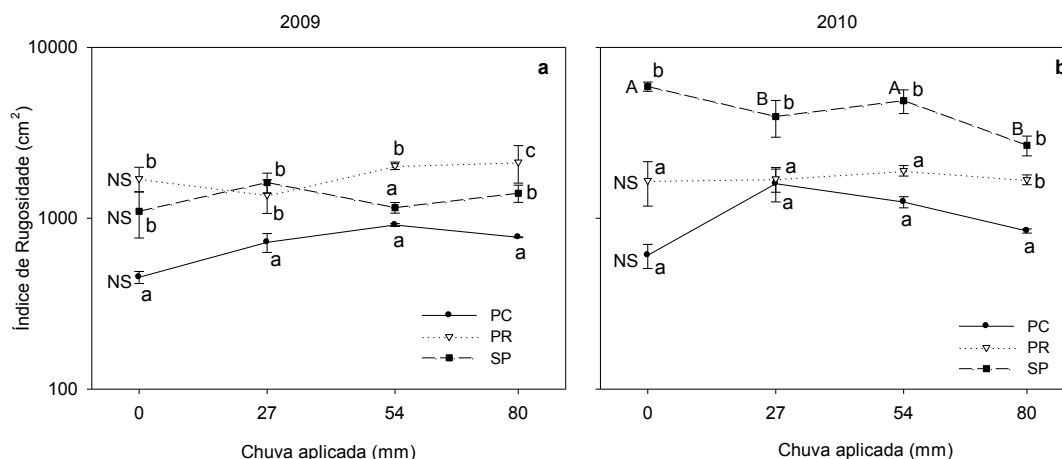


Figura 4.3 – Índice de Rugosidade (IR) extraído dos semivariogramas para os diferentes preparos do solo e lâminas de chuva aplicada nos dois anos de estudo sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos para cada chuva aplicada e letras maiúsculas indicam diferenças entre as chuvas aplicadas dentro de cada tratamento e NS: não significativo pelo teste SNK ($p < 0,05$). Preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e sem preparo (SP). Barras representam o erro padrão ($n=3$)

A análise de regressão para as lâminas de chuva aplicada (Figura 4.4) apresentou ajuste quadrático significativo somente para o PC ($Rug_{2009} = 438 + 15,75x - 0,15x^2$), com coeficiente de determinação de 0,83 ($R^2 = 0,83$), onde inicialmente ocorreu um aumento da rugosidade do solo com o aumento das lâminas de chuva, até 52 mm, a partir da qual a rugosidade diminuiu. Diferentemente, outros autores observaram redução constante do índice de rugosidade ao caso (RR) com aumento das chuvas no preparo convencional (BERTOL et al., 2006; ELTZ, NORTON, 1997; MAGUNDA et al., 1997; MWENDERA, FEYEN, 1994).

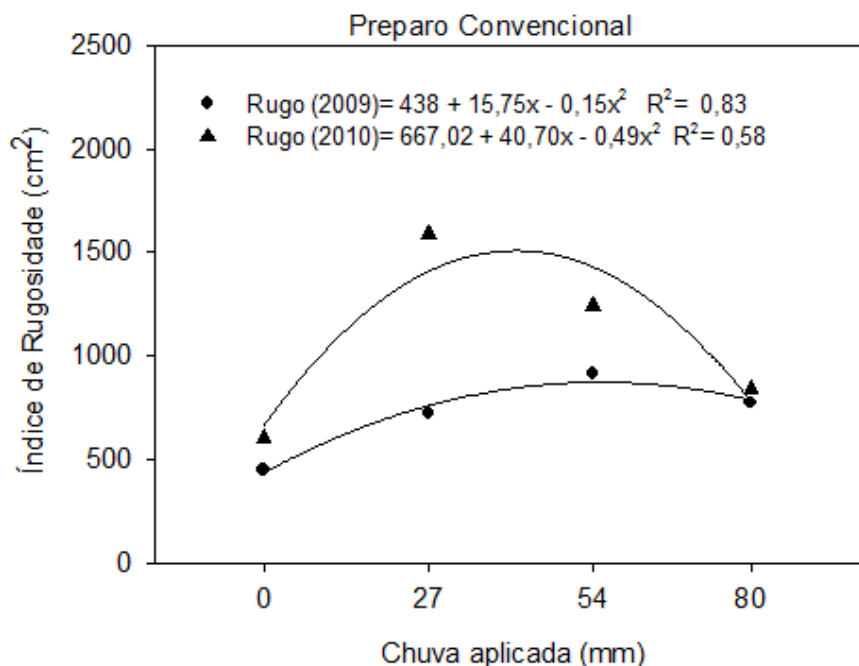


Figura 4.4 – Análise de regressão para as lâminas de chuva aplicada nos dois anos de estudo sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP

4.2.2.1.2 Comportamento da Rugosidade e Índice da Rugosidade (IR) em 2010

Para todas as lâminas de chuva aplicada, a diferença entre os preparos do solo foi grande (Figura 4.5) exceto para lâmina de chuva de 27mm onde PR e PC foram semelhantes. O tratamento SP apresentou a maior rugosidade, seguido do PR e PC, independente da lâmina de chuva aplicada. Dessa forma, a maior rugosidade foi constatada no sistema SP e a menor no PC.

O IR foi semelhante entre PR e PC que apresentaram menor rugosidade enquanto o sistema SP apresentou o maior IR (Figura 4.3 b). Para as lâminas de chuva de 0, 27 e 54 mm, PR e PC foram semelhantes e não apresentaram diferenças estatísticas entre si, mas diferiram do sistema SP. Já para 80 mm, SP (IR= 2.670 cm²) e PR (IR= 1.682 cm²) não diferiram entre si, mas sim de PC (IR= 842 cm²).

Observando cada tratamento, ao longo das lâminas de chuva aplicada, não constatou-se diferenças estatisticamente significativas de rugosidade para o PC e PR, somente o SP apresentou diferença entre as lâminas aplicadas.

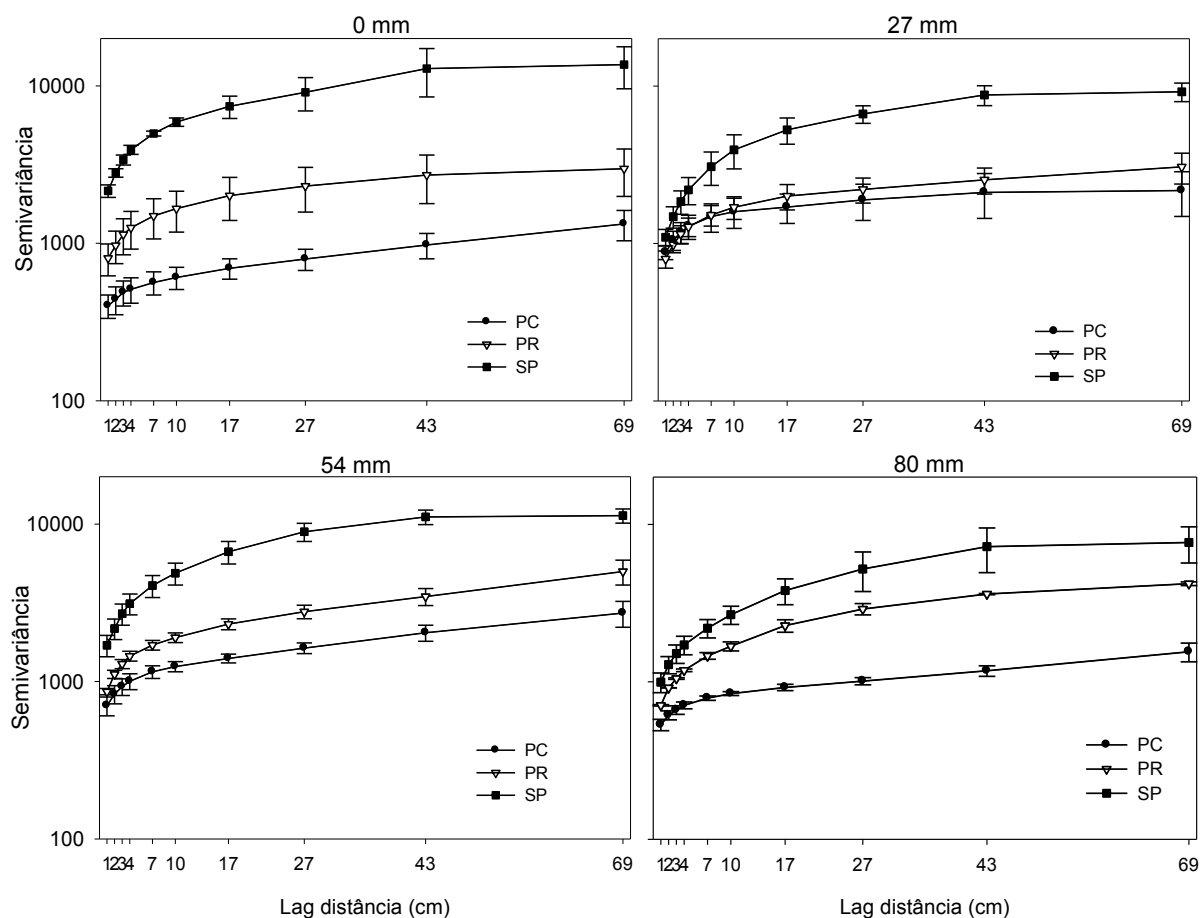


Figura 4.5 – Semivariogramas experimentais para o ano de 2010 para os diferentes sistemas de preparo do solo e lâminas de chuva aplicada sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. Preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e sem preparo (SP)

Mesmo sem apresentar diferenças estatísticas entre as lâminas de chuva aplicada, o PC apresentou a mesma tendência do ano anterior, a rugosidade aumentou inicialmente até 41 mm de chuva, diminuindo posteriormente com 54 e 80mm de lâmina de chuva. O mesmo foi constatado com o ajuste de regressões para as lâminas de chuva aplicada, onde ocorreu comportamento quadrático significativo ($Rug_{2010} = 667,02 + 40,70x - 0,49x^2$) com coeficiente de determinação de 0,58 ($R^2=0,58$) (Figura 4.4) demonstrando que a rugosidade inicialmente aumentou até uma lâmina máxima chuva de 41mm e posteriormente diminuiu.

4.2.2.2 Comparação dos dois anos de estudo

O IR apresentou-se semelhante nos dois anos de estudo, com algumas diferenças específicas. De maneira geral no ano de 2009, os preparos conservacionistas (SP e PR) foram semelhantes entre si, e apresentaram maiores IR

do que o PC (Figura 4.3a). Já em 2010 o PC e o PR foram semelhantes, com menores valores de IR até a lâmina de chuva de 54mm e diferiram estatisticamente somente na lâmina de 80mm (Figura 4.3b), enquanto que o SP apresentou o maior IR.

A maior rugosidade observada no sistema SP, que ocorreu no ano de 2010, é contrária ao que já observaram outros autores, (BERTOL et al., 2006; ELTZ, NORTON, 1997; LINDEN, VAN DOREN, 1986; PANACHUKI et al., 2010; ZOBECK, ONSTAD, 1987), geralmente os sistemas SP que não têm a influência do preparo do solo tendem a diminuir a rugosidade da superfície do solo ao longo dos anos de cultivo.

Comparando os efeitos dos anos (Figura 4.6), observou-se que o PC não apresentou diferenças entre os anos avaliados (2009=715 cm²; 2010= 1.070 cm²) e foi o sistema menos rugoso. O PR também não diferiu nos dois anos de estudo (2009= 1.809 cm²; 1.735 cm²) e apresentou maior IR que o PC. Já o sistema SP foi diferente nos dois anos avaliados (2009=1.408 cm²; 2010= 4.343 cm²), com maior IR no segundo em relação ao primeiro ano.

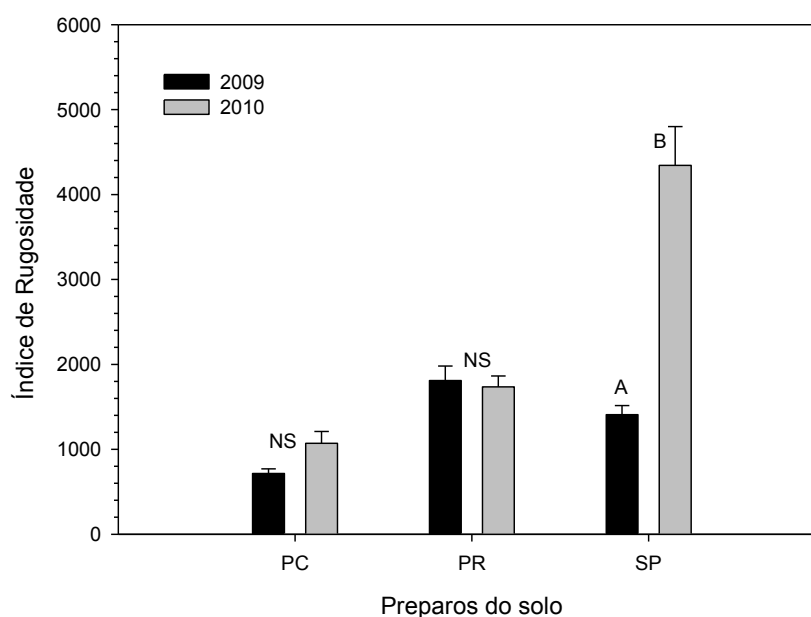


Figura 4.6 – Comparação do Índice de Rugosidade em cada preparo do solo entre os anos de estudo sobre um Argissolo vermelho amarelo, Piracicaba, SP. Letras diferentes indicam diferença do mesmo preparo em anos diferentes e NS: não significativo pelo teste SNK ($p < 0,05$). Preparo convencional (PC), Preparo reduzido (PR) e Sem preparo (SP). Barras representam o erro padrão ($n=12$)

Outro fato que deve ser enfatizado diz respeito ao comportamento da rugosidade no PC, o qual ocorreu nos dois anos de estudo. Observou-se

inicialmente um aumento do IR até uma lâmina máxima de chuva, 52mm no ano de 2009 e 41mm no ano de 2010, e posteriormente o IR diminuiu com o aumento da chuva (Figura 4.4), porém essas alterações ocorridas não foram suficientes para gerar mudanças significativas ao longo das lâminas de chuva aplicada (Figura 4.3).

4.2.3 Discussão

4.2.3.1 Efeitos dos sistemas de preparo na Rugosidade do solo

O preparo do solo pode tanto aumentar ou diminuir a rugosidade ao acaso, o que depende da operação de preparo, da condição de rugosidade e tempo da operação de preparo (ZOBEC, ONSTAD, 1987). Os preparos conservacionistas do solo, onde é realizada uma mobilização geralmente com escarificador ou gradagem, são geralmente os que originam maior rugosidade, seguidos do preparo convencional e plantio direto. Neste sentido, Zobeck e Onstad (1987) observaram que a rugosidade ao acaso variou de 5 cm com operações mínimas de preparo (offset disk) para 0.7 cm no sistema de plantio direto.

Pode-se observar que em 2009, a maior rugosidade pelo efeito do preparo (0 mm) foi observada no sistema PR (Figura 4.2) e em 2010 no SP (Figure 4.5). Similarmente, o IR em 2009 foi maior no PR e SP, mas em 2010 o maior IR ocorreu no SP, já PC apresentou menor IR nos dois anos de estudo (Figure 4.3 a,b).

Estudando esses sistemas de preparo do solo, (PANACHUKI et al., 2010; ZOBEC, ONSTAD, 1987) constataram maior índice de rugosidade ao acaso (RR) no sistema mínimo de cultivo, porém observaram o preparo convencional como intermediário e o menor (RR) no sistema plantio direto, contrariamente dos nossos resultados onde SP foi intermediário e PC apresentou menor IR. Entretanto, Mwendera e Feyen (1994) observaram após diferentes preparos do solo uma maior rugosidade ao acaso (RR) no tratamento com aração e menor em sem preparo. (DE ORO, BUSCHIAZZO, 2011) enfatizam também que a formação de torrões, originada principalmente em sistemas de preparo arado profundo devido à mobilização do subsolo úmido, pode reduzir a taxa de degradação da rugosidade aleatória, e dessa forma, proporcionar maior rugosidade para este sistema de preparo do solo.

A ocorrência de altos valores de rugosidade em sistemas de plantio direto ou sem preparo como observado neste estudo, pode ser devido aos resíduos vegetais presentes na superfície do solo (mesmo com o corte da cobertura) e pelas ondulações da superfície do terreno ainda presentes na fase inicial desse

tratamento. Além disso, é importante ressaltar que a rugosidade formada por resíduos vegetais, embora mais persistente no tempo, tem menor capacidade de retenção de água da enxurrada do que a rugosidade originada pelo preparo do solo (BERTOL et al., 2006). Em termos de controle de erosão e conservação do solo e da água, a associação entre a rugosidade originada pelo preparo do solo e da rugosidade dos resíduos vegetais é o mais desejável (os chamados semi-preparos). Uma vez que a cobertura atua na dissipação da energia cinética das gotas da chuva, impedindo o impacto direto na superfície do solo, enquanto a rugosidade é importante na retenção e na infiltração superficiais de água, na diminuição da velocidade e do volume da enxurrada e no aprisionamento dos sedimentos da erosão (CASTRO et al., 2006).

4.2.3.2 Evolução Temporal da Rugosidade

A evolução da rugosidade no tempo é influenciada pelo volume e intensidade das chuvas, pela enxurrada e tipo de solo. O volume e intensidade de chuva geralmente diminuem a rugosidade, enquanto o desenvolvimento de feições erosionais (micro-sulcos) que variam espacialmente podem aumentar a rugosidade (HUANG, BRADFORD, 1992 e 1993).

A evolução do IR em função das lâminas de chuva aplicada no sistema de preparo mais revolvido (PC) teve o mesmo comportamento nos dois anos de estudo (Figura 4.3). O IR apresentou aumento até uma lâmina máxima de chuva de 52 mm em 2009 e 41 mm em 2010, reduzindo em seguida (Figura 4.4), porém as diferenças não foram significativas entre as chuvas aplicadas (Figure 4.3).

Esse aumento inicial na rugosidade foi explicado pois, a superfície apresentava, logo após o preparo do solo, uma conformação padrão das alturas, com a aplicação da chuva ocorreu o rebaixamento do solo desagregado porém alguns agregados mais resistentes, não foram destruídos pela chuva e, com isso ocorreu aumento da rugosidade. A medida que a lâmina de chuva aumenta os agregados se desfazem, tanto pelo impacto da gota de chuva como pela perda das forças de coesão entre as partículas do solo, causando novamente redução. Possivelmente maiores reduções na rugosidade seriam observadas com chuvas sucessivas, assim, como observaram Castilho et al., (2011), para este mesmo solo, a redução da rugosidade do solo com eventos sucessivos de chuvas naturais

Panachuki et al., (2010) observaram também após a primeira chuva simulada aplicada no preparo convencional uma pequena elevação no índice de rugosidade ao acaso, que posteriormente diminuiu com chuvas sucessivas, a mesma tendência já foi verificada também por Eltz e Norton (1997) e por Govers et al., (2000).

A formação de micro-sulcos como enfatizam Huang e Bradford (1993) pode também aumentar a rugosidade, porém nenhum sulco foi observado durante este estudo.

As mudanças no microrrelevo superficial durante chuvas dependem da distribuição, forma e tamanho dos agregados que constituem a superfície (ZOBECK, ONSTAD, 1987). Como destacam Rudolph et al. (1997) as menores mudanças na rugosidade são constatadas em superfícies com maior proporção de agregados grandes. Dentre os mecanismos de desagregação pela ação da chuva, o mecanismo de quebra pelo impacto da gota depende do efeito cumulativo (LE BISSONNAIS, 1996), dessa forma, para que ocorra maior desestruturação são necessárias chuvas sucessivas.

A redução no índice de rugosidade ao acaso (RR) no preparo convencional, preparo reduzido e plantio direto, respectivamente, foi também observado por Bertol et al., (2006) após a ação de chuvas naturais. Os autores enfatizam ainda que a redução do (RR) no sistema de preparo convencional, ocorreu após períodos sucessivos de chuvas, após 229mm de chuva natural sob cultivo de milho e 350mm sob cultivo de aveia, da mesma forma, Mwendera e Feyen (1994) também constataram redução da rugosidade ao acaso pela chuva acumulativa.

Os tratamentos conservacionistas apresentaram uma variação de aumento e redução do IR ao longo das lâminas de chuva aplicada, porém ambos não apresentaram diferenças significativas em 2009 (Figure 4.3). Somente em 2010, SP apresentou diferenças significativas entre as lâminas de chuva aplicada, com redução do IR na lâmina de 0mm para 80mm de chuva aplicada. Possivelmente essas variações e poucas alterações nos sistemas conservacionistas tenham relação com a presença de cobertura nesses tratamentos, uma vez que a cobertura protege a superfície do solo evitando grandes evoluções ao longo das chuvas aplicadas, além disso, a cobertura nesses sistemas atua estrategicamente para conservação do solo e água, evitando a erosão.

4.3 Conclusões

O sistema de preparo reduzido e sem preparo apresentaram maior rugosidade no primeiro ano, no segundo ano a maior rugosidade foi observada no sistema sem preparo.

O índice de rugosidade, para o mesmo tratamento, diferiu entre as lâminas de chuva aplicada somente no sistema sem preparo e no segundo ano. No preparo convencional, o índice de rugosidade não apresentou diferenças entre as lâminas de chuva, mas demonstrou a mesma tendência nos dois anos estudados, inicialmente ocorreu um aumento na rugosidade até uma chuva máxima diminuindo em seguida.

Diferenças entre os anos estudados ocorreram somente no sistema sem preparo, que apresentou maior rugosidade no segundo ano em relação ao primeiro, os demais, preparo convencional e preparo reduzido, foram iguais nos dois anos avaliados.

Referências

ALLMARAS, R.R.; BUERWELL, R.E.; HOLT, R.F. Total Porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. **Conservation Research Report**, Washington, v. 7, p. 1-14, 1966.

ARVIDSSON, J.; BÖLENIUS, E. Effects of soil water content during primary tillage - laser measurements of soil surface changes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, n. 1/2, p. 222-229, 2006.

BERTOL, I.; AMARAL, A.J.; VÁZQUEZ, E.V.; GONZÁLEZ, A.P.; BARBOSA, F.T.; BRIGNONI, L.F. Relations of soil surface roughness with the rainfall volume and water aggregate stability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 543-553, 2006.

BOIFFIN, J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Paris, INAPG, 1984. 320p. (Doctoral Thesis).

CASTRO, L.G.; COGO, N.P.; VOLK, L.B.D. Alterations in soil surface roughness by tillage and rainfall in relation to water erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 339-352, 2006.

CASTILHO, S.C.P.; COOPER, M.; JUHÁSZ, C.E.P. Influence of crust formation under natural rain on physical attributes of soils with different textures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1893-1905, 2011.

DARBOUX, F. Surface roughness, effect on water transfer. In: JAN GLINSKI, JÓZEF HORABIK, J.L. (Ed.) **Encyclopedia of Agrophysics**. 2011. 900p.

DARBOUX, F.; GASCUEL-ODOUX, C.; DAVY, P. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. **Catena**, Amsterdam, v. 46, p. 125-139, 2002.

DARBOUX, F.; HUANG, C.H. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 748-756, 2005.

DE ORO, L.A.; BUSCHIAZZO, D.E. Degradation of the soil surface roughness by rainfall in two loess soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 164, p. 46-53, 2011.

ELTZ, F.L.F.; NORTON, L.D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1746-1755, 1997.

GARCIA MORENO, R.; DIAZ ALVAREZ, M.C.; SAA REQUEJO, A.; VALENCIA DELFA, J.L.; TARQUIS, A.M. Multiscaling analysis of soil roughness variability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, p. 22-30, 2010.

GOVERS, G.; TAKKEN, I.; HELMING, K. Soil roughness and overland flow. **Agronomie**, Paris, v. 20, p. 131-146, 2000.

HADLOW, W.; MILLARD, E.W. Minimum tillage: a practical alternative to ploughing in the South Africa Sugar Industry. In: CONGRESS OF ISSCT, 16., 1977, São Paulo. Proceedings... São Paulo: ISSCT, v.2, p.891-896, 1978.

HANSEN, B.; SCHJONNING, P.; SIBBESSEN, E. Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 103-111, 1999.

HUANG, C.; BRADFORD, J.M. **Application of a Laser Scanner to Quantify Properties of soil crusts**. J.W.A Poesen & M.A. Nearing. Catena Supplement, 1993. p.129-139

HUANG, C.H.; BRADFORD, J.M. APPLICATIONS OF A LASER SCANNER TO QUANTIFY SOIL MICROTOPOGRAPHY. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 14-21, 1992.

JESTER, W.; KLIK, A. Soil surface roughness measurement--methods, applicability, and surface representation. **Catena**, Amsterdam, v. 64, p. 174-192, 2005.

KAMPHORST, E.C.; JETTEN, V.; GUERIF, J.; PITKANEN, IVERSEN, J.B.V.J.; DOUGLAS, T.; PAZ, A. Predicting depression storage from soil surface roughness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1749-1758, 2000.

LAMPURLANES, J.; CANTERO-MARTINEZ, C. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, p. 13-26, 2006.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility .1. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 425-437, 1996.

LINDEN, D.R.; VANDOREN, D.M. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface-roughness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1560-1565, 1986.

MAGUNDA, M.K.; LARSON, W.E.; LINDEN, D.R.; NATER, E.A. Changes in microrelief and their effects on infiltration and erosion during simulated rainfall. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 10, p. 57-67, 1997.

MORENO, R.G; ALVAREZ, M.C.D.; REQUEJO, A.S.; TARQUIS, A.M. Multifractal analysis of soil surface roughness. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, p. 512-520, 2008.

MWENDERA, E.J.; FEYEN, J. Effects of tillage and rainfall on soil surface roughness and properties. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 7, p. 93-103, 1994.

ONSTAD, C.A. Depressional storage on tilled soil surfaces. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, p. 729-732, 1984.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; SOBRINHO, T.A.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, C.M.A.; URCHEI, M.A. Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 443-451, 2010.

RUDOLPH, A.; HELMING, K.; DIESTEL, H. Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 10, p. 69-81, 1997.

TACONET, O.; CIARLETTI, V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. **Soil and Tillage Research**, v. 93, p. 64-76, 2007.

VAZQUEZ, E.V.; VIEIRA, S.R.; DE MARIA, I. C.; GONZALEZ, A.P. Fractal dimension and geostatistical parameters for soil microrelief as a function of cumulative precipitation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 78-83, 2010.

ZOBECK, T.M.; ONSTAD, C.A. Tillage and rainfall effects on random roughness - A Review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, p. 1-20, 1987.

5 DINÂMICA DE QUEBRA DOS AGREGADOS DO SOLO SOB CHUVAS SIMULADAS

Resumo

O conhecimento da dinâmica de quebra dos agregados do solo é essencial para entender a evolução da superfície do solo pela formação de crostas superficiais. O objetivo deste estudo foi avaliar os processos de quebra dos agregados do solo sob diferentes condições de chuvas simuladas. O experimento foi conduzido no Institut Nationale de Recherche Agronomique (INRA), no laboratório de Ciência do Solo (UR Science du Solo), em Orléans, França. Dois solos com diferentes texturas foram utilizados, um franco siltoso e um franco argiloso. Duas classes de agregados foram selecionadas 1-3mm e 3-5mm. O experimento foi dividido em duas partes. Na primeira os agregados foram submetidos a três diferentes testes de estabilidade dos agregados: umedecimento rápido, umedecimento lento e quebra mecânica. Em uma segunda etapa, os agregados foram submetidos a diferentes chuvas simuladas. As intensidades utilizadas foram 28mm h^{-1} e 90mm h^{-1} com energia cinética (EC) forte e fraca, originando assim 4 chuvas (28mmh^{-1} + EC forte; 28mmh^{-1} + EC fraca; 90mmh^{-1} + EC forte; 90mmh^{-1} + EC fraca). Além disso, foram consideradas 4 lâminas de chuva para cada tipo de solo, 0,3; 0,7; 2 e 10mm para o solo siltoso e 0,5; 1; 3 e 15mm para o solo argiloso. Foram realizadas 3 repetições para cada tratamento. Após a realização das chuvas calculou-se o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP). As maiores reduções de DMP ocorreram até a lâmina de 3 e 2mm para o solo argiloso e siltoso, respectivamente. Nas quantidades iniciais de chuva (lâminas iniciais) a intensidade foi determinante na redução do DMP, com o aumento da quantidade de chuva a EC passou a influenciar a redução do DMP. A intensidade de 28mm h^{-1} promoveu as maiores reduções do DMP possivelmente devido ao maior tempo de exposição dos agregados ao molhamento. A classe de agregados de 3-5mm foi a que apresentou as maiores reduções de DMP.

Palavras chave: Estabilidade de agregados; Intensidade da chuva; Energia cinética; Molhamento rápido

Abstract

The knowledge of the dynamics of breakdown of the soil aggregates is essential for understanding of the evolution by soil surface crusting. The objective of this study was to evaluate the process of breakdown aggregates of two soils under different conditions of rainfall. The experiment was conducted at Institut Nationale de Recherche Agronomique (INRA), in the laboratory of Soil Science (UR Science du Solo), in Orleans, French. Two soils with different textures were used, a Silty Loam, and a Clay Loam. Two classes of aggregates were selected 1-3 mm and 3-5 mm. The experiment was divided in two parts. At first the aggregates underwent three different tests of aggregate stability: fast wetting, slow wetting and mechanical breakdown. In a second part, the aggregates were subjected to different simulated rainfall. The intensities used were 28 mm h^{-1} and 90 mm h^{-1} with two kinetic energy

(KE): strong and weak, thus giving rise to 4 rainfall (28mmh^{-1} + KE strong; 28mmh^{-1} + KE weak; 90mmh^{-1} + KE strong; 90mmh^{-1} + KE weak). Moreover, consideration was given 4 sweet of water for each soil type, 0.3, 0.7, 2 and 10 mm for the silt loam and 0.5, 1, 3 and 15 mm for clay loam, with three replicates for each treatment. After application of the rainfall was calculated the mean weight diameter of aggregates (MWD). The largest reductions occurred MWD were after sweet water 3 and 2 mm for the Clay loam and Silt loam soils respectively. In the initial quantity of rainfall (initial sweet water) the intensity was determining in reduced of the MWD, with increasing amount of rainfall, the KE has influence the reduction of the MWD. The intensity of 28 mm h^{-1} produced the greatest reductions in MWD, possibly due to large exposition of the aggregates to wetting. The class of aggregates of 3-5 mm was presented the greater reductions in MWD.

Keywords: Aggregate stability; Rainfall intensity; Kinetic energy; Fast wetting

5.1 Introdução

Compreender a dinâmica de quebra dos agregados do solo é essencial para entender a evolução da superfície do solo pela formação de crostas superficiais. A agregação é uma das principais características da estrutura do solo e influencia vários aspectos do comportamento físico dos solos. Ela afeta a transferência de água e gases pela superfície do solo, o crescimento das plantas, entre outros. A chuva, promove degradação da estrutura superficial do solo, ocasionando a desintegração dos agregados e levando ao desenvolvimento de crostas. Essa degradação depende das propriedades da chuva (intensidade, distribuição de tamanho de gota) e das propriedades do solo (distribuição de tamanho, umidade inicial, estabilidade de agregados, textura, CTC, matéria orgânica). Neste caso quanto maior a estabilidade estrutural de um solo, maior será a resistência à desagregação sob ação da chuva.

A estabilidade refere-se à habilidade dos agregados manterem-se intactos sob determinado estresse (AMÉZKETA, 1999). A manutenção de uma boa estrutura é um fator fundamental para a sustentabilidade do sistema agrícola (AMÉZKETA, 1999). A quebra dos agregados pela água pode ocorrer através de vários mecanismos físicos e físico-químicos, podendo envolver diferentes escalas da estrutura do solo (ATTOU et al., 1998; BOIFFIN, 1984; ELLIOTT, 1986; LE BISSONNAIS, 1996; TISDALL, OADES, 1982).

Quatro processos principais de desintegração dos agregados são descritos por LE BISSONNAIS (1996): (1) molhamento rápido, o qual promove a destruição dos agregados devido à compressão do ar internamente quando os agregados são

submetidos ao rápido molhamento; (2) micro-rachaduras, a quebra dos agregados ocorre devido ao diferencial de expansão das argilas pelo molhamento lento; (3) quebra mecânica, pela energia cinética de impacto as gotas de água atingem diretamente os agregados e causam a sua desintegração; e (4) dispersão físico-química, a ação do molhamento resulta na redução das forças atrativas entre partículas coloidais ocasionando a sua desintegração. Estes mecanismos dependem de muitos fatores, especialmente da natureza interna das partículas, da energia envolvida na desagregação (FAN et al., 2008; KEMPER, ROSENAU, 1986) e das propriedades do solo que afetam esses mecanismos (ATTOU et al., 1998; LE BISSONNAIS, 1988). A dispersão físico-química geralmente requer atenção especial nos solos com grandes quantidades de sódio, onde ocorre a dispersão das argilas.

A compreensão desses vários mecanismos de quebra dos agregados pode auxiliar a explicar as modificações da superfície do solo sob chuva e a dinâmica da formação de crostas superficiais e erosão (LE BISSONNAIS, 1996). A quebra de agregados por umedecimento rápido ocorre rapidamente sob chuva simulada e é seguida de dispersão da argila e compactação superficial pela formação de crostas superficiais, em um trabalho realizado por Shainberg et al. (1992). A desintegração dos agregados depende das taxas de umedecimento, sendo que o umedecimento rápido sobre os agregados inicialmente secos é um processo energeticamente mais importante do que o impacto das gotas de chuva (LOCH, 1994). Ambos, as taxas iniciais de umedecimento e o impacto pelas gotas da chuva, são responsáveis pela desintegração dos agregados secos na superfície do solo, e consequente formação de crostas (FAN et al., 2008), sendo que a relativa importância dos dois mecanismos depende da estabilidade dos agregados. Por outro lado, Shainberg e Levy (1992) enfatizam que o grau de desintegração dos agregados na superfície do solo é determinado pelas taxas de umedecimento iniciais, energia de impacto das gotas de chuva, concentração eletrolítica da solução do solo (por exemplo, saturação da CTC com sódio), e pela estabilidade dos agregados.

O objetivo deste estudo foi avaliar os processos de quebra dos agregados de dois solos (um siltoso e um argiloso) sob diferentes condições de chuvas simuladas.

5.2 Desenvolvimento

5.2.1 Material e Métodos

O experimento foi conduzido no Institut Nationale de Recherche Agronomique (INRA), no laboratório de Ciência do Solo (UR Science du Solo), em Orléans, França.

Dois solos com diferentes texturas foram utilizados, um franco siltoso, originário da região de Lauragais, na França, e um franco argiloso, originário da região da Normandia, na França. Esses solos foram coletados no horizonte A, na camada de 0-15 cm em áreas agrícolas cultivadas. O teor de argila do solo siltoso foi 112 g kg^{-1} e do argiloso: 360 g kg^{-1} . O conteúdo de carbono orgânico foi de 20 g kg^{-1} e 18 g kg^{-1} para o solo siltoso e argiloso, respectivamente. Para realização do experimento os solos foram segregados em duas classes de tamanhos de agregados: 1-3 e 3-5 mm. O experimento foi dividido em duas partes principais:

a) Medida da Estabilidade dos Agregados (MEA)

Inicialmente foi aplicado um teste para avaliar a estabilidade dos agregados, conforme metodologia proposta por (Le Bissonnais, 1996). Esta metodologia descreve a utilização de três tratamentos aplicados aos agregados, que simulam, diferentes mecanismos de quebra, do efeito da chuva sobre a superfície do solo. Os três tratamentos descritos no teste e utilizados foram: umedecimento rápido (UR) (Figura 5.1a), (b) umedecimento lento (UL) (Figura 5.1b) e quebra mecânica (QM) (Figura 5.1c). Cada tratamento foi repetido 3 vezes para cada classe de agregados utilizada.

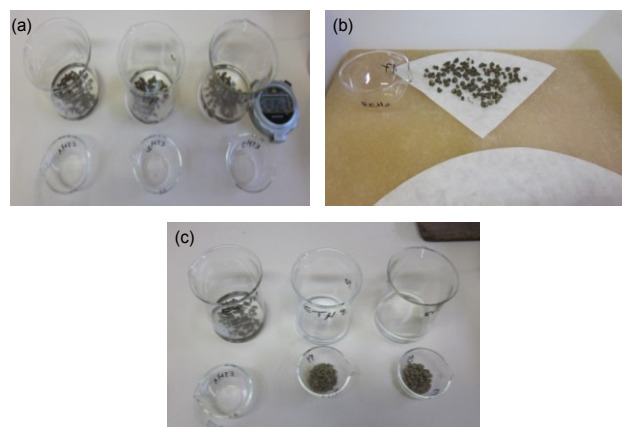


Figura 5.1 – Testes realizados para medida da estabilidade de agregados. a) umedecimento rápido; b) umedecimento lento; c) quebra mecânica

Após aplicação dos testes, as amostras foram passadas em peneira de 1 mm. O solo que passou na peneira foi recolhido em um recipiente com etanol e analisado em um granulômetro à Laser, para obtenção da curva de distribuição granulométrica (0,02 a 4.075 μm). O solo que ficou retido na peneira foi levado à estufa para secar e após atingir peso seco constante foi passado num jogo de peneiras (3,15; 2; 1,4 e 1 mm), obtendo-se assim a massa de solo retida em cada peneira.

Posteriormente uniu-se a distribuição dos agregados obtida pelo peneiramento com a distribuição do granulômetro à Laser, obtendo-se assim uma única curva de distribuição (0,02 a 4.075 μm). A partir desses valores calculou-se o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados para os diferentes testes de desagregação aplicados, a partir da seguinte equação: $\text{DMP} = \sum (\text{porção de cada classe em relação ao total}) \times (\text{diâmetro médio das classes (mm)})$.

b) Dinâmica da quebra dos agregados pela chuva simulada (DQA)

Esta segunda etapa consistiu em submeter os agregados a chuvas com diferentes características, a fim de se observar o processo de desagregação que ocorre através do umedecimento rápido.

Esquema experimental e chuvas aplicadas

As unidades experimentais consistiram de um cilindro (Figura 5.2) dentro do qual foi posicionada uma amostra de 5 e uma de 2g de agregados, para o solo argiloso e siltoso, respectivamente (Figura 5.3 c), o qual tinha função de manter os fragmentos dos agregados. Embaixo deste cilindro maior, utilizou-se outro cilindro de mesmo diâmetro, mas de menor altura (Figura 5.2 b) o qual armazenava a água da chuva que realmente havia chegado na amostra.

O fundo do cilindro (Figura 5.3 b) foi revestido por uma fina tela, a qual tinha a função de assegurar a infiltração suficiente da água e ao mesmo tempo evitar que os fragmentos de solo a ultrapassassem. Abaixo desta tela fina e entre os cilindros (Figura 5.2), utilizou-se também uma grade de metal objetivando manter contato com a tela fina e assim facilitar a infiltração de água e evitar o acúmulo de água na amostra (Figura 5.3 b).

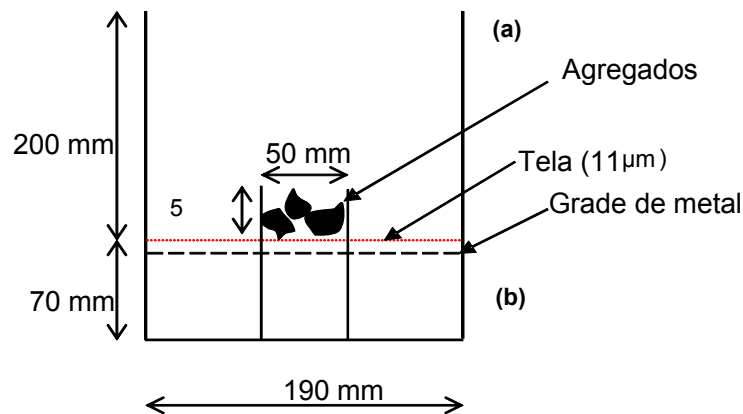


Figura 5.2 – Esquema das unidades experimentais e disposição dos agregados submetidos à chuva simulada. a) cilindro superior, utilizado para posicionamento dos agregados; b) cilindro inferior, utilizado para coleta da água para medida da lâmina e intensidade reais aplicadas

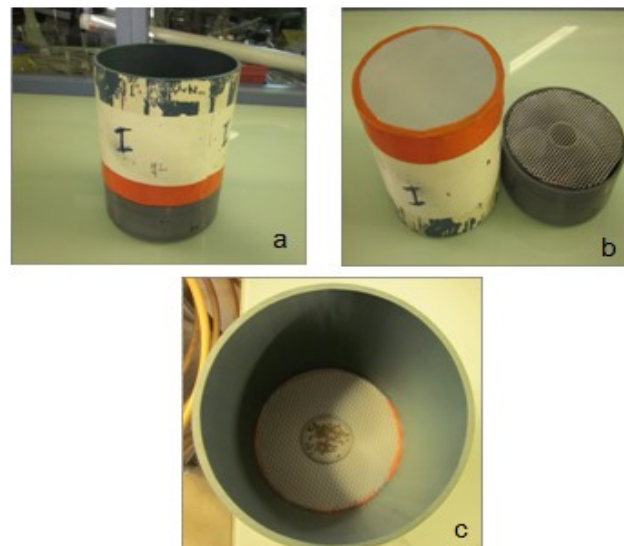


Figura 5.3 – Unidades experimentais utilizadas para avaliar a desestruturação dos agregados sob chuva simulada. a) cilindros utilizados para avaliar a desestruturação dos agregados sob chuva simulada; b) detalhes das telas utilizadas nos cilindros; c) detalhe do posicionamento dos agregados no interior do cilindro

Chuvas simuladas de 28 mm h^{-1} e 90 mm h^{-1} foram aplicadas, com energia cinética (EC) forte e fraca. Dessa forma utilizou-se quatro chuvas diferentes (28 mm h^{-1} + EC forte; 28 mm h^{-1} + EC fraca; 90 mm h^{-1} + EC forte; 90 mm h^{-1} + EC fraca).

A chuva simulada foi realizada com o simulador do laboratório (Figura 5.4a), o qual é composto por cinco bicos aspersores do tipo Veejet Spray Nozzle (H/U 65/150, Spraying Systems), dos quais para a experimentação utilizou-se apenas

três. A pressão utilizada foi de um Bar. As intensidades, baixa (28 mm h^{-1}) e alta (90 mm h^{-1}) foram controladas pelo número de oscilações realizadas pelo simulador, 18 e 58-60 oscilações por minuto para intensidade baixa e alta, respectivamente. A EC baixa e alta foi controlada com o auxílio de uma grade de malha de 3mm, a qual era posicionada sobre os cilindros quando se desejava EC baixa (Figura 5.4b, c) e, para EC alta a grade não era colocada sobre os cilindros. A grade tinha como objetivo promover a quebra das gotas de chuva e dessa forma dissipar a EC da chuva. Diversos testes para calibrar o simulador de chuvas e observar o funcionamento com a utilização da grade foram realizados antes de utilizar as amostras propriamente ditas.

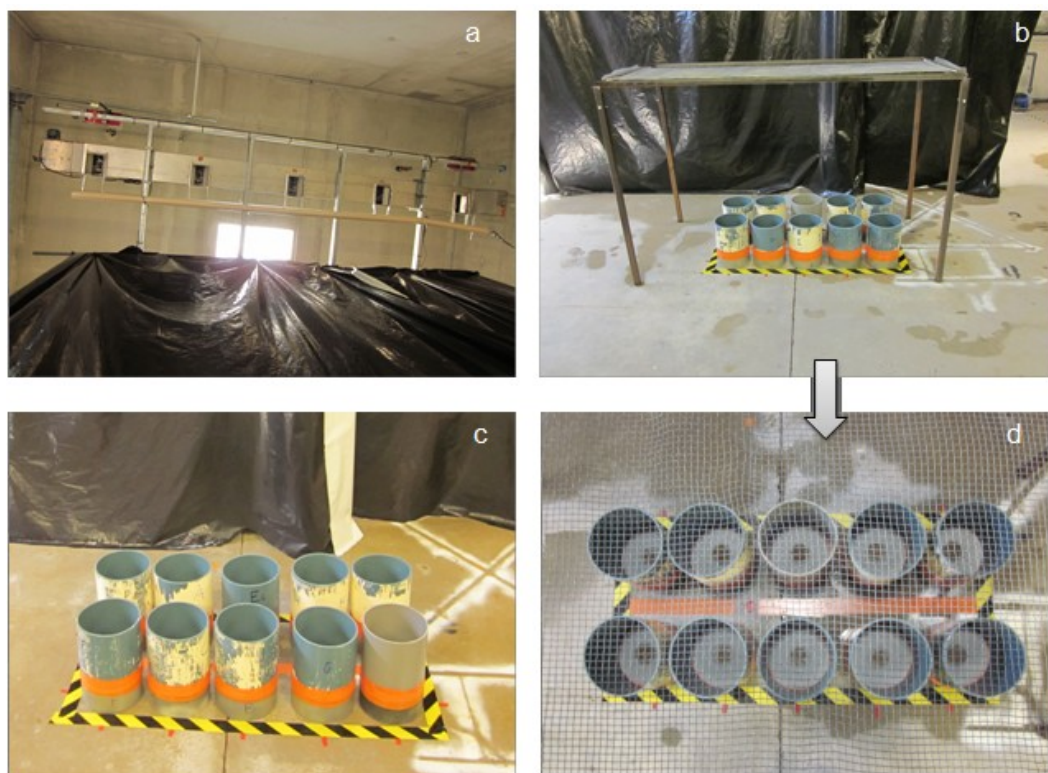


Figura 5.4 - Detalhe do experimento realizado no laboratório. (a) Simulador de chuvas; (b) cilindros com grade utilizada para EC baixa; (c) Cilindros dispostos embaixo do simulador e (d) detalhe dos cilindros dispostos com grade em cima

A duração da chuva foi escolhida a partir de experimentos realizados anteriormente com esses solos, dessa forma, utilizou-se 40 minutos para o solo siltoso e 60 minutos para o solo argiloso (LEGOUT et al., 2005; LEGUEDOIS, LE BISSONNAIS, 2004).

A fim de analisar a transformação temporal dos agregados ao longo das chuvas aplicadas, foram consideradas quatro lâminas de água em função do tempo

de chuva considerado para cada tipo de solo. Dessa forma, as amostras de agregados foram submetidas às seguintes lâminas de chuva 0,3; 0,7; 2 e 10 mm para o solo siltoso e 0,5; 1; 3 e 15mm para o solo argiloso. A utilização dessas lâminas foi definida com base no trabalho desenvolvido por (LEGOUT et al., 2005) e levando em consideração o processo do umedecimento rápido, dessa forma a quantidade de água que chega inicialmente nas amostras foi priorizada.

Foram realizadas três repetições para cada chuva considerada (4), para cada lâmina de água (4) para cada classe de agregados (2) e ambos os solos (2). Essa combinação gerou um total de 192 amostras de agregados. Em cada chuva realizada eram usadas 10 unidades experimentais de cada vez (10 cilindros) (Figura 5.4 c, d).

Medidas de Energia Cinética da Chuva

Após cada chuva foi também realizada a medição da EC com auxílio de um espectro-pluviômetro (Figura 5.6a), com três repetições após cada chuva. Obteve-se a média de todas as medidas de EC em cada chuva, dessa forma, para cada uma das quatro chuvas realizadas havia um valor médio de EC, posteriormente efetuou-se o cálculo da EC real, considerando o tempo que cada chuva ocorreu.

O espectro-pluviômetro informa alguns parâmetros como o número de gotas passadas através de um raio laser retangular de 45,6 cm², o tamanho e a velocidade dessas gotas e as classificava (Figura 5.6b).

Para medir a EC (J m⁻² min⁻¹) levou-se em consideração a média dos parâmetros (número, tamanho e velocidade) para cada tipo de gota, e partiu-se da fórmula geral de EC eq. (1).

$$EC = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

Onde:

EC: energia cinética em Joule(s);

m: corresponde a massa em kg;

v: corresponde a velocidade m s⁻¹;

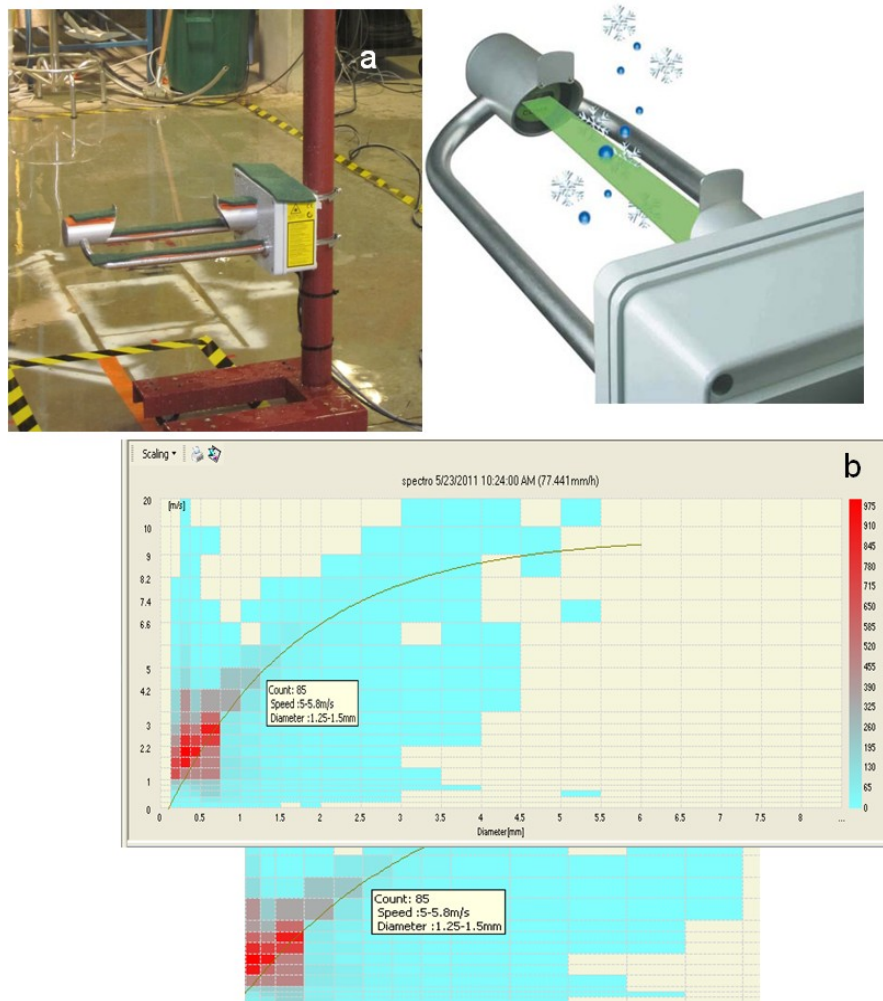


Figura 5.6 – Detalhes do espectro-pluviômetro utilizado para medidas da Energia Cinética da chuva aplicada (a) espectro-pluviômetro; (b) detalhe dos parâmetros de gotas medidos pelo espectro-pluviômetro

A partir da equação geral da EC foi derivada a EC para cada gota, pela eq. (2)

$$E_{ci} = \frac{1}{2} \times \frac{m_i \cdot v_i^2}{S} \times n_i$$

$$E_{ci} = \frac{1}{2} \times \rho \times \frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^3 \times \frac{v_i^2}{S} \times n_i$$

$$E_{ci} = \frac{1}{2} \times 10^3 \times \frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^3 \times \frac{v_i^2}{4,56 \cdot 10^{-3}} \times n_i$$

$$E_{ci} = \frac{2 \cdot 10^3 \times n_i \times \pi \times v_i^2}{13,68 \cdot 10^{-3}} \times \left(\frac{D}{2}\right)^3$$

$$E_{ci} = \frac{10^3 \times n_i \times \pi \times v_i^2}{5,472 \cdot 10^{-2}} \times D^3 \quad (2)$$

Onde:

i , corresponde a classe de gotas consideradas;

n , corresponde ao número de gotas medidas da classe considerada em 1 minuto;

S , corresponde a superfície de medida do spectro-pluviômetro ($4,56 \times 10^{-3} \text{ m}^2$);

D , corresponde ao diâmetro da classe de gotas consideradas em m;

ρ , corresponde a massa volumétrica de água kg m^{-3} .

A EC da chuva foi a soma das EC calculadas para cada classe de gotas.

Análises realizadas após as chuvas simuladas

Após a realização da chuva, cada amostra de agregados foi retirada do cilindro (Figura 5.5a) com a utilização de etanol e passada em uma peneira de 1mm. O solo que passou pela peneira foi recuperado em um Becker e analisado no granulometro à Laser (Figura 5.5e). O que restou na peneira foi seco em estufa (40°C) até atingir peso constante e foi passado num jogo de peneiras (3,15; 2; 1,4 e 1mm), onde obteve-se a massa de cada fração.

Cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP)

Posteriormente juntou-se a distribuição dos agregados obtida pelo peneiramento com a distribuição do granulômetro à laser, obtendo-se assim uma única curva de distribuição (0,02 a $4.075 \mu\text{m}$). A partir desses valores calculou-se o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados para as diferentes chuvas aplicadas. O DMP dos agregados foi calculado através da equação: $\text{DMP} = \sum (\text{porção de cada classe em relação ao total}) \times (\text{diâmetro médio das classes (mm)})$.

Além do cálculo do DMP, foi realizado o cálculo do “*indicador de decréscimo do DMP*” (LEGOUT et al., 2005). O valor do indicador corresponde à diferença entre o DMP inicial antes da simulação de chuva e o DMP a x mm de chuva aplicada dividido por x mm de chuva aplicada. $([\text{DMP inicial}] - [\text{DMP à X mm de chuva}]) / [\text{X mm de chuva}]$ (LEGOUT et al., 2005). Para cálculo desse indicador, utilizou-se como DMP inicial o valor médio entre as frações utilizadas, ou seja, 2 mm para as frações correspondentes a 1-3 mm e 4 mm para as referentes à 3-5 mm.

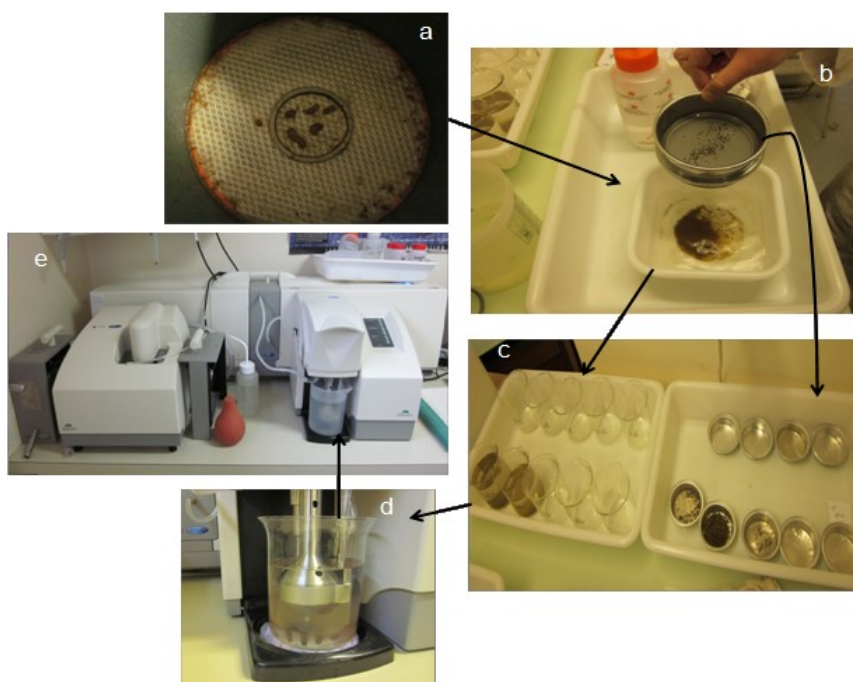


Figura 5.5 – Detalhes dos procedimentos realizados nas amostras após as chuvas; (a) Agregados dentro do cilindro após aplicação da chuva; (b) Amostra passada na peneira de 1mm; (c) Amostra que passou na peneira e o que ficou retido na peneira; (d) Amostra passada na peneira para leitura no granulometro; (e) Granulometro à laser

Análise estatística

Nos resultados de DMP obtidos com a MEA efetuou-se comparação de médias pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e calculou-se o erro padrão da média, pela seguinte equação $EP = dp/\sqrt{n}$. Nos resultados de DQA realizou-se análise estatística pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), fixando-se tipo de solo e lâminas aplicadas.

5.2.2 Resultados e Discussão

5.2.2.1 Medida da Estabilidade dos Agregados (MEA)

Após a realização dos testes o solo argiloso demonstrou maior DMP dos agregados do que o solo siltoso. No solo argiloso o DMP variou em função das classes avaliadas e dos testes realizados. A classe de 3-5mm demonstrou maior DMP após realização dos testes. A maior redução foi observada com a aplicação do teste de umedecimento rápido (UR) (DMP=2,11mm), seguido pelo teste de quebra mecânica (QM) (DMP=2,67mm) e umedecimento lento (UL) (DMP=2,91mm) (Figura

5.7). Ainda neste solo, a classe de 1-3 mm demonstrou menor DMP e a redução em função dos testes aplicados ocorreu na mesma sequência que na classe 3-5 mm, ou seja, maior redução com aplicação do teste UR (DMP= 1,24mm), QM (DMP= 1,37mm) e UL (DMP= 1,88mm), respectivamente. Foi possível verificar, no solo argiloso, que o teste de UR foi mais agressivo na destruição dos agregados, demonstrando que o umedecimento rápido sobre os agregados secos, promoveu diminuição do DMP dos agregados. O processo de quebra dos agregados, devido ao umedecimento rápido, ocorre devido a pressão interna do ar durante o molhamento dos agregados, originando com a expulsão do ar o colapso dos agregados (BOIFFIN, 1984; LE BISSONNAIS, 1996; PANNABOKKE, QUIRK, 1957).

O solo siltoso apresentou grande redução do DMP com a aplicação dos testes. Para a classe de 3-5 mm, o DMP foi o seguinte: UR (DMP=0,63 mm), UL (DMP=1,09mm) e QM (DMP=1,27mm), demonstrando maior redução no UR. Já na classe de 1-3 mm a maior redução foi em UR (DMP=0,66 mm), seguido de QM (DMP=0,96mm) e UL (DMP=1,02mm) (Figura 5.7).

Para ambos os solos o menor DMP foi obtido com a utilização do teste de umedecimento rápido, conferindo assim com os resultados obtidos por LEGOUT et al., (2005) para estes mesmos solos.

O solo argiloso apresentou maior DMP dos agregados do que o siltoso, para as duas classes avaliadas. Fato este que se deve a maior estabilidade estrutural presente neste solo, especialmente pela maior quantidade de argila como constituinte deste solo, a qual atua como agente de formação e estabilização dos agregados pela cimentação das partículas constituintes dos agregados.

A argila é um constituinte que promove agregação do solo, o maior ou menor poder de agregação promovido pelas argilas, depende não somente da quantidade, mas também das características físico-químicas destas (AMÉZKETA, 1999). As diferenças observadas no DMP entre ambos os solos resultam de diferenças na intensidade dos mecanismos de quebra, especialmente devido ao conteúdo de argila (LE BISSONNAIS, 1988; LEGOUT et al., 2005).

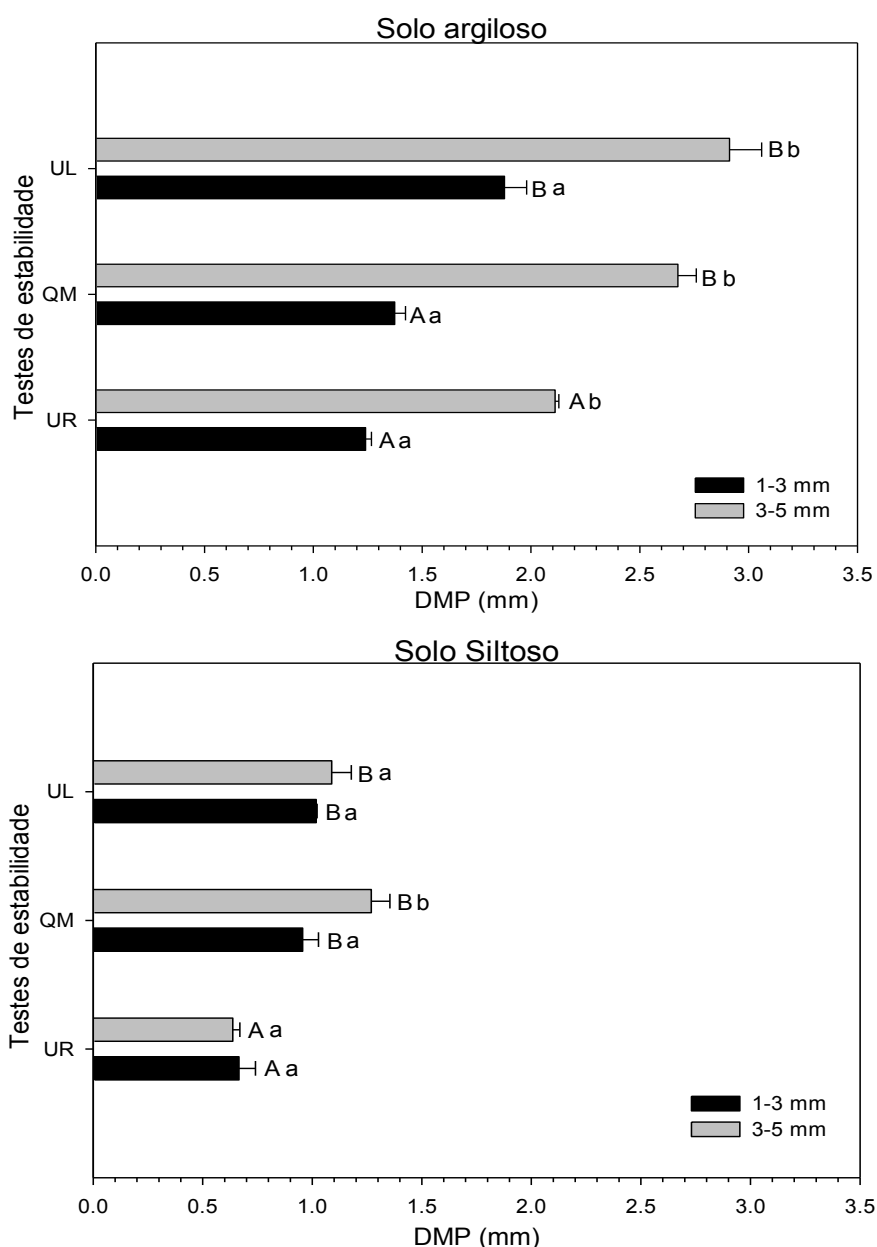


Figura 5.7 – DMP (mm) dos agregados do solo após aplicação dos testes de estabilidade de agregados. UL (umedecimento lento); QM (quebra mecânica); UR (umedecimento rápido). Barras referem-se ao erro padrão (n=3). Letras maiúsculas comparam os diferentes testes na mesma classe de agregados. Letras minúsculas comparam as duas classes no mesmo teste

5.2.2.2 Dinâmica da quebra dos agregados pela chuva simulada (DQA)

A análise de variância realizada nos dados demonstrou diferentes atuações dos fatores de variação sobre as lâminas avaliadas (Tabela 5.1). Isso demonstra que os

fatores de variação avaliados (classe de agregados, intensidade da chuva e EC) atuaram de forma diferenciada sobre os solos e nas lâminas avaliadas.

Tabela 5.1 - Análise de variância dos fatores analisados na avaliação da desestruturação do agregados

Fatores de variação	Solo argiloso				Solo siltoso			
	0,5	1	3	15	0,3	0,7	2	10
Classe	0,0304	0,0011	0,0128	--	<0,0001	0,0004	--	--
Intens.	0,0045	0,0011	<0,0001	--	--	<0,0001	--	0,0122
EC	--	--	0,0449	0,0265	0,0136	--	0,0026	0,0405
Classe*Intens.	--	0,0375	--	--	0,0444	0,0409	--	--
Classe*EC	--	--	--	--	--	--	--	--
Intens.*EC	0,0077	--	--	--	--	--	--	--
Classe*Intens.*EC	--	--	--	--	--	--	--	--

Classe: classes de agregados estudadas; Intens.: intensidade da chuva; EC: energia cinética; 0,5; 1; 3; 15mm: lâminas aplicadas); 0,3; 0,7; 2; 10mm: lâminas aplicadas

No solo argiloso, na primeira lâmina aplicada (0,5mm) ocorreu interação significativa entre intensidade de chuva e energia cinética (Intens.*EC) (Tabela 5.2). A chuva de 28mm h⁻¹ apresentou DMP diferente em função da EC. DMP de 1,08 e 0,93 mm para EC forte e EC fraca foram observados, respectivamente. Na chuva de 90 mm h⁻¹ o DMP foi de 1,09 e 1,13mm para EC Forte e EC Fraca, respectivamente, sem diferenças significativas. Ainda nesta interação, observou-se que as chuvas de 28 e 90mm h⁻¹ diferiram quando a EC foi fraca, mas não quando a EC foi forte (Tabela 5.1). Nesta lâmina também ocorreram diferenças significativas entre as classes de agregados avaliadas, o maior DMP ocorreu para a classe de 1-3 mm (1,10mm) e o menor na classe de 3-5mm (1,02mm). Com isso observa-se que a maior redução com aplicação dessa lâmina ocorreu na classe de agregados maiores.

Tabela 5.2 - Médias de DMP (mm) considerando os diversos fatores de variação avaliados no solo argiloso

Lâminas		Fatores significativos				
0,5 mm		-----Intens.*EC-----		Intens.		Classe
Intens.*EC		Forte	Fraca	28mm h ⁻¹	1,0 a	1-3mm 1,10 a
Classe	28mm h ⁻¹	1,08 Aa	0,93 Ba	90mm h ⁻¹	1,11 b	3-5mm 1,02 b
Intens.	90mm h ⁻¹	1,09 Aa	1,13 Ab			
1 mm		-----Classe*Intens.-----		Intens.		Classe
Classe*Intens.		1	2	28mm h ⁻¹	0,98 a	1-3mm 1,07 a
Classe	28mm h ⁻¹	1,05 Aa	0,92 Ba	90mm h ⁻¹	1,07 b	3-5mm 0,98 b
Intens.	90mm h ⁻¹	1,09 Aa	1,05 Ab			
3 mm		Classe	Intens.	EC		
Classe	1-3mm	1,01 a	28mm h ⁻¹	0,88 a	Forte	0,95 a
Intens.	3-5mm	0,94 b	90mm h ⁻¹	1,07 b	Fraca	1,0 b
EC						
15 mm		EC				
EC	Forte	0,80 a				
	Fraca	0,94 b				

Classe: classes de agregados estudadas; Intens.: intensidade da chuva; EC: energia cinética; Forte e Fraca: EC forte e fraca, respectivamente; 0,5; 1; 3; 15mm lâminas aplicadas; 1-3 e 3-5mm classes de agregados utilizadas no estudo; 28 e 90mm h⁻¹: intensidade das chuvas utilizadas; Nas interações: letras maiúsculas comparam no sentido horizontal e minúsculas no sentido vertical; Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey (p≤0,05)

Com a aplicação da lâmina de 1mm também ocorreu interação significativa (Classe*Intens.). Observou-se que com intensidade de chuva de 28mm h⁻¹ ocorreram diferenças entre as classes avaliadas, com DMP de 1,05 e 0,92mm, para as classes de 1-3 e 3-5mm, respectivamente (Tabela 5.2). Com aplicação da chuva de 90mm h⁻¹ as duas classes avaliadas não diferiram entre si.

Para as duas intensidades aplicadas (28 e 90mm h⁻¹) o DMP foi maior nas duas classes consideradas (1-3 e 3-5mm) com aplicação de 90mm h⁻¹, e na classe de 3-5mm essa diferença foi significativa. O maior DMP observado na intensidade de 90mm h⁻¹ e o menor na de 28mm h⁻¹, pode ser explicado pelo tempo de molhamento uma vez que para atingir uma lâmina de 1mm com intensidade de 28mm h⁻¹ foi necessário um tempo maior do que quando se utilizou intensidade de 90mm h⁻¹.

Nas lâminas aplicadas de 3 e 15mm, não foram observadas interações, somente efeitos significativos simples (Tabela 5.2). Na lâmina de 3 mm observou-se efeito significativo de Classe, Intens. e EC. A classe de 1-3mm apresentou maior DMP (1,01mm) e a classe de 3-5 mm o menor DMP (0,94mm). Com as intensidades

de 28 e 90mm h⁻¹ o DMP foi de 0,88 e 1,07mm, respectivamente, e ambos diferiram estatisticamente.

A dinâmica de redução do DMP no solo argiloso, até a lâmina de 3 mm, sofreu influência principalmente da intensidade da chuva. Entre as intensidades, o DMP apresentou sempre a maior redução em 28 mm h⁻¹ (Tabela 5.2). Fato explicado pela consequente exposição dos agregados a chuva por um tempo maior. Para atingir as lâminas pré-determinadas, neste estudo, o tempo requerido é diferente quando a intensidade é diferente. Dessa forma, na intensidade de 28mm h⁻¹ o tempo necessário para se chegar a determinada lâmina foi superior do que na intensidade de 90mm h⁻¹, acarretando maior exposição dos agregados ao molhamento o que promoveu maior redução do DMP. Nas lâminas de 3 e 15 mm a EC passou a demonstrar efeito significativo, apresentando maior redução do DMP na EC forte. A partir da lâmina de 3mm a energia cinética passou a influenciar também a redução do DMP.

No solo siltoso, nas duas primeiras lâminas aplicadas (0,3 e 0,7 mm), a interação (classe*Intens.) foi significativa (Tabela 5.3). Houve diferença significativa na classe de 3-5 mm (lâmina 0,3mm) entre as duas intensidades aplicadas (28 e 90mm h⁻¹) e as duas classes da lâmina 0,7mm diferiram entre as intensidades aplicadas. Para essas classes e lâminas, o DMP apresentou maior redução na intensidade de 28 mm h⁻¹ (mesmo comportamento observado no solo argiloso).

A explicação para o fato é a mesma descrita para o solo argiloso. Na tabela 5.3 observa-se que o tempo necessário para atingir a lâmina desejada (0,3 e 0,7 mm) é maior na intensidade de 28 mm h⁻¹ do que na intensidade de 90 mm h⁻¹, consequentemente, a redução no DMP também foi maior nesta intensidade.

Na lâmina de 2mm, ocorreu efeito significativo somente da EC, e a EC forte foi a responsável pela maior redução do DMP. O mesmo também ocorreu na lâmina de 10mm (Tabela 5.3). Nesta, houve também efeito significativo da intensidade, onde novamente a intensidade de 28mm h⁻¹ demonstrou maior redução do DMP.

Tabela 5.3 - Médias de DMP (mm) considerando os diversos fatores de variação avaliados no solo siltoso

Lâminas		Fatores significativos					
0,3 mm		-----Classe*Intens.-----		EC		Classe	
Classe*Intens.		1	2	Forte	0,81 a	1	0,97 a
Classe	28mm h ⁻¹	0,98 Aa	0,68 Ba	Fraca	0,92 b	2	0,76 b
EC	90mm h ⁻¹	0,97 Aa	0,83 Aa				
0,7 mm		-----Classe*Intens.-----		Intens.		Classe	
Classe*Intens.		1	2	28mm h ⁻¹	0,67 a	1	84 a
	28mm h ⁻¹	0,76 Aa	0,58 Ba	90mm h ⁻¹	0,89 b	2	0,71 b
	90mm h ⁻¹	0,92 Ab	0,85 Ab				
2 mm		EC					
EC	Forte	0,67 a					
	Fraca	0,84 b					
10 mm		EC		Intens.			
EC	Forte	0,55 a		28mm h ⁻¹	0,52 a		
Intens.	Fraca	0,72b		90mm h ⁻¹	0,76 b		

Classe: classes de agregados estudadas; Intens.: intensidade da chuva; EC: energia cinética; Forte e Fraca: energia cinética forte e fraca respectivamente; 0,3; 0,7; 2; 10mm: lâminas aplicadas; 1 e 2: classes de agregados de 1-3 e 3-5mm respectivamente; 28 e 90mm h⁻¹: intensidade das chuvas utilizadas; Nas interações: letras maiúsculas comparam no sentido horizontal e minúsculas no sentido vertical; Nos efeitos simples letras maiúsculas comparam no sentido vertical. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste Tukey (p≤0,05)

O processo de redução do DMP dos agregados no solo siltoso, foi muito semelhante ao observado no solo argiloso. A redução do DMP no solo siltoso, até a lâmina de 0,7mm, sofreu influência principalmente da intensidade da chuva. Entre as intensidades, o DMP apresentou sempre a maior redução em 28mm h⁻¹. (Tabela 5.2). Nas lâminas de 2 e 10 mm a EC passou a demonstrar efeito significativo, apresentando maior redução do DMP na EC forte.

De maneira geral o processo de quebra dos agregados foi semelhante entre os solos, com algumas diferenças relacionadas principalmente às constituições desses solos.

Uma diferença mais notável está na grandeza dos valores, pois o solo argiloso apresentou DMP maior que o siltoso, o que é relacionado com a estabilidade de cada solo. O solo argiloso apresenta maior conteúdo de argila que junto aos agentes cimentantes atua na estabilização dos agregados, dessa forma apresenta maior estabilidade e resistência à ação desagregante da chuva.

5.2.2.2 Indicador de decréscimo do DMP (ID)

O indicador de decréscimo (ID) informa através de um número a redução sofrida pelos agregados após aplicação de determinada lâmina de chuva. Quanto maior o valor do ID maior também foi a destruição dos agregados após determinada quantidade de chuva.

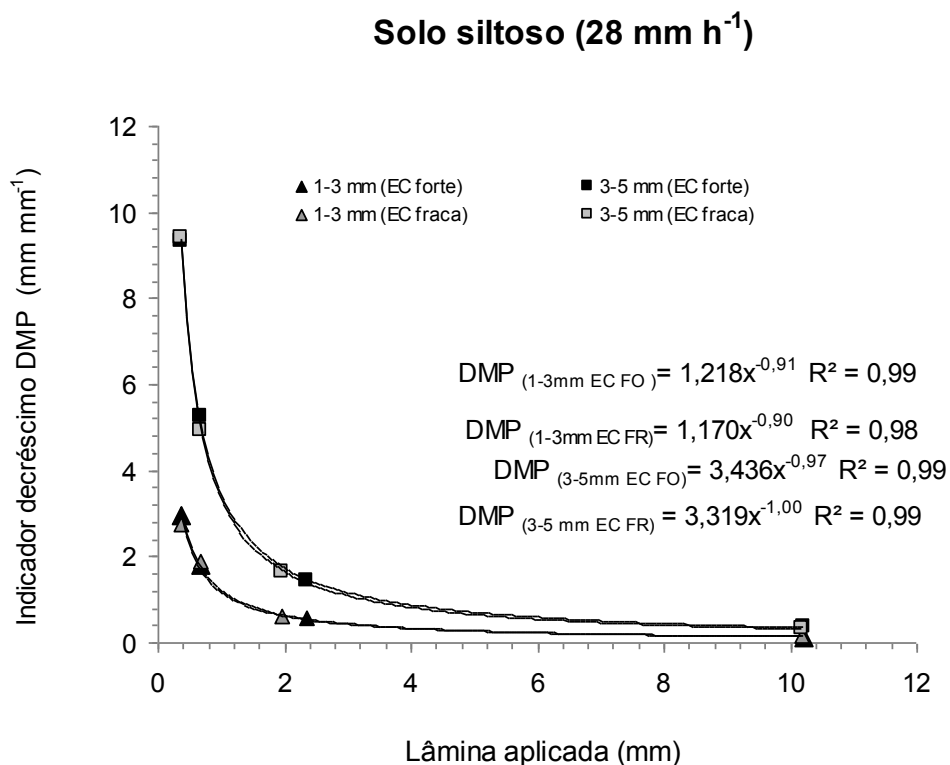


Figura 5.8 – Indicador de decréscimo do DMP no solo siltoso com aplicação de uma chuva de 28 mm h⁻¹

O ID (figuras 5.8 e 5.9), no solo siltoso, demonstrou que as maiores reduções no DMP ocorreram na classe de agregados maiores (3-5mm). Em ambas as classes de agregados e intensidades avaliadas a maior redução no DMP no solo siltoso ocorre até a lâmina de 2mm, esses valores conferem com os observados por LEGOUT et al., (2005).

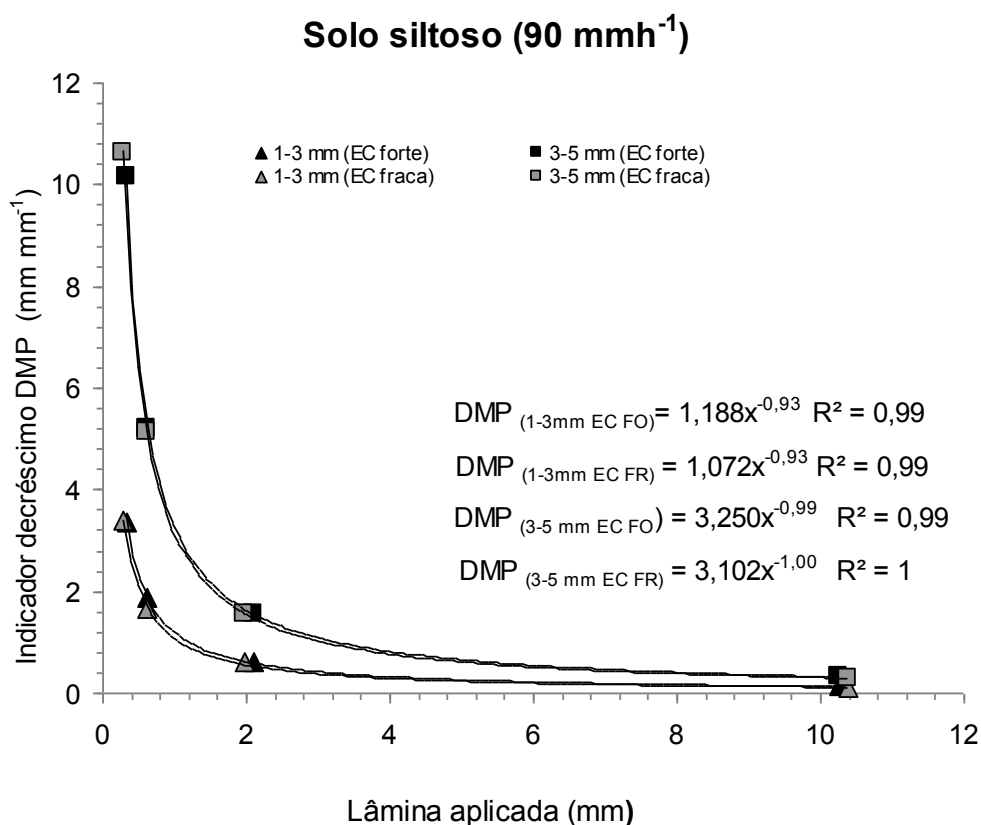


Figura 5.9 – Indicador de decréscimo do DMP no solo siltoso com aplicação de uma chuva de 90 mm h⁻¹

No solo argiloso, em ambas as classes avaliadas o valor do ID é menor, indicando menor redução do DMP quando comparado ao solo siltoso.

Nas figuras 5.10 e 5.11 é possível verificar que o ID apresentou as maiores reduções do DMP na classe de agregados maiores (3-5mm). Na intensidade de 28 mm h⁻¹, para as duas classes de agregados estudadas (1-3 e 3-5mm) e na primeira lâmina aplicada (0,5mm) o ID apresentou maiores reduções em função da EC considerada. O mesmo ocorreu com aplicação da intensidade de 90mm h⁻¹ para a classe de 3-5mm, também para a lâmina de 0,5mm.

Em ambas as classes de agregados e intensidades avaliadas as maiores reduções no DMP ocorreram até a lâmina de 3mm.

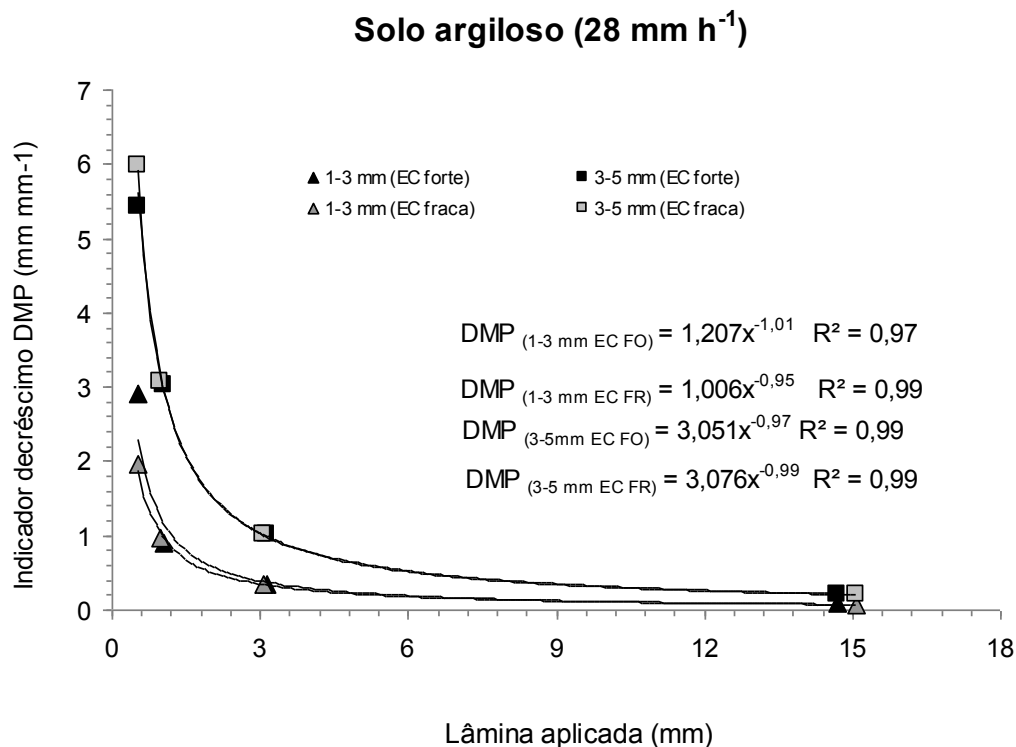


Figura 5.10 – Indicador de decréscimo do DMP no solo argiloso com aplicação de uma chuva de 28 mm h⁻¹

O ID observado para ambos os solos demonstrou que as maiores reduções no DMP dos agregados ocorreram nos primeiros milímetros de chuva. No solo siltoso essa redução ocorre até 2mm. Com a aplicação de uma lâmina maior (10 mm) os valores de DMP apresentam certa redução, porém muito menor daquela observada até 2mm. O mesmo ocorreu no solo argiloso, porém as maiores reduções ocorreram até 3mm.

Em função dos resultados observados pode-se constatar que a desintegração dos agregados, ocorreu com os processos de umedecimento rápido + quebra mecânica. Para os primeiros milímetros de chuva, o processo dominante foi o umedecimento rápido, o qual foi também responsável pela maior redução do DMP dos agregados. Com o aumento da quantidade de chuva, o processo de quebra mecânica passou a dominar, porém a redução do DMP dos agregados foi menor. Esses resultados conferem com (FAN et al., 2008) que também observaram a atuação dos dois processos na desintegração de agregados secos. Estudos que demonstram a desintegração dos agregados pelo rápido molhamento foram também reportados por (LADO et al., 2004; LE BISSONNAIS, 1988; LE BISSONNAIS, ARROUAYS, 1997).

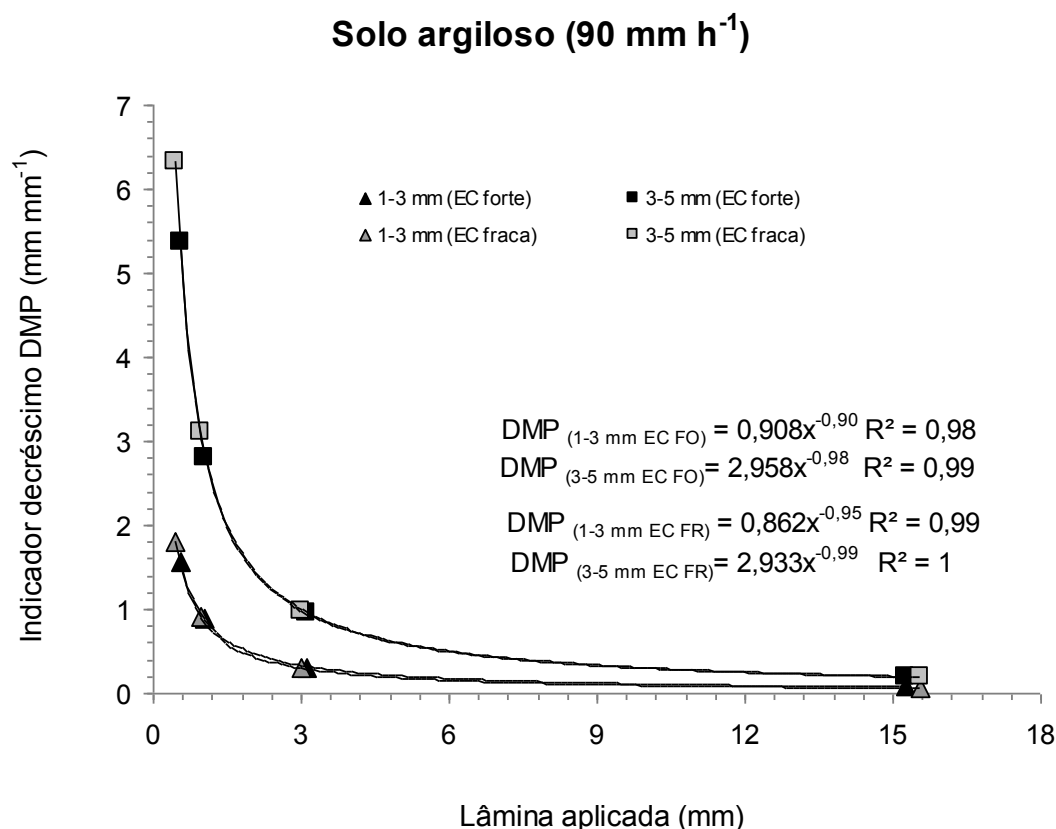


Figura 5.11 – Indicador de decréscimo do DMP no solo argiloso com aplicação de uma chuva de 90 mm h⁻¹

5.3 Conclusões

As maiores reduções de DMP ocorreram até a lâmina de 3 e 2mm para o solo argiloso e siltoso respectivamente.

Nas quantidades iniciais de chuva (lâminas iniciais) a intensidade foi determinante na redução do DMP, com o aumento da quantidade de chuva a EC passou a influenciar a redução do DMP.

A intensidade de 28mm h⁻¹ promoveu as maiores reduções do DMP possivelmente o que se deve ao maior tempo de exposição dos agregados ao molhamento.

A classe de agregados de 3-5mm apresentou as maiores reduções de DMP.

Referências

- AMÉZKETA, E. Soil Aggregate Stability: A Review. **Journal of Sustainable Agriculture**, Binghamton, v. 14, p. 83-151, 1999.
- ATTOU, F.; BRUAND, A.; LE BISSONNAIS, Y. Effect of clay content and silt-clay fabric on stability of artificial aggregates. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 49, p. 569-577, 1998.
- BOIFFIN, J. **La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies**. 1984. 320p. Tese (Doctoral Thesis), INAPG, Paris, 1984.
- ELLIOTT, E.T. Aggregate and structure carbon, nitrogen, phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 627-633, 1986.
- FAN, Y.; LEI, T.; SHAINBERG, I.; CAI, Q. Wetting Rate and Rain Depth Effects on Crust Strength and Micromorphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1604-1610, 2008.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C., Soil cohesion as affected by time and water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1001-1006, 1986.
- LADO, M.; PAZ, A.; BEN-HUR, M. Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 935-942, 2004.
- LE BISSONNAIS, Y. **Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies**. 1988. Tese de Doutorado (Doctoral dissertation) Université d'Orléans, France. 1988
- LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility.1. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 425-437, 1996.
- LE BISSONNAIS, Y.; ARROUAYS, D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. II. Application to humic loamy soils with various organic matter contents. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 48, p. 39-48, 1997.
- LEGOUT, C.; LEGUEDOIS, S.; LE BISSONNAIS, Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 56, p. 225-237, 2005.
- LEGUEDOIS, S.; LE BISSONNAIS, Y. Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 29, p. 1117-1129, 2004.
- LOCH, R.J. A method for measuring aggregate water stability with relevance to surface development. **Australian Journal of Soil Science**, Brisbane, v. 32, p. 687 - 700, 1994.

PANNABOKKE, C.R.; QUIRK, J.P. Effect of initial water content on stability of soil aggregates in water. **Soil Science**, Baltimore, v. 83, p. 185-195, 1957.

SHAINBERG, I.; LEVY, G.J. Physiochemical effects of salts upon infiltration and water movement in soils. In: WAGENET, R.J.; BAVEYE, P.; STEWART, B.A. (Ed.). **Interacting processes in soil science**. Boca Raton: Lewis Publ., 1992. p. 37–94.

SHAINBERG, I.; WARRINGTON, D.; LAFLEN, J.M. Soil dispersibility, rain properties, and slope interaction in rill formation and erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 278-283, 1992.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, p. 141-163, 1982.

6 CONCLUSÕES GERAIS

6.1 Capítulo 2

A formação de crostas ocorreu de maneira diferenciada nos sistemas de preparo do solo.

O preparo convencional demonstrou aumento da presença de crostas com o aumento das chuvas aplicadas.

O preparo reduzido e o sistema sem preparo apresentaram condições de superfície irregulares e não demonstraram aumento da formação de crostas com as chuvas aplicadas.

Dessa forma, confirmam-se as duas primeiras hipóteses propostas que (primeira hipótese) no sistema de preparo convencional do solo, maior quantidade de crostas superficiais são formadas, comparado aos sistemas menos revolvidos. (Segunda hipótese) No preparo reduzido e no sistema sem preparo, menor quantidade de crostas superficiais são formadas, em função da cobertura mantida na superfície do solo e do menor ou não revolvimento do solo;

6.2 Capítulo 3

A porcentagem de área de poros, condutividade hidráulica, curvas de retenção de água e a densidade do solo demonstraram diferenças entre os anos avaliados (2009 e 2010).

Nos sistemas de preparo convencional e reduzido a redução da porcentagem de área de poros, pelo efeito da chuva aplicada, ocorreu na camada da crosta.

No sistema sem preparo a redução da porcentagem de área de poros, em função das chuvas aplicadas ocorreu na camada da subcrosta.

A crosta foi responsável pela redução da porcentagem de área de poros, condutividade hidráulica, e aumento da densidade nos sistemas de preparo convencional e reduzido.

O sistema de preparo reduzido demonstrou as maiores umidades volumétricas nas CRA e o preparo convencional as menores.

As CRA não demonstram modificação da umidade volumétrica em função das chuvas aplicadas.

Dessa forma, confirma-se a hipótese proposta de que (terceira hipótese) as crostas causam redução da condutividade hidráulica, da porosidade e da continuidade entre os poros;

6.3 Capítulo 4

A rugosidade superficial do solo variou em função dos sistemas de preparo realizados.

Os sistemas de preparo reduzido e sem preparo apresentaram maior rugosidade no primeiro ano, no segundo ano a maior rugosidade foi observada no sistema sem preparo.

O preparo convencional, demonstrou nos dois anos estudados o mesmo efeito em função das chuvas aplicadas, inicialmente ocorreu um aumento na rugosidade até uma chuva máxima diminuindo em seguida.

Dessa forma, a hipótese proposta (quarta hipótese) é parcialmente aceita, pois dos sistemas de preparo com maior intensidade de revolvimento somente o preparo reduzido apresentou aumento na rugosidade, e também por que a chuva simulada não causou redução da rugosidade em todos os sistemas de preparo avaliados, rejeitando, dessa forma, parte da hipótese que afirmava que os sistemas de preparo com maior intensidade de revolvimento causam aumento na rugosidade superficial e que a chuva simulada causa redução da rugosidade superficial.

6.4 Capítulo 5

Sobre a dinâmica de quebra dos agregados, constatou-se que as maiores reduções no DMP ocorreram até a lâmina de 3 e 2 mm para o solo argiloso e siltoso, respectivamente.

Nas lâminas iniciais de chuva a intensidade foi determinante na redução do DMP, com o aumento da quantidade de chuva a EC passou a influenciar a redução do DMP.

A intensidade de 28 mm h^{-1} promoveu as maiores reduções do DMP possivelmente o que se deve ao maior tempo de exposição dos agregados ao molhamento.

Considerações Finais

Este estudo apresenta resultados importantes sobre a dinâmica da formação de crostas em diferentes sistemas de preparo do solo e aplicação de chuva simulada. A complementação das técnicas de análise utilizadas (análise micromorfológica, análise de imagens e estatística multivariada, através da ACP) possibilitaram ampla exploração dos resultados, com observações e conclusões satisfatórias dos efeitos dos diferentes preparos do solo e chuvas aplicadas sobre o processo de formação de crostas e, as consequências destes sobre as propriedades do solo avaliado.

Vale salientar, que o monitoramento do processo de formação de crostas, por um período maior, no sistema sem preparo, é importante para observar se o efeito de recobrimento superficial observado persistirá, aumentará ou diminuirá e as consequências para os demais atributos do solo como porosidade, infiltração e condutividade hidráulica.

O índice de rugosidade (IR) proposto neste trabalho representou satisfatoriamente as mudanças na rugosidade do solo, provenientes da utilização de diferentes sistemas de preparo e chuvas simuladas.

Em função do efeito observado na rugosidade do solo, quando utilizado o preparo convencional, estudos futuros destinados ao detalhamento dos mecanismos de desagregação do solo sob chuva e monitoramento da evolução dos agregados e rugosidade superficial, especialmente em preparos convencionais ainda fazem-se necessários.

O estudo do processo de formação de crostas e a consequência para os atributos do solo, em outros tipos de solos, com texturas variadas, também é recomendado.

Aplicações práticas deste estudo

Este estudo descreveu o processo de formação de e as principais consequências desse processo sobre alguns atributos físico-hídricos do solo. A partir dos resultados obtidos pode-se derivar aplicações práticas, como as descritas a seguir:

- Conhecer a dinâmica do processo de formação de crostas e sua interferência no processo erosivo.
- Compreendendo o processo de formação de crostas e as consequências sobre as propriedades do solo, pode-se atuar com medidas de controle ou de atenuação da formação de crostas nos solos tropicais e, conseqüentemente da erosão do solo.
- Geração de dados possíveis de alimentar modelos de predição de erosão que utilizam as condições de degradação da superfície do solo na modelagem, como por exemplo, os modelos WEPP e STREAM.
- Com os dados obtidos pode-se desenvolver indicadores de degradação da superfície do solo e, utilizá-los como parâmetros na recuperação de áreas degradadas.
- Foram geradas informações sobre o processo de formação de crostas em sistemas conservacionistas de manejo, uma vez que informações sobre esse tema ainda são escassas e, devido a grande área agrícola cultivada hoje no Brasil com sistemas conservacionistas, essas informações são de grande importância.

ANEXOS

ANEXO A – Descrição micromorfológica para o PC no de 2009

Preparo Convencional (2009)				
Atributo	0	27	54	80
Geral	Distribuição homogênea de material;	Distribuição heterogênea de material. Três zonas A (40 %) B (50%) e C (10%) dividido em C1 e C2 ;	Distribuição heterogênea de material. Três zonas A (20%) B (70 %) e C (10%) dividido em C1 e C2 ;	Distribuição heterogênea de material. Três zonas A (20%) B (60 %) e C (20%) dividido em C1 e C2 ;
Micro-estrutura	Blocos subangulares com pedalidade fraca a moderadamente desenvolvida + Granular com pontes e películas;	A) Microagregados granulares + Granular com pontes e películas; Moderada a fracamente desenvolvida; B) Blocos subangulares; fracamente desenvolvida; C1) Granular com pontes e películas (10%); C2) Grãos simples (90%)	A) Microagregados granulares fracamente desenvolvidos + Granular com pontes e películas; B) Blocos subangulares; fracamente desenvolvidos + granular com pontes; C1) Microgranular adensada; C2) grãos simples;	A) Blocos subangulares; moderadamente desenvolvidos + Microagregados granulares; B) Granular com pontes e películas + microgranular adensada; C1) Microgranular adensada; C2) Grãos simples;
Material fino	Argila e matéria orgânica, marrom escura, 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura. A) 20%, B) 15%, C1) 20%, C2) 2%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%; B) 15%; C1) 20%, C2) 2%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20% B) 15%, C1) 10% e C2) 3%;
Material grosso	Quartzo subarredondado mal selecionado 40%;	A) 40%, B) 35%, C1) 45 Quartzo subarredondado, mal selecionado, C2) 63%, quartzo subarredondado moderadamente selecionado;	A) 40%, B) 35%, C1) 40%, Quartzo subarredondado, mal selecionado; C2) 70%, quartzo subarredondado moderadamente selecionado;	A) 40%, B) 35% e C1) 50%, Quartzos subarredondados, mal selecionados; C2) 80%, quartzos subarredondados moderadamente selecionados;
Poros	Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados (40%) + cavidades e fissuras (60%);	A) (40%) e C1) (35%) Empilhamento composto entre grãos simples e pequenos agregados; B) (50%) Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados (40%): - Interagregados: (30%) Predomínio de cavidades (80%) e fissuras 20%; - Intragregados:(30%) Predomínio de cavidades; C2) (35%) Empilhamento simples (arranjo de grãos);	A) (40%) e C1) 40% Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados; B) (50%) - Interagregados e Intragregados com predomínio de cavidades; C2) 28% Empilhamento simples (arranjo de grãos);	A) (40%) e C1) (40%) Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados. Predomínio de cavidades e fissuras; B) (50%) Empilhamento complexo + Interagregados e Intragregados com predomínio de cavidades; C2) Empilhamento simples (arranjo de grãos);
Distribuição relativa	Quito-Gefúrica com zonas porfíricas;	A) e C1) Porfiro-enáulica; B) Quitônica (30%) + Enáulica (70%); C2) Mônica;	A) e C1) Porfiro-enáulica; B) Quitônica (40%) + Enáulica (60%); C2) Mônica;	A) e C1) Porfiro-enáulica; e B) Quito-Gefúrica (40%) + Enáulica (60%); C2) Mônica;
Feições pedológica	Não; Presença de raízes;	A) não; B) não; C) Revestimento do tipo crosta; Espessura: 2 a 3 mm; C1) Zona de transição, material fino	A) não; B) não; C) Revestimento do tipo crosta; Espessura: 1 a 2 mm. C1) Zona de	A) não; B) não; C) Revestimento do tipo crosta; Espessura: 6 a 8 mm; C1) Zona de transição, material

ANEXO B – Descrição micromorfológica para o PR no de 2009

Preparo Reduzido (2009)				
Atributo	0	27	54	80
Geral	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (70%) e B (30%);	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (70 %) B (30%);	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (80%) B (20%);	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (80%) B (20 %);
Micro-estrutura	A) Microgranular adensada (60%) + Cavitária Irregular(40%); B) Microagregados intergrãos;	A) Cavitária Irregular; B) Estrutura poro vesicular (40%) + cavitária irregular (60%);	A) Cavitária Irregular (60%) + microgranular adensada (40%); B) Microestrutura vesicular (80%) + microgranular coalescida (20%);	A) Cavitária Irregular + Blocos subangulares; moderadamente desenvolvidos; B) Cavitária Irregular;
Material fino	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%; B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) e B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20% B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%; B) 15%;
Material grosso	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) e 40%; B) 35%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 40%; B) 35%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado; A) 40% B) 35%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado; A) 40% B) 35%;
Poros	A) (40%) Predomínio de cavidades irregulares; B) (50%) Predomínio de cavidades irregulares e vesículas;	A) (45%) Predomínio de cavidades irregulares; B) (50%) Predomínio de cavidades irregulares e vesículas;	A) (40%) Predomínio de cavidades irregulares; B) (50%) Predomínio de cavidades irregulares e vesículas;	A) (40%) Predomínio de cavidades e fissuras; B) (40%) Predomínio de cavidades e vesículas;
Distribuição relativa	A) Quito-Enaulica com domínios porfíricos; B) Quito-Gefurica Enáulica;	A) Quito-Enaulica-Gefúrica com domínios porfíricos na forma de blocos; B) Quito-Enáulica;	A) Quito-Enaulica com domínios porfíricos na forma de blocos; B) Quito-Enáulica com pequenas zonas Enáulica-porfírica;	A) Quito-Enaulica com domínios porfíricos na forma de blocos; B) Quito-Gefúrica-Enáulica com pequenas zonas porfíricas;
Feições pedológicas	A) não; B) Formação de crosta muito diferenciada do PC, material em superfície desorientado e poroso; Presença de laminação de argila no interior desta camada, porém não é constante ocorre somente em algumas partes desta camada;	A) não; B) Formação de crosta diferenciada, material em superfície desorientado e poroso; Presença de laminações de argila no interior desta camada, porém não é constante, ocorre em maior frequência do que onde não se aplicou chuva;	A) não; B) Formação de crosta diferenciada, material em superfície muito desorientado e poroso; Laminação de argila menos evidente, somente em pontos específicos e na superfície da lâmina, porém não é constante. Indicação de bolsões de acúmulo de areia em algumas zonas.	A) não; B) Formação de crosta diferenciada, material em superfície desorientado e poroso; Presença de laminação de argila no interior desta camada, mais evidente que as anteriores; Presença de um bolsão de acúmulo de areia.

ANEXO C – Descrição micromorfológica para o SP no de 2009

Sem Preparo (2009)				
Atributo	0	27	54	80
Geral	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (95%) e B (5%)	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (45 %) e B (40%)	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (90%) B (10%)	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (90%) B (10 %)
Micro Estrutura	A) Blocos subangulares fracamente desenvolvidos (30%) + Cavitária Irregular (70%); B) Microgranular adensada (80%) + cavitária irregular (20%);	A) Blocos subangulares fracamente desenvolvidos (30%) + cavitária irregular (50%) + microgranular (20%) adensada B) Estrutura poro-vesicular intergrãos (60%) + microagregados intergrãos (40%);	A) Blocos subangulares fracamente desenvolvidos (40%) + cavitária irregular (60%) B) Estrutura poro-vesicular intergrãos (80%) + cavitária irregular (20%);	A) Cavitária irregular (60%) + Blocos subangulares fracamente desenvolvidos (20%) + microagregados intergrãos (20%) B) Estrutura poro-vesicular intergrãos (60%) + cavitária irregular (40%);
Material fino	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) e B) 20%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%; B) 30%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20% B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%; B) 15%;
Material grosso	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 40%; B) 50%	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 40%; B) 30%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 30%; B) 40%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado; A) 40%; B) 40%
Poros	A) (40%) Predomínio de cavidades e fissuras; B) (30%) Predomínio de Cavidades;	A) (40%) Predomínio de cavidades e fissuras; B) (40%) Cavidades e vesículas;	A) (50%) Predomínio de cavidades, fissuras e canais; B) (45%) Vesículas e Cavidades;	A) (40%) Predomínio de cavidades, canais e fissuras; B) (45%) Vesículas e Cavidades;
Distribuição relativa	A) Quito-Gefúrica-Enáulica com zonas porfíricas na forma de pequenos blocos; B) Quito-Gefúrica-Enáulica;	A) Quito-Gefúrica com zonas porfíricas na forma de pequenos blocos; B) Quito-Gefúrica-Enáulica com linhas de expressão porfírica;	A) Quito-Gefúrica-Enáulica com zonas porfíricas na forma de pequenos blocos; B) Quito-Enáulica; com linhas de expressão porfírica;	A) Quito-Gefúrica-Enáulica com zonas porfíricas na forma de pequenos blocos; B) Quito-Enáulica;
Feições pedológicas	A) não; B) Revestimento do tipo crosta; Recobrimento da superfície do solo, com material fino, não constante e não uniforme em toda superfície. Presença de alguns grãos de quartzo sobre essa camada de material fino acumulado.	A) não; B) Revestimento do tipo crosta; Tamanho de 10 mm; diferente do (0 mm) material solto e desorientado com laminações internas nessa camada, de material fino acumulado, bastante evidentes;	A) não; B) Revestimento do tipo crosta; Tamanho: de 2 a 4 mm; Menor ocorrência que em 20mm. Material solto e desorientado, disposição irregular na superfície do solo. Recobrimento superficial e laminações internas, com material fino, ocorrem nessa camada.	A) não; B) Revestimento do tipo crosta; não é possível definir um tamanho, pois não ocorre uma distinção clara entre a crosta e o restante do solo. Material solto e desorientado, disposição irregular na superfície do solo. Material fino acumulado irregularmente

ANEXO D – Descrição micromorfológica para PC no ano de 2010

Preparo Convencional (2010)				
Atributo	0	27	54	80
Geral	Distribuição homogênea de material;	Distribuição heterogênea de material. Três zonas A (45%) B (45%) e C (10%) dividido em C1 e C2 ;	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (85%) B (15 %) dividido em B1 e B2 ;	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (80%) B (20%) dividido em B1 e B2 ;
Micro-estrutura	Blocos subangulares com pedalidade moderadamente desenvolvida; + Granular com pontes e películas;	A) Microagregados granulares + Granular com pontes e películas; Moderada a fracamente desenvolvida; B) Blocos subangulares; fracamente desenvolvida; C1) Granular com pontes e películas (10%); C2) Grãos simples (90%)	A) Microagregados granulares + Granular com pontes e películas; Moderados a fracamente desenvolvidos; B1) Microgranular adensada B2) Grãos simples;	A) Estrutura apedal maciça. B1) Microgranular adensada. B2) Grãos Simples.
Material fino	Argila e matéria orgânica, marrom escura, 10%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura. A) 15%; B) 20%; C1) 8%; C1) 2%	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%, B1) 25% e B2) 3%	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 15% B1) 20% e B2) 5%
Material grosso	Quartzo subarredondado, mal selecionado, 40%;	A) 35%, B) 40% C1) 50%, Quartzo subarredondado, mal selecionado. C2) 70%, Quartzo subarredondado, moderadamente selecionado;	A) e B1) (40%) Quartzo subarredondado, mal selecionado; 80%; B2) 65% Quartzo subarredondado, moderadamente selecionado;	A) 45% e B1) 40% Quartzo subarredondado, mal selecionado; B2) 70%, Quartzo subarredondado, moderadamente selecionado;
Poros	Empilhamento complexo: entre grãos simples e pequenos agregados, 50%;	A) (50%) Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados; B) (40%) Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados (60%); - Intragregados: Predomínio de cavidades (40%); C1) (42%) Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados; C2) (28%) Empilhamento simples (arranjo de grãos);	A) (40%) Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados (60%); -Intragregados: Predomínio de cavidades (40%); B1) (35%) Empilhamento complexo entre grãos simples e pequenos agregados; B2) (32%) mpilhamento simples (arranjo de grãos);	A) (40%) Predomínio de cavidades (70%), vesículas e canais biológicos (30%); B1) (40%) Empilhamento complexo de grãos simples e pequenos agregados; B2) (25%) Empilhamento simples (arranjo de grãos de quartzo);
Distribuição relativa	Gefúrica (70%) + Porfírica (30 %);	A) Porfiro-Enáulica (40%) + Quito-Gefúrica (60%); B) Enáulica-Porfírica; C2) Enáulica; C1) Mônica;	A) Quito-Gefúrica (40%) + Porfiro-Enáulica (60%); B1) Porfiro-Enáulica B2) Mônica;	A) Quitônica (70%) + Gefúrica (30%); B1) Enáulica-Porfírica; B2) Mônica (90%);
Feições pedológicas	Não; *Presença de raízes;	A) Não; B) Não; C) Revestimento do tipo crosta. C1) Zona de transição, acúmulo de material; C2) Camada de grãos de quartzos de tamanhos moderadamente selecionados, dispostos conforme o tamanho;	A) Não; B) Revestimento do tipo crosta; B1) Zona de transição, acúmulo de material fino; B2) Camada de grãos de quartzos, dispostos conforme o tamanho.	A) Não; B) Revestimento do tipo crosta; B1) Zona de transição, acúmulo de material fino; B2) Camada espessa de quartzos acumulados, conforme o tamanho;

ANEXO E – Descrição micromorfológica para PR no ano 2010

Preparo Reduzido (2010)				
Atributo	0	27	54	80
Geral	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (80%), B (20%);	Distribuição heterogênea de material. Três zonas A (70 %), B (30%) e C (10%);	Distribuição heterogênea de material. Três zonas A (80%), B (15 %) e C (5%)	Distribuição heterogênea de material. Três zonas A (85%) B (15 %)
Micro-estrutura	A) Microgranular adensada + microagregados intergrãos; B) Cavitária Irregular;	A) Microgranular adensada + Cavitária irregular B) microgranular intergrãos + Cavitária irregular C) Estrutura poro vesicular intergrãos	A) Microgranular adensada + Cavitária Irregular; B) Cavitária Irregular + Grãos compactos com pontes e películas; C) Estrutura poro vesicular;	A) Microgranular adensada + Cavitária Irregular; B) Estrutura poro vesicular intergrãos (35%) + Cavitária Irregular (35%) + Grãos simples (30%);
Material fino	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 25%; B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%; B) 15% C) 10%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20% B) 15% e C) 10%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 20%; B) 10%;
Material grosso	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 35%; B) 35%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 40%; B) 35% C) 40%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 40%; B) 45%; C) 40%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) 40% B) 40% + moderadamente selecionado
Poros	A) (40%) Empilhamento complexo de grãos+ cavidades e Fissuras; B) (50%) Predomínio de cavidades, canais e fissuras;	A) (40%) Empilhamento complexo de grãos + cavidades; B) (50%) Cavidades e vesículas; C) (50%) Predomínio Cavidades;	A) (40%) Predomínio de cavidades (80%) e canais (20%); B) (40%) Cavidades, canais e fissuras; C) (50%) Cavidades + vesículas;	A) (40%) Predomínio de cavidades; B) (50%) Cavidades, vesículas e fissuras; + empilhamento simples (arranjo de grãos);
Distribuição relativa	A) Enáulica-Porfírica com zonas porfíricas; B) Quito-Gefúrica Enáulica;	A) Quito-Enáulica Porfírica; B) e C) Quito-Gefúrica Enáulica;	A) Enáulica Porfírica com zonas porfíricas. B) Quitônica (40%) + Enáulica (60%) C) Quito-Gefúrica Enáulica;	A) Enáulica-Porfírica com zonas porfíricas; B) Quito-Gefúrica Enáulica (60%) + Mônica (40%);
Feições pedológicas	A) Não B) Formação de crosta diferenciada, material em superfície muito desorientado e poroso; Presença incipiente de laminação de argila;	A) não; B) não; C) Revestimento do tipo crosta; incipiente, irregular, não constante na superfície do solo; Material em superfície muito desorientado e poroso; Presença incipiente de laminação de argila;	A) não; B) não; C) Revestimento do tipo crosta; incipiente, irregular, não constante na superfície do solo. Muito distinta da PC. Laminações estreitas de material fino acumulado no interior e ao longo dessa camada.	A) não B) Revestimento do tipo crosta; irregular, não constante na superfície do solo; Material em superfície muito desorientado e poroso; Presença incipiente de laminação de argila; Diferente das anteriores, apresenta bolsões de areia,

ANEXO F – Descrição micromorfológica para SP no ano 2010

Sem Preparo (2010)				
Atributo	0	27	54	80
Geral	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (20%) e B (80%)	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (30 %) B (70%)	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (70%) B (30 %)	Distribuição heterogênea de material. Duas zonas A (80%) B (20 %)
Micro Estrutura	A) microgranular adensada + microagregados intergrãos; B) Cavitária irregular;	A) microgranular adensada + cavitária irregular; B) cavitária irregular + estrutura poro-vesicular intergrãos;	A) microgranular adensada + cavitária irregular microagregados intergrãos; B) vesicular (80%) + microgranular coalescida (20%);	A) microgranular adensada + cavitária irregular; B) Cavitária irregular;
Material fino	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 25%; B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 25%; B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) 25%; B) 15%;	Argila e matéria orgânica, marrom escura, A) e B) 25%;
Material grosso	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) e B) 40%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) e B) 40%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado, A) e B) 35%;	Quartzo subarredondado, mal selecionado; A) 40%; B) 35%;
Poros	A) (35%) Predomínio: Cavidades; vesículas e fissuras; B) (45%) Predomínio de cavidades;	A) (35%) Predomínio de cavidades, canais e fissuras; B) Cavidade e vesículas;	A) (40%) Cavidades, irregulares (dominante); B) (50%) vesículas e Cavidades;	A) (35%) Cavidades irregulares, canais e fissuras; B) (40%) Predomínio de cavidades;
Distribuição relativa	A) Enáulica-porfírica com zonas Quito-gefúrica-Enáulica; B) Quito-Gefúrica Enaulica;	A) Quito-gefúrica-Enáulica com zonas porfíricas; B) Quito- Gefúrica Enaulica;	A) Quito-porfírica com pequenas zonas porfíricas; B) Quito-porfírica Enáulica;	A) Enáulica-porfírica; B) Quito- Gefúrica Enaulica;
Feições pedológicas	A) não; B) Aparentemente sem presença de crosta, mas com evidências de material fino recobrimdo a superfície da solo, porém não é constante em toda lâmina. Material da superfície mais solto e desorientado do que em sub-superfície	A) Presença de excrementos, pouco envelhecido, não incorporado ao solo. Não rugoso, redondo, 3%; B) Aparentemente sem presença de crosta, mas com evidências de material fino recobrimdo a superfície do solo, porém não é constante em toda superfície. Material da superfície mais solto e desorientado do que em sub-superfície;	A) não; B) Aparentemente sem presença de crosta. Material da superfície mais solto e desorientado do que em sub-superfície; Presença de laminações de material fino permeando esta camada de material desorientado.	A) Presença de raízes; B) Aparentemente sem presença de crosta, mas com evidências de material fino recobrimdo a superfície da solo, porém não é constante em toda superfície da lâmina. Material da superfície mais solto e desorientado do que em sub-superfície