

MODELOS MATEMÁTICOS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL COM O USO DE SIMULADOR DE CHUVA

Pablo Chang^{1*}, Deonir Secco¹, Vitória Fenilli Vidaletti¹, Natasha Barchinski Galant Lenz¹, Maikon Lucian Lenz¹, Fernando Luiz da Cruz Balena¹, Carlos Henrique Fornasari¹ e Vitória Regina Morello Gongora¹

¹Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Campus de Cascavel. Rua Universitária 2069, CEP: 85819-110, Bairro Jardim Universitário, Cascavel, PR. *E-mail: pablo-sdw@hotmail.com

RESUMO: A erosão do solo é um dos principais problemas no âmbito agrícola. Entre os mecanismos para aprofundar os estudos sobre a erosão está na utilização de simuladores de chuvas, aliados à modelagem matemática. O trabalho tem por objetivo fazer uma revisão de literatura sobre os modelos matemáticos que estudam o escoamento superficial e que utilizam um simulador de chuva para obtenção de dados. Inicialmente é mostrado a importância de utilizar modelos matemáticos e de quais critérios devem ser considerados para que um simulador de chuva seja adequado à pesquisa. Depois, é analisado alguns trabalhos recentes, relacionando tais critérios observados com os resultados obtidos e suas recomendações para o manejo de solo. De modo geral, os simuladores foram bastante úteis para criar condições específicas de um estudo e identificar quais variáveis mais interferem na erosão do solo.

PALAVRAS-CHAVE: erosão hídrica, simulação, física do solo.

MATHEMATICAL MODELS OF SURFACE FLOW WITH THE USE OF RAIN SIMULATOR - A REVIEW

ABSTRACT: Soil erosion is one of the main problems in the agricultural field. Among the mechanisms for further studies on erosion is the use of rain simulators, combined with mathematical modeling. The work aims to make a literature review on the mathematical models that study the runoff and that use a rain simulator to obtain data. Initially, it shows the importance of using mathematical models and what criteria should be considered for a rain simulator to be suitable for research. Then, some recent studies are analyzed, relating these observed criteria to the results obtained and their recommendations for soil management. In general, the simulators were very useful to create specific conditions for a study and to identify which variables most interfere in soil erosion.

KEYWORDS: water erosion, simulation, soil physics.

INTRODUÇÃO

A degradação dos solos é um dos principais problemas no âmbito agrícola, isso porque ocasiona o arraste de água, solo e nutrientes que seriam disponíveis para o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, o rendimento de grãos. Além dos prejuízos para a atividade econômica, também potencializa os desastres para o meio ambiente (Bertol et al., 2013; Eduardo et al., 2013).

Por esta razão, é imprescindível o entendimento dos processos que conduzem a erosão do solo causado pelas forças da água, tendo em vista a relação das perdas de água, solo e nutrientes (Cândido et al., 2014). O estudo é de suma importância, pois visa a identificação de quais medidas mais apropriadas contra erosão, o que pode resultar em uma produtividade mais sustentável.

Entre os fatores que podem influenciar na intensidade do escoamento superficial e a erosão hídrica estão os tratos culturais, sistema de manejo, semeadura, colheita mecanizada e preparo do solo (Cândido et al., 2014; Volk e Cogo, 2014). A compactação do solo resultante do intenso tráfego de maquinarias reduz a macroporosidade e impede a infiltração, provocando a retenção de água na superfície.

Dessa forma, entre os mecanismos para aprofundar os estudos sobre a erosão hídrica está na utilização de simuladores de chuvas para avaliar o comportamento físico do escoamento superficial (Bertol et al., 2012). Além de serem bastante úteis para criar condições específicas de estudo, os simuladores são os mais utilizados para validar modelos matemáticos com teor alto físico e científico.

A utilização de modelos matemáticos para o estudo da erosão

A modelagem matemática é o principal instrumento para gerar informações valiosas nas estratégias do uso da terra e água nas lavouras, ainda mais com o intuito de precaver da erosão (Mello et al., 2016). Não obstante, é também o único meio disponível para previsão de dados (Vanwalleghe et al., 2017). Uma vez que pode estipular valores maiores como, por exemplo, de intensidades de chuva; para mostrar os efeitos econômicos referente às perdas totais.

Dentro da modelagem matemática, existem diversos tipos que se classificam de mais simples ao mais robusto (Pandey et al., 2016). Os modelos empíricos consistem em observar os dados experimentais de maneira superficial, fazendo suposições através de conjunto de equações ou explicações intuitivas. Os modelos mecanísticos objetivam compreender a resposta de um sistema científico maior por meio de cada parte específica e sedimentada. Já o modelo semi-empírico é o que mais é trabalhado na literatura, como uma combinação do empírico e mecanístico, visto que os modelos mecanísticos são mais difíceis de serem aplicados por sua ampla gama de fatores externos que influenciam o solo e ambiente de cada região.

Assim, é necessário caracterizar o que é considerado um bom modelo. De acordo com Pandey et al. (2016), um modelo matemático de qualidade visa a sua confiabilidade, robustez

da natureza, flexibilidade em se adaptar com o clima, facilidade de uso com um mínimo de dados e considerar a conservação prática e mudanças no manejo do solo.

Na revisão de literatura de Mello et al., (2016), a maioria dos modelos referentes ao estudo da erosão hídrica não apontaram os aspectos mais relevantes causadores da erosão, como o impacto das plantas de cobertura. Além disso, grande parte dos modelos foram testados em países desenvolvidos (Pandey et al., 2016).

Simuladores de chuva

Os simuladores de chuva são equipamentos que utilizam aspersores para lançar água com uma intensidade superior à capacidade de infiltração do solo. Dessa forma, promovendo uma camada de escoamento superficial do solo. Tais equipamentos possuem pretensão de simular condições de velocidade de distribuição e impacto das gotas de chuva, de intensidade de precipitação, do ângulo de impacto das gotas e duração de chuvas intensas (Brandão et al., 2006).

Alguns requisitos para serem atendidos são apontados por Meyer (1994), referentes ao tamanho de gotas de 1 a 3 mm; intensidade de precipitação entre 12 e 120 mm/h, área de aplicação maior que 0,5 m²; portabilidade; homogeneidade das gotas em toda área; ângulo de impacto das gotas vertical; continuidade das gotas e manutenção satisfatória.

De modo geral, os simuladores de chuva possuem vantagem referente ao menor custo comparado à chuva natural, à capacidade de obter maior controle das condições da parcela durante o teste e do fato de poder observar todo período da chuva, desde o início da precipitação, o tempo que inicia o escoamento, até a formação de sulcos. As principais dificuldades residem no alto custo de manutenção e da representatividade da distribuição e velocidade de gotas naturais (Brandão et al., 2006).

Uma análise dos modelos matemáticos com o uso de simulador de chuva

No trabalho de Tao et al. (2017), com o objetivo de modelar matematicamente o transporte de sedimento e soluto ao longo de declive em diferentes padrões de chuva, utilizaram um simulador de chuva em um solo de densidade 1,41 g/cm³. Os padrões de intensidades foram definidos como: uniforme, crescente, crescente-decrescente e decrescente, com intensidades variando de 100 a 160 mm/h, indicando que são altas intensidades de chuva.

O trabalho não descreveu em detalhes a estruturação do simulador de chuva, mas apresentou a área de aplicação que é de 1 m² e que o material escoado é coletado em barril de 30 cm de diâmetro. Em que a perda de água foi mensurada através do nível do barril, enquanto a perda de solo e nutrientes pela secagem de amostras e por espectroscopia ultravioleta e visível. Sem outras informações a respeito da dimensão e distribuição das gotas, foi possível observar que o simulador atende aos quesitos de dimensão da área aplicada e intensidades de chuvas dentro da faixa considerada de qualidade.

Referente à modelagem matemática, os autores partiram da equação de conservação de massa, um modelo mecanístico que descreve o processo de escoamento durante a chuva. É uma equação diferencial ordinária de duas variáveis: sobre distância e tempo. A partir disso, incluíram o coeficiente de rugosidade de Manning, fazendo-se modificações até chegar às soluções esperadas através do método de substituição das variáveis e condições iniciais e de contorno.

Diversos parâmetros físicos foram considerados nesses modelos. Como a taxa de infiltração, densidade aparente do solo e declive hidráulico. Entre as variáveis empíricas a serem obtidas por ajustes de curvas estão a constante de calibração de erosão por escoamento, a constante de calibração de erosão por respingo e a constante de transferência de massa convectiva e de adsorção.

Tais variáveis empíricas são de interesse para futuros trabalhos que podem ser desenvolvidos. O que chama atenção a constante de calibração de erosão por respingo, o que pode ser inserido modelos físicos sobre a proteção da cobertura vegetal, que são eficientes contra a erosão por impacto das gotas de chuva.

Os resultados obtidos pelos autores indicaram que os modelos conseguem prever com acurácia as perdas de sedimento e nutrientes. Os diferentes padrões de chuva interferem significativas nas perdas e todos os modelos foram desenvolvidos em solos descobertos, o que abre espaço para gerar variáveis referentes à cobertura vegetal.

O segundo artigo analisado foi de Xing et al. (2019). O objetivo foi de desenvolver um modelo matemático do transporte de nitrogênio amoniacal em escoamento com diferentes gradientes de declive sobre chuva simulada. O simulador foi confeccionado na faculdade de engenharia civil e de recursos hídricos na universidade de agricultura chinesa.

Formado por 3 bicos entre 5 metros de dois lados, o simulador apresentou distribuição de gotas de chuva de 85%. A área aplicada foi de 10x5 metros, com precipitação de 20 a 120

mm/h e diâmetro de gota de 1,4 mm. Tudo na faixa ideal para um simulador de qualidade. O que chama a atenção do tamanho da área, de 50 m², se tornando mais significativo que o trabalho anteriormente analisado.

A metodologia para a coleta foi a mesma de Tao et al. (2017), salientando que as amostras foram coletadas em garrafas plásticas e armazenadas a 4° C. No laboratório foram medidos nitrogênio amoniacal.

Referente aos cálculos do modelo, da mesma forma, partiram do princípio de conservação de massa e coeficiente de Manning. Também foi utilizado a equação de Philips para infiltração de água no solo. Porém, foi especificado que as equações foram solucionadas numericamente usando método de Runge-Kutta-Fehlberg por Matlab 12.0.

Os resultados mostraram que o escoamento foi aumentado e com o tempo e depois se estabilizou; enquanto o nitrogênio amoniacal primeiramente decresceu rapidamente e depois tendeu à estabilidade. A declividade alterou significativamente no aumento do escoamento e o nitrogênio amoniacal.

Um outro trabalho com modelagem semelhante foi encontrado em autores mais antigos, de Deng et al. (2008), em que desenvolveram um modelo de transporte de sedimento para erosão do solo sobre chuva simulada. Foi utilizado uma calha de solo com um simulador de chuva tipo aspersão e de inclinação ajustável. A área de aplicação foi de 2x2m e 0,12 m de altura de solo.

A profundidade pode não ser tão ideal, visto que as camadas compactadas em solo cultivável se situam entre 10 a 20 cm de profundidade. Foi descrito também que o solo original foi peneirado para remover rochas grossas e detritos orgânicos, antes de serem uniformemente espalhados na calha.

A compactação foi feita utilizando-se de bloco de madeira para bater suavemente até atingir uma densidade uniforme de 1,56 g/cm³. Foram usados três bicos de cone completo e uma altura do bico ao solo de 2,49 m e intensidade padrão de 211,8 mm/h, considerada relativamente alta. As amostras de solo foram feitas por meio de espectrofotometria óptica e por peneiramento convencional.

Quanto aos cálculos, os autores mostraram de forma mais detalhadas que os trabalhos analisados anteriormente, inclusive o que antecede a equação de conservação de massa através da integração. Foram utilizadas ilustrações para indicar a posição e direção das forças físicas que regem a deposição e erosão do solo durante o escoamento.

Os resultados foram exibidos em forma de hidrogramas referentes à taxa de transporte de sedimentos e a concentração de sedimentos simuladores numericamente estão em boa concordância com os dados experimentais correspondentes. Isto é, foi demonstrado a prova de conceito em laboratório.

Autores que trouxeram caminhos diferentes de modelagem e outro estilo de simulador foram de Hu et al. (2018), ao estudarem as forças internas de solo que mais contribuem nos impactos de respingo da chuva. Visto que uma das formas que mais contribuem para a erosão do solo é o impacto da chuva sobre o solo, causando a sua desagregação. Essas partículas desagregadas preenchem os macroporos, criando uma camada superficial, denominado selamento superficial. O que impede a infiltração de água e, conseqüentemente, formando o escoamento superficial.

O simulador foi montado através de uma caixa cilíndrica com a o topo aberto. Por baixo, foram alocadas agulhas de seringa com diâmetro de 0,6 mm de forma uniforme. A intensidade de água foi controlada ajustando-se a queda d'água através de um orifício no cilindro. Já a área de teste foi uma peneira circular com diâmetro de 10 cm e altura de 1 cm, coberto de malha, com o objetivo unicamente de avaliar o efeito do respingo. O tamanho da malha era de 0,25 mm para evitar o efeito da película de água no impacto da gota de chuva.

Foi empregado a solução eletrolítica e etanol como materiais de chuva para distinguir de forma quantitativa a contribuição das forças internas e externas do solo. Pois o etanol possui uma característica química de reduzir as forças de interação das partículas do solo.

Referente aos cálculos, foi utilizado cálculos de somatório das forças internas do solo que interagem a pressão líquida, eletrostática, de hidratação e de van der Waals. Juntamente a equação de energia cinética da gota de chuva. Os modelos foram empíricos, com ajustes exponenciais apresentando coeficientes de determinação de alto valor.

E os resultados apresentaram que a chuva com etanol pode manter a energia cinética das gotas de chuva, sendo uma ótima metodologia para avaliar unicamente o efeito da força do impacto das gotas na erosão por respingos. No geral, as forças internas do solo podem contribuir mais para a erosão do que a força por impacto das gotas, o que seria de grande indício para manejo do solo, como correção do solo (calagem e gessagem), adubação verde e adubação orgânica.

Além do trabalho que foca no impacto das gotas, um outro trabalho, desta vez brasileiro, concentrou a pesquisa na infiltração do solo. Como é o caso de Carvelho et al. (2015).

Compreender infiltração é também importante para reduzir os efeitos da erosão. Pois, permitindo maior volume de macroporos no perfil do solo, aumenta a sua capacidade de infiltração, reduzindo-se as chances de ocorrer escoamento superficial. E isso pode ser feito com o uso de plantas recuperadoras de estrutura, que deixam seus bioporos através das raízes, aumentando, assim, a sua macroporosidade.

Os autores não desenvolveram um simulador de chuva, como foi visto até então nos trabalhos analisados. Mas utilizaram um existente, que é o modelo InfiAsper2 de Alves Sobrinho, Gómez-Macpherson e Gómez (2008). Este simulador foi criado para fins de simular o escoamento superficial, com estrutura e tecnologia robusta, utilizando uma caixa de solo de 1x0,7 m de área e 0,16 m de altura. Destaca-se a altura da caixa, dado que é o suficiente para simular um solo comprimido pelo tráfico de maquinários.

Além disso, o simulador tem potencial de aplicar chuvas de 30 a 155 mm/h com o uso de bicos Veejet 80.100 e 80.150. Apesar que na época só existiam bicos que respingam água em formato cone oco, hoje em dia já se encontra pelo mesmo fabricante os bicos de cone cheio, denominados Fulljet.

No trabalho de Carvalho et al. (2015) foi aplicado os modelos de Kostiakov-Lewis, Horton e Philip de infiltração de água no solo. Os resultados mostraram que a combinação entre sistemas de manejo e estágios de cobertura interferem nas perdas de água e solo. Além de que o modelo de Horton foi o mais adequado para representar a taxa de infiltração de água.

Por fim, um último trabalho analisado foi de Volk e Cogo (2014), em que traz uma outra utilização de um simulador de chuva aplicado ao campo. Os autores aplicaram o simulador tipo de braços rotativos, ou comumente denominado modelo de Swanson (1965).

Movido a motor estacionário de dois tempos, a máquina aplica água por meio de dez tubos paralelos ao solo dispostos radialmente, sendo alocados bicos pulverizadores. A grande vantagem é que esse simulador é capaz de aplicar uma área de até 15 metros de raio.

Volk e Cogo (2014) conseguiram desenvolver modelos empíricos exponenciais e mostraram que as perdas de água e solo reduziram com o aumento da cobertura verde e com o incremento do índice de rugosidade superficial.

CONCLUSÃO

Através dos trabalhos analisados que envolvem modelagem com o uso de simuladores de chuvas, os simuladores foram importantes para obter maior controle das condições para um

objetivo específico e coletar grande número de repetições. Também foram vantajosos para desenvolver modelos matemáticos de alta qualidade por proporcionar menor variabilidade de dados.

Tais modelos conseguiram oferecer informações a respeito das variáveis que mais interferem na erosão do solo. Sendo que compreender a resposta do solo à chuva é fundamental para a escolha do sistema adequado de manejo de solo e água.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, W.S.D.; CARVALHO, D.F.D.; PANACHUKI, E.; VALIM, W.C.; RODRIGUES, S.A.; VARELLA, C.A.A. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1110-1119, 2016.

ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, Cardiff, v.24, n.2, p.163-170, 2008.

BERTOL, I.; RAMOS, R.R.; BARBOSA, F.T.; GONZÁLEZ, A.P.; RAMOS, J.C.; BANDEIRA, D.H. Water erosion in no-tillage monoculture and intercropped systems along contour lines. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.2, p.521-528, 2013.

BERTOL, I.; RAMOS, R.R.; BARBOSA, F.T.; GONZÁLEZ, A.P.; RAMOS, J.C.; BANDEIRA, D.H. Soil water erosion under different cultivation systems and different fertilization rates and forms over 10 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n.6, p.1918-1928, 2014.

BERTOL, I; BERTOL, C; BARBOSA, F.T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidráulicamente: fabricação e calibração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.6, p.1905-1910, 2012.

BRANDÃO, V.S. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: Editora UFV, 2006. 120p.

CÂNDIDO, B.M.; SILVA, M.L.N.; 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**, Viçosa, v.38, n.5, p.1565-1575, 2014.

CARVALHO, D.F.D.; EDUARDO, E.N.; ALMEIDA, W.S.D.; SANTOS, L.A.; ALVES SOBRINHO, T. Water erosion and soil water infiltration in different stages of corn development and tillage systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.11, p.1072-1078, 2015.

DENG, Z.; LIMA, J.L.M.P.; JUNG, H. Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. **Catena**, Giessen, v.76, n.1, p.54-62, 2008.

EDUARDO, E.N.; CARVALHO, D.F.; MACHADO, R.L.; SOARES, P.F.C.; 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**, Viçosa, v.37, n.3, p.796-803, 2013.

HU, F.; LIU, J.; XU, C.; DU, W.; YANG, Z.; LIU, X.; LIU, G.; ZHAO, S. Soil internal forces contribute more than raindrop impact force to rainfall splash erosion. **Geoderma**, Amsterdam, v.330, n.1, p.91-98, 2018.

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**, Lavras, v.40, n.1, p.7-25, 2016.

MEYER, L.D. Rainfall simulators for soil erosion research. **Soil erosion research methods**, Florida, v.3, n.1, p.83-103, 1994.

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

TAO, W.; WU, J.; WANG, Q. Mathematical model of sediment and solute transport along slope land in different rainfall pattern conditions. **Scientific reports**, London, v.7, n.1, p.44082, 2017.

VASCONCELOS, R.F.; SOUZA, E.R.; CANTALICE, J.R.; SILVA, L.S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.4, p.381-386, 2014.

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**, Viçosa, v.38, n.2, p.565-574, 2014.

XING, W.; YANG, P.; AO, C.; REN, S.; XU, Y. Mathematical model of ammonium nitrogen transport to runoff with different slope gradients under simulated rainfall. **Water**, Basel, v.11, n.4, p.675, 2019.