

Modelagem matemática para predição da perda de água por erosão em um Latossolo argiloso sob sistema plantio diretoMayra Beatriz Semiano Castro^{1*}, Deonir Secco^{1,2}, Pablo Chang², Matheus Rodrigues Savioli¹

¹Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Curso de Engenharia Agrícola. Rua Universitária 2069, Jardim Universitário, CEP 85819-110, Cascavel – PR.

²Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura. Rua Universitária, n. 2069, CEP: 85.819-110, Jardim Universitário, Cascavel, PR.

*E-mail autor correspondente: mayrabscastro@gmail.com

Artigo enviado em 08/12/2020, aceito em 01/06/2021

Resumo: A erosão é uma das principais causas de degradação dos solos agrícolas, os fatores da erosão hídrica são influenciados principalmente pela forma de uso e manejo do solo. O objetivo deste trabalho é o de desenvolver um modelo matemático de predição de perdas de água por erosão em um Latossolo argiloso. O experimento foi realizado em Cascavel – PR em lavoura comercial de milho sob sistema de plantio direto. Os tratamentos utilizados para determinação das taxas de perdas de água por erosão foram seis espécies de cobertura de verão: Milheto; Guandu anão; *Crotalaria juncea*; Feijão guandu; *Crotalaria spectabilis* e Mucuna preta. As propriedades físicas como densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica saturada foram monitoradas e relacionadas ao estado estrutural do solo. A cada precipitação durante o cultivo de milho foi efetuada a coleta de perda de água, mensurando a quantidade precipitada e medindo o volume de água dentro de cada recipiente coletor por meio de provetas graduadas. Também foram coletadas durante o ciclo do milho a massa seca da palha para verificar a influência do resíduo vegetal na superfície nas perdas de água por erosão. Foram realizadas análises de regressão linear múltipla das perdas de água em função dos parâmetros analisados, verificando quais apresentaram maiores coeficientes de correlação de Pearson. De acordo com o modelo matemático gerado, as variáveis macroporosidade, microporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e massa seca de palha foram os parâmetros mais importantes para estimar as perdas de água por erosão.

Palavras-Chave: erosão hídrica, otimização, sistemas de manejo

Mathematical modeling to determine water loss by runoff in a loamy Oxisols

Abstract: Erosion is one of the main causes of degradation of agricultural soils, the factors of water erosion are influenced mainly by the way of use and management of the soil. The objective of this work is to develop mathematical models to predict water loss through erosion in a loamy Oxisols. The experiment was carried out in Cascavel - PR in a commercial corn crop under no-tillage system. The treatments used to determine water loss rates due to erosion were six species of summer cover: Millet; dwarf pigeon; *Crotalaria juncea*; pigeon pea; *Crotalaria spectabilis* and Black mucuna. Physical properties such as density, macroporosity, microporosity, total porosity and saturated hydraulic conductivity were monitored and related to the structural state of the soil. For each precipitation during corn cultivation, water loss was collected, measuring the precipitated amount and measuring the volume of water inside each collecting container using

graduated cylinders. The dry straw mass was also collected during the corn cycle to verify the influence of the vegetal residue on the surface in the erosion water losses. Multiple linear regression analyzes of water losses were performed as a function of the parameters analyzed, verifying which had the highest Pearson correlation coefficients. The macroporosity, microporosity, hydraulic conductivity of the saturated soil and dry straw weight were the parameters that most influenced the water losses due to erosion.

Keywords: water erosion, optimization, management systems

Introdução

O escoamento superficial é responsável pela abrangente produção de sedimentos (Miguel et al., 2014). No Brasil, o fenômeno é uma das principais causas de degradação dos solos agrícolas, estimando-se cerca de 616,5 milhões de toneladas de terra ao ano e com custos de despesas em ordem de US\$1,3 bilhões (Dechen et al., 2015).

Define-se erosão hídrica como o transporte de partículas de solo, água, nutrientes e matéria orgânica pela água da enxurrada no processo do escoamento superficial do solo (Dechen et al., 2015; Pandey et al., 2016). O efeito das propriedades do solo em relação à erosão é um tópico necessário a ser investigado, visto que tal efeito afeta no transporte de materiais sob os impactos das gotas de chuva e lavagem pelo escoamento (Ouyang et al., 2018). Dessa forma, as causas do escoamento estão relacionadas com a erosividade da chuva, erodibilidade do solo e cobertura vegetal, essa última sendo de suma importância no controle do escoamento superficial (Dechen et al., 2015).

Já em relação à intensidade do escoamento superficial, além do relevo, também pode sofrer variação em função do sistema de manejo, da semeadura, dos tratamentos culturais, do preparo do solo e da colheita mecanizada (Cândido et al., 2014; Volk e Cogo, 2014). Ademais, a intensa utilização de insumos agrícolas, podem contribuir para as perdas de solo de forma significativa, pois estas por vezes desequilibram o balanço químico

deste (Filho et al., 2016). A exposição do solo ao intemperismo induz ao selamento superficial, este definido como uma fina camada de partículas com adensamento, o que dificulta a infiltração de água no perfil do solo (Cândido et al., 2014).

Com isso, pelas perdas de água e solo serem um problema recorrente no âmbito agrícola, várias pesquisas têm buscado formas de estimar tais perdas, orientando-se às práticas conservacionistas e maximizando a sua redução (Eduardo et al., 2013). De acordo com Keesstra et al. (2016), tais pesquisas são de suma importância científica e devem ser destacadas, pois atualmente as estratégias de conservação de água e solo não são frequentemente aplicadas.

Dessa forma, a modelagem matemática se torna uma ferramenta única e eficiente para se realizar as previsões e simulações das taxas de perdas dos materiais escoados. Ao longo dos anos, esses trabalhos com foco na modelagem têm contribuído muito para a compreensão do processo do escoamento (Miguel et al., 2014).

Os modelos têm sido uma forma mais viável pelo custo e benefício, além de prever impactos das ações humanas sobre a natureza, mesmo assim, ainda é um desafio para muitos cientistas que estudam o processo (Mello et al., 2016). E devido à grande diversidade e abrangente natureza dos modelos, existe uma infinidade de métodos e soluções para resolver qualquer problema prático (Pandey et al., 2016).

As principais dificuldades confrontadas na aplicação dos modelos baseados são as extensas entradas de dados, complexidade natural e precisão (Pandey et al., 2016). Portanto, torna-se necessário tomar variáveis que facilitem a entrada de dados e, ao mesmo tempo, mantenham uma precisão adequada dos resultados simulados com os dados observados.

Assim, a utilização de modelos matemáticos para resolver problemas de solo é de suma importância para o âmbito científico, trazendo dados e informações relevantes para o aprofundamento deste tema. Ao passo que pode contribuir em reorientação de uso e manejo do solo e, além disso, promover melhorias no solo visando a sustentabilidade dos cultivos agrícolas.

Portanto tem-se como objetivo desenvolver um modelo matemático de predição das perdas de água por erosão em um Latossolo argiloso sob sistema plantio direto na região oeste paranaense, determinando os fatores que mais contribuem para as perdas de água por erosão.

Material e métodos

As coletas foram realizadas na safra de 2019 em lavoura de milho comercial, sob palhada de soja, pelo sistema plantio direto há pelo menos 10 anos. O clima da região é caracterizado como subtropical mesotérmico superúmido com temperatura média anual em torno de 19°C (Lima et al., 2012) e a pluviosidade média anual variando entre 1.600 a 2.000 mm (Caviglione et al., 2000). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, com textura argilosa (Embrapa, 2018).

As análises físicas com amostras de solo com estrutura preservada,

coletadas com o uso de anéis metálicos (5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura) nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m de profundidade, foram realizadas após a colheita da soja, onde determinou-se porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade (Ds) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat). Para determinação da porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 48h e submetidas à tensão de 6 kPa em coluna de areia (Reinert e Reichert, 2006) e, posteriormente, secas em estufa a 105 °C. A Pt foi calculada pela razão do volume de água retido no solo saturado e o volume do solo; a Micro pela razão do volume de água retido no solo na tensão de 6 kPa e o volume do solo; a Macro pela diferença entre Pt e Micro; a Ds pela razão entre a massa de sólidos e o volume do solo (Blake e Hartge, 1986). Com as mesmas amostras que foi determinada a Ds e o espaço poroso do solo (PT, Macro e Micro), previamente foi terminada a Ksat do solo com um permeâmetro de carga constante (Embrapa, 1997).

Em relação ao recolhimento de amostras de perdas de água por escoamento, foram construídas calhas coletoras de 9,3 m² delimitadas por separador de grama, em lavoura comercial sob sistema plantio direto e com resíduos vegetais da cultura anterior (soja). As calhas foram confeccionadas de PVC de 3 metros de comprimento e 100 mm de diâmetro e foram alocadas no sentido de maior declividade do solo, de modo que a água escoada fosse ser conduzida aos recipientes de armazenamento (bombonas plásticas) em um nível abaixo da superfície, aos quais foram conectados às calhas por meio de mangueiras corrugadas 3/4".

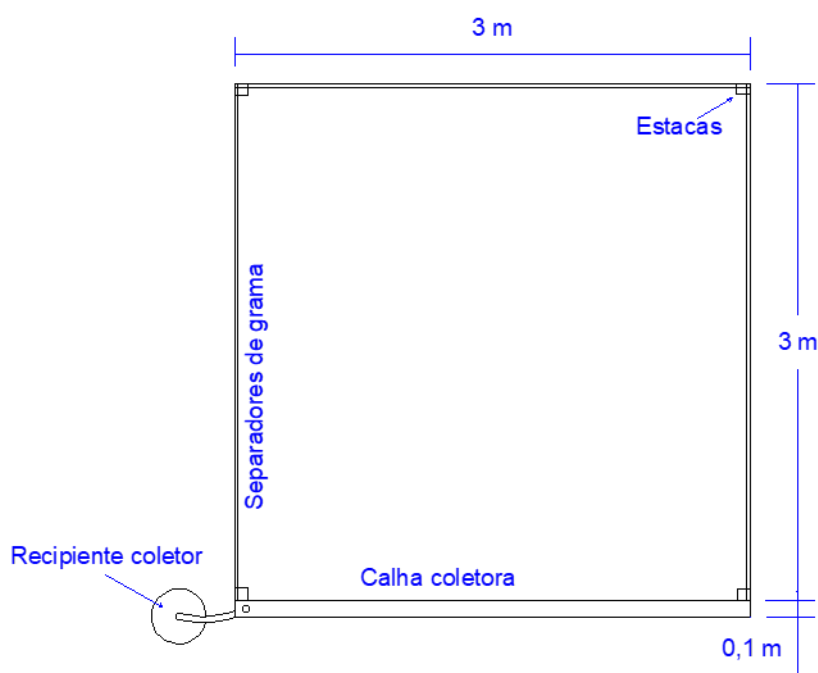


Figura 1. Modelo das calhas coletoras e suas medidas.

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso com blocos, sendo 6 tratamentos, definindo-se como 6 pontos de coleta e realizado uma faixa compactada para todos os tratamentos definidos como blocos. Os tratamentos consistem em T1 - Milheto; T3 - Guandu anão; T8 - *Crotalaria juncea*; T9 - Feijão guandu; T10 - *Crotalaria spectabilis* e T13 - Mucuna preta.

A cada precipitação durante o cultivo de milho foi efetuada a coleta de perda de água, mensurando a quantidade precipitada (mm) e medindo o volume de água (L) dentro de cada recipiente coletor por meio de baldes graduados.

Foi feita a coleta de palha, com periodicidade de 15 dias, para verificar o efeito da cobertura vegetal nas perdas de água. Para isso, foi jogada aleatoriamente uma armação quadrangular de 30x30 cm na parcela experimental. Após isso, foi coletada toda a palha no interior da armação, fazendo-se duas repetições por parcela. O material foi colhido em sacos de papel kraft identificados. Por fim, foram pesadas as amostras de palha após

colocadas na estufa a 65°C até massa constante.

Sobre a modelagem estatística, em primeiro momento, foi feito um levantamento dos dados, calculando-se o delineamento em blocos casualizados e a regressão linear múltipla. Foram realizadas análises de regressão das perdas de água em função da densidade; macro, micro e porosidade total; condutividade hidráulica e massa seca da palha. Ao passo que, foi verificado, por meio de correlação linear, quais das variáveis possuem maiores graus de coeficiente de correlação linear. E então desenvolvido um modelo geral das perdas de água em função dessas variáveis selecionadas.

Resultados e discussão

Os resultados das coletas e procedimentos laboratoriais foram tabulados a fim de se obter as variáveis de interesse que correlacionam com a perda de água nos tratamentos. Por meio da regressão linear múltipla e delineamento em blocos casualizados,

estas variáveis foram analisadas como segue a apresentação dos resultados.

No delineamento em blocos casualizados (DBC), utilizou-se como tratamento as parcelas T1 - Milheto; T3 - Guandu anão; T8 - *Crotalaria juncea*; T9 - Feijão guandu; T10 - *Crotalaria spectabilis* e T13 - Mucuna preta; os blocos em áreas compactadas e não compactadas; enquanto a variável resposta foi a perda

de água em L/ha, como seguem as Tabelas 1, 2, 3 e Figura 3.

Pela análise descritiva das perdas de água (Tabela 1), observa-se uma assimetria positiva, indicando uma distribuição maior pelo lado direito da função. A curtose negativa demonstra que esta é platicúrtica, mas devido aos resultados próximos de zero, aproxima-se a uma distribuição normal.

Tabela 1. Análise descritiva da perda de água por escoamento

Mínimo	107,53
1º Quartil	3225,81
Mediana	7634,41
Média	8674,97
3º Quartil	12903,23
Máximo	25806,45
Variância	43514583
Desvio Padrão	6596,56
Coefficiente de Variação (%)	76,04
Assimetria	0,75
Curtose	-0,23
Tamanho da Amostra	180

Seguindo a análise do bloxpot, na Figura 3, os blocos mostraram não haver pontos discrepantes e uma média próxima a mediana, que indica

normalidade dos dados. A mediana de área compactada foi relativamente maior que a da não compactada, apesar que as médias se assemelharam.

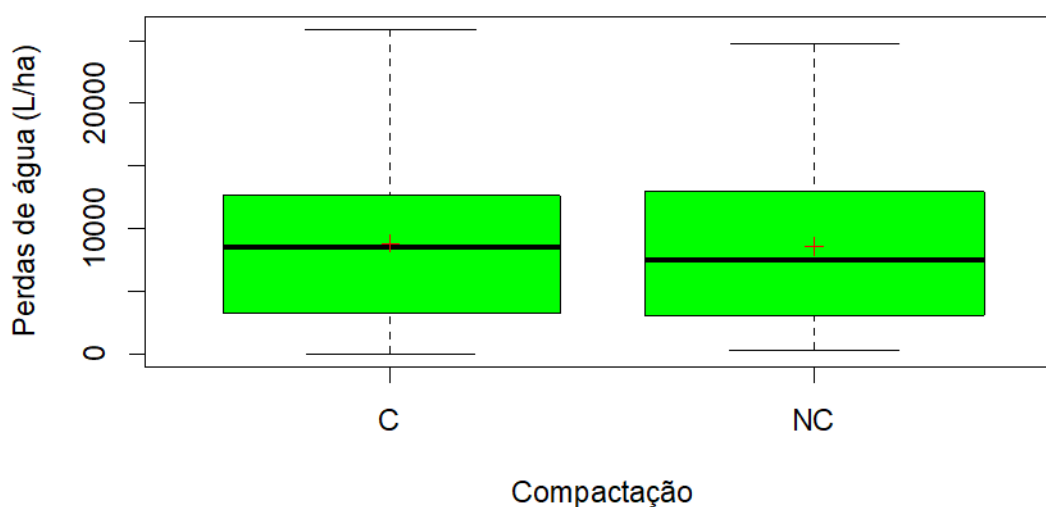


Figura 3. Bloxpot das perdas de água por escoamento nas áreas compactadas (C) e não compactadas (NC) e suas respectivas médias.

Enquanto na Figura 4, os tratamentos, em sua maioria, apresentaram médias próximas à mediana, e apenas o T13 apresentou

ponto discrepante acima de seu limite superior. Visualmente, T3 (Guandu anão) apresentou maiores perdas de água, enquanto a menor foi T1 (Milheto).

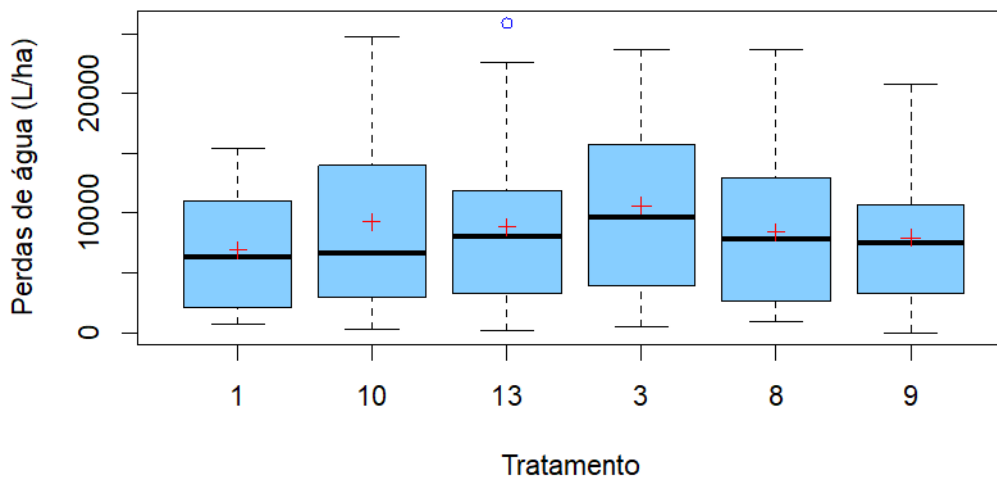


Figura 4. Bloxpot das perdas de água por escoamento nos tratamentos e suas respectivas médias.

A Tabela 2 é referente à análise de variância da perda de água por escoamento em DBC, a 5% de

significância. Demonstrou-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos e blocos (P-valor > 0,05).

Tabela 2. Análise de variância perda de água por escoamento a 5% de significância.

	GL	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Tratamento	5	5208,69	1041,74	0,75	0,59
Bloco	1	97,44	97,44	0,07	0,79
Resíduo	173	241885,40	1398,18		

Enquanto a Tabela 3 mostra que, estatisticamente, todos os tratamentos são iguais, não apresentando nenhuma

cultura recuperadora em destaque para todos os testes realizados.

Tabela 3. Testes de comparação de médias.

Tratamentos	Médias	Erro padrão	Tukey
T1	6921,14	6,83	a
T10	9320,17	6,72	a
T13	8858,38	6,83	a
T3	10600	6,83	a
T8	8361,12	6,94	a
T9	7957,03	6,83	a

Segundo trabalho de Castro et al. (2011) o guandu apresentou menor

perda de água em comparação ao milho e crotalária, relacionadas a cobertura do

solo, enquanto Cardoso et al. (2012) demonstra que a crotalaria apresentou maior quantidade de cobertura de solo e menores perdas de água comparado ao milho.

Conforme as análises pela regressão linear múltipla, seguem as Tabelas 4, 5, 6 e a Figura 5, que demonstra a intensidade de interferência das variáveis na perda de água por escoamento. Sendo X1: densidade do solo, X2: macroporosidade, X3: microporosidade, X4: porosidade total,

X5: condutividade hidráulica saturada (ksat) e X6: massa seca da palha.

Observa-se na Figura 5 a correlação linear de Pearson entre as variáveis. Em que as variáveis X2 (macroporosidade) e X4 (porosidade total) apresentaram uma relação direta mais forte que X5 (ksat) e X4. Enquanto X1 (densidade) e X4 (porosidade total) demonstraram relação negativa máxima (-1), portanto inversa, assim como X1 e X2 (densidade e macroporosidade).

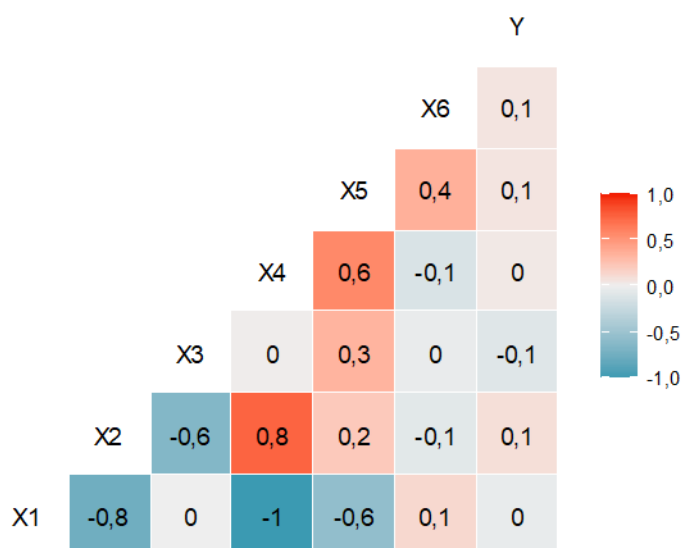


Figura 5. Correlação linear de Pearson entre as variáveis. Sendo X1: densidade do solo, X2: macroporosidade, X3: microporosidade, X4: porosidade total, X5: condutividade hidráulica saturada (ksat) e X6: massa seca da palha.

Ainda mais, sobre a Figura 5, foi possível observar que a variável Y (perda de água) houve maior correlação com X2, X3, X5 e X6 e nenhuma correlação com X1 e X4. Isso pode ser explicado pois a macro e microporosidade são fatores físicos do solo responsáveis pela infiltração e retenção da água no solo. Enquanto a compactação resulta na redução de macroporos e na diminuição da capacidade de infiltração de água e, então, na condutividade hidráulica saturada.

Já a massa seca de palha auxilia na retenção de água no solo. Observado no experimento de Spohr et al. (2009), em

que a presença de massa seca reduziu as perdas de água no solo e que solos argilosos bem estruturados apresentam boas taxas de infiltração.

Assim como visto em Pinheiro et al. (2009), em que a infiltração de água no solo é afetada pela estrutura do solo, onde os responsáveis pela infiltração são os macroporos; e pela retenção de água no solo, os microporos e a presença de palhada sobre o solo, característica principal do plantio direto. Além de diminuir a carga cinética da gota de chuva, a palhada evita a desagregação do solo superficial e do selamento superficial que reduz a infiltração. Como

também, aumenta a rugosidade superficial, diminuindo a velocidade de escoamento, permitindo maior tempo para a infiltração e reduzindo as perdas de água.

A Tabela 4 apresenta a análise de

variância da perda de água a 5% de significância da Regressão Linear Múltipla, que dado o P-valor maior que 0,05, não houve diferença significativa entre as variáveis.

Tabela 4. Análise de variância da perda de água por escoamento.

	GL	SQ	MQ	F	Pr(>F)
X1	1	214,81	214,81	0,15	0,69
X2	1	1589,02	1589,02	1,14	0,29
X3	1	50,81	50,81	0,04	0,85
X5	1	2957,76	2957,76	2,13	0,15
X6	1	416,74	416,74	0,30	0,58
Resíduo	174	241962,37	1390,59		

Por meio dos coeficientes do modelo na Tabela 5, o modelo

matemático de predição de perdas de água por erosão é:

$$Y=4287233,07-1622709,98*X1-43056,86*X2-43139,24*X3+51,52*X5-0,44*X6$$

Tabela 5. Coeficientes do modelo de regressão múltipla da perda de água por escoamento.

	Estimativa	Erro padrão	Valor t	P-valor
(Intercept)	4287233,07	3307044,06	1,11	0,27
X1	-1622709,98	1259224,95	-1,10	0,27
X2	-43056,86	33365,61	-1,10	0,27
X3	-43139,24	33157,53	-1,11	0,27
X5	51,52	33,36	1,43	0,16
X6	-0,44	0,90	-0,55	0,58

O coeficiente de determinação se resultou em $R^2 = 0,764$ e um R^2 ajustado = 0,193. Portanto, o modelo de regressão não é estatisticamente preciso para estimar valores de perdas de água. Mas, por se tratar de coletas a campo, é usual que a variabilidade seja alta, o que implica em alternativas como essa para prever dados.

Conclusão

Os tratamentos apresentaram resultados semelhantes quanto as perdas de água, concluindo que os bioporos criados pelas espécies de cobertura foram suficientes para manter a

infiltração do solo. De acordo com a correlação linear de Pearson, as variáveis macroporosidade, microporosidade, condutividade hidráulica saturada e massa seca de palha, foram mais importantes para estimar a perda de água por erosão.

Referências

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis: Part 1 - Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Madison: **American Society of Agronomy**, p. 363-375, 1986.

- CÂNDIDO, B. C.; SILVA, M. L. S.; CURI, N.; BATISTA, P. V. G. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1565-1575, 2014.
- CARDOSO, D. P.; SILVA, M. L. N.; CARVALHO, G. J.; DIEGO A. F. F.; AVANZI, J. C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 632- 63, 2012.
- CASTRO, N. E. A.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CARVALHO, G. J.; MARQUES, R. M.; NETO, G. F. G. Plantas de cobertura no controle da erosão hídrica sob chuvas naturais. **Bioscience Journal**, v. 27, p. 775- 785, 2011.
- DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. DE F.; MARIA, I. C. DE. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, p. 224-233, 2015.
- EDUARDO, E. N.; DE CARVALHO, D. F.; MACHADO, R. L.; SOARES, P. F. C.; DE ALMEIDA, W. S. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em Argissolo Vermelho-Amarelo, sob condições de chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 796-803, 2013.
- EMBRAPA SOLOS. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330804>. Acesso em: 8 abril 2021.
- EMBRAPA SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação do solo**. Brasília/DF, EMBRAPA CNPS, 2018. 5ªed. 532P. (Embrapa Solos – livro técnico). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 8 abril 2021.
- FILHO, O. J. V.; CORSATO, L. G.; QUIESSI, J. A.; KANNO, O. Y.; PENTEADO, R. B.; ARABORI, R. M.; BELORTR, L. C. C.; LIMA, M. E. DE. Diagnóstico e reabilitação agroambiental de trecho de bacia hidrográfica por sensoriamento remoto e turbidez da água. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1099-1109, 2016.
- KESSTRA, S.; PEREIRA, P.; NOVARA, A.; BREVIK, E. C.; AZORIN-MOLINA, C.; PARRAS-ALCÁNTARA, L.; JORDÁN, A.; CERDÀ, A. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. **Science of the Total Environment**, v. 551, p. 357-366, 2016.
- LIMA, C.B.; SANTOS, R.F.; SIQUEIRA, J. Análise da variação das temperaturas mínimas para Cascavel-PR. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 1, p. 1-21, 2012.
- MELLO, C. R. D.; NORTON, L. D.; PINTO, L. C.; BESKOW, S.; CURI, N. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 7-25, 2016.
- MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. DE A.; MOURA-BUENO, J. M.; TIECHER, T. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 585-598, 2014.
- OUYANG, W., WU, Y., HAO, Z., ZHANG, Q., BU, Q., & GAO, X. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Science*

of the Total Environment, v. 613, p. 798-809, 2018.

PANDEY, A.; HIMANSHU, S. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, v. 147, p. 595-620, 2016.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Revista ambiente e água**, v. 4, p. 188-199, 2009.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931-1935, 2006.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R.; GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G.; PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v. 39, p. 74-81, 2009.

VOLK, L. B. D. S.; COGO, N. P. Erosão hídrica, em três momentos da cultura do milho, influenciada por métodos de preparo do solo e semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 565-574, 2014.