



Distribuição espacial da erosividade na Bacia Hidrográfica dos Rios Jaguarí e Camanducaia⁽¹⁾.

Lucas Machado Pontes⁽²⁾; Marx Leandro Naves da Silva⁽³⁾; Diego Alves Faustolo Bispo⁽⁴⁾; Marcelo Linon Batista⁽⁵⁾, Fabio Arnaldo Pomar Avalos⁽⁶⁾, Marcelo Silva de Oliveira⁽⁷⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos dos projetos da FAPEMIG e do CNPQ.

⁽²⁾ Doutorando em Ciência do Solo; UFLA (Universidade Federal de Lavras); Lavras, MG; lucas.pontesm@gmail.com; ⁽³⁾ Professor titular no Departamento de Ciência do Solo; UFLA; ⁽⁴⁾ Doutorando em Ciência do Solo; UFLA; ⁽⁵⁾ Doutorando em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas; UFLA; ⁽⁶⁾ Mestrando em Ciência do Solo; UFLA; ⁽⁷⁾ Professor titular do Departamento de Ciências Exatas; UFLA.

RESUMO: O potencial erosivo das chuvas, representado pela erosividade, é o principal fator ativo responsável pelas perdas de solos em bacias hidrográficas. Assim, o objetivo deste trabalho foi estimar a erosividade por meio do índice EI_{30} de modo distribuído para toda a Bacia Hidrográfica dos Rios Jaguarí e Camanducaia (BHJC). Para isso, foram utilizados dados mensais de séries históricas de 74 estações pluviométricas na região da bacia. O índice EI_{30} foi calculado para cada uma destas estações por meio de uma equação estabelecida para a região de Campinas, que relaciona este índice com as precipitações médias mensais e anuais. Os resultados foram espacializados por técnicas geoestatísticas, e foram avaliados três modelos de semivariância teórica. Os valores de EI_{30} variaram entre $5.663 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a região mais baixa, próximo à Campinas, e $10.516 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na Serra da Mantiqueira. O modelo esférico foi o que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais e obteve melhores índices na validação cruzada. A espacialização permitiu evidenciar a relação direta entre erosividade e altitude e, assim, separar as áreas mais suscetíveis à erosão hídrica quanto à precipitação total anual. Com base nos resultados é possível concluir que o efeito orográfico é a principal fonte de variação na precipitação e, por conseguinte na erosividade, além disso, a distribuição espacial do EI_{30} permitirá melhorar a modelagem da erosão para a bacia.

Termos de indexação: produtor de água, erosão hídrica, geoestatística

INTRODUÇÃO

O índice de erosividade das chuvas representa a capacidade potencial que as chuvas têm de provocar a erosão hídrica do solo.

Características como intensidade, duração e quantidade de chuva, tamanho, velocidade e forma das gotas, energia cinética, frequência, distribuição sazonal e período de retorno da chuva apresentam grande importância no processo erosivo (Wischmeier & Smith, 1978).

A Bacia Hidrográfica dos Rios Jaguarí e Camanducaia é o principal manancial de abastecimento para a região metropolitana de São Paulo, sobretudo devido à represa Jacaré que integra o Sistema Cantareira, o qual é responsável pelo abastecimento de cerca de nove milhões de habitantes (SABESP, 2014). Por isso, é fundamental compreender os fenômenos erosivos que atuam nesta bacia, de modo a permitir uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos e do solo quanto à qualidade das águas superficiais e à vida útil dos reservatórios.

Uma das principais limitações nos modelos de predição da erosão hídrica é a espacialização dos fatores utilizados no cálculo de perdas do solo. O avanço computacional permite a utilização de modelos mais robustos, porém, para inserir informações espacializadas devem ser adotadas técnicas mais precisas de interpolação espacial.

Neste sentido a geoestatística aparece como uma boa opção para o estudo de variáveis regionalizadas. Isto porque adota pressupostos que garantem predições sem tendência e com variância mínima, ou seja, maior precisão e exatidão (Landim & Yamamoto, 2013).

Assim, o objetivo deste estudo foi estimar a erosividade das chuvas de modo distribuído para a BHJC e avaliar modelos de semivariograma utilizados na Krigagem.

MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia Hidrográfica dos Rios Jaguarí e Camanducaia (BHJC) possui uma área de drenagem de 4.320 km^2 , dos quais 74% estão no

estado de São Paulo e a parte mais alta, com 1.140,80 km² em Minas Gerais. O clima na bacia está dividido em quatro classes climáticas segundo a classificação de Köppen. A região da Serra da Mantiqueira com clima Cwb, o médio Jaguarí com clima Cfb, e na parte mais baixa da bacia as classes Cwa e Cfa (Alvares et al., 2014).

Foram selecionadas 74 estações pluviométricas (**Figura 1**) com dados diários de precipitação disponibilizados no site da Agência Nacional das Águas (ANA). Os dados diários foram concatenados em base mensal e, após análise de consistência dos dados mensais, foi estimada a média para cada mês e média anual para cada estação de acordo com a série histórica disponível.

A erosividade média anual foi calculada, na forma do índice EI₃₀, com a equação $EI_{30}=68,730 (p^2/P)^{0,841}$ obtida em Campinas, SP (Lombardi Neto & Moldenhauer, 1992).

Análise geostatística

Para a análise geostatística foi utilizado a semivariância experimental definida por Journel (1989).

Para o conjunto de semivariâncias calculadas foram ajustados três modelos teóricos: Esférico, Exponencial e Gaussiano. Os modelos foram testados por meio de validação. O modelo com melhor desempenho foi utilizado para calcular a interpolação por Krigagem Universal e assim, gerar o mapa da erosividade média anual para a BHJC.

As análises geostatísticas foram realizadas no programa R, por meio do pacote GeoR (Ribeiro Junior & Diggle, 2001). Os mapas foram gerados com o software ArcGIS 10.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores do EI₃₀ estimados com os dados das precipitações médias mensais e anuais das 74 estações pluviométricas apresentaram média de 7.615,72 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, com desvio padrão de 1.098,26 e valores mínimos e máximos de 5.663,5 e 10.516,02 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ respectivamente. A precipitação média anual variou entre 1.162,33 mm na parte mais baixa da bacia e 2.008,26 mm na região da Serra da Mantiqueira.

Entretanto, estes valores extremos foram observados em estações fora dos limites da BHJC. Com a espacialização da erosividade os valores de EI₃₀ ficaram entre 6.700 e 8.870 MJ

mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (**Figura 3**). Estas estimativas são coerentes com as informações encontradas na literatura. A erosividade anual estimada para a região sul de Minas Gerais apresenta valores entre 5.145 a 7.776 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Aquino et al., 2014; Lima et al., 2009).

Em um trabalho mais abrangente Aquino et al. (2012) estimaram valores médios de EI₃₀ de 8.584 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ para o sul de Minas Gerais, com valores máximos de 9.810 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ na Serra da Mantiqueira. Nesse trabalho os autores encontraram coeficientes de correlação não significativos entre a erosividade e as coordenadas geográficas, por outro lado as condições climáticas regionais e características do relevo parecem exercer maior influência no EI₃₀.

Para a BHJC foi encontrado uma correlação positiva entre a longitude e a erosividade, bem como destas com a altitude. Estas relações foram consideradas no cálculo do semivariograma por meio de ajuste de regressão quadrática, para modelar a média espacial, referente à uma tendência de segunda ordem.

O modelo que melhor se ajustou às semivariâncias experimentais observadas e menor erro entre os valores preditos e observados foi o modelo esférico (**Tabela 1**).

Tabela 1 – Resultados do alcance (a), da razão de dependência espacial (RD) e da validação cruzada para os modelos de semivariograma teórico testados

Modelos	a	IN ¹	em ²	RD ³
	- km -			-- % --
Esférico	48,88	0,92	-3,24	58,6
Exponencial	11,76	1,36	-12,02	40,0
Gaussiano	22,73	1,15	-10,74	53,1

¹Inclinação da reta de regressão obtida entre valores estimados e observados. ²erro médio. ³razão de dependência espacial.

Além de apresentar o maior alcance, o modelo esférico apresentou os melhores resultados na validação, fato observado pela inclinação da reta de correlação entre dados preditos e observados mais próxima de 1 e menor erro médio. O modelo esférico foi escolhido para gerar o semivariograma teórico (**Figura 2**).

O valor do efeito pepita (C₀) do modelo ajustado foi estimado em 320,62 e a contribuição (C₁) em 226,94. Com o semivariograma teórico foram calculados os pesos da Krigagem os quais foram utilizados na predição espacial da variável resposta EI₃₀ que, por sua vez gerou o mapa de erosividade anual (**Figura 3**).

É possível observar no mapa de erosividade a correlação positiva desta variável com a altitude, de modo que os maiores valores de EI_{30} encontram-se próximos à Serra da Mantiqueira. Interessante notar que o máximo da erosividade não corresponde exatamente com as maiores altitudes, fato que pode ser explicado por efeitos climáticos globais de movimentação das massas de ar e de precipitação.

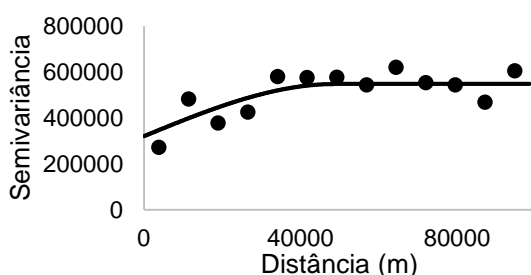


Figura 2 – Semivariograma experimental (pontos) e modelo esférico ajustado para o cálculo das semivariâncias.

Outra possibilidade para essa não coincidência entre os valores extremos de EI_{30} e altitude, é a falta de informação nas áreas mais declivosas da bacia, especialmente nas cabeceiras dos rios Jaguarí e Camanducaia. Existem poucas estações pluviométricas nesta área da bacia, e grande parte apresenta uma série histórica pequena, de poucos anos, e com muitas falhas e inconsistências. Deste modo, a predição nesta região da bacia apresenta os maiores desvios (erros) médios.

Ainda assim, a predição obtida de maneira espacialmente distribuída pela Krigagem aqui desenvolvida apresenta-se como uma boa técnica para melhorar a modelagem da erosão hídrica, no caso dos modelos derivados da equação universal de perdas de solos (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978).

CONCLUSÕES

O efeito orográfico é a principal fonte de variação na precipitação total anual e, por conseguinte na erosividade.

A região da serra da Mantiqueira é a mais suscetível à erosão hídrica quanto à erosividade.

O modelo esférico é o que melhor se ajusta às semivariâncias experimentais observadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG (CAG-APQ 01423-11 e PPM 00422-13) e CNPQ

(471522/2-12-0) pelo financiamento e bolsas e à Secretaria de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Extrema – MG pelo apoio e suporte logístico à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAVOREK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.*, 22:711-728, 2014.

AQUINO, R.F.; SILVA, M.L.N.; FREITAS, D.A.F.; CURTI, N., MELLO, C.R. & AVANZI, J.C. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. *Ciênc. Agrotec.* 36:533-542, 2012.

AQUINO, R. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURTI, N.; MELLO, C. R. & AVANZI, J. C. Erosividade das chuvas e tempo de recorrência para Lavras, Minas Gerais. *Rev. Ceres*, 61:9-16, 2014.

FOSTER, G.R.; McCOOL, D.K.; RENARD, K.G.; MOLDENHAUER, W.C. Conversion of the universal soil loss equation to SI units. *J. Soil Water Conserv.*, 36:355-359, 1981.

JOURNEL, A.G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington: American Geophysical Union, 1989. 40p.

LANDIM, P. M. B. & YAMAMOTO, J. K. Geoestatística conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 245p.

LIMA, G. L.; OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; PEREIRA, P. H. Potencial erosivo da chuva nas bacias dos Rios Camanducaia (MG), Jaguarí (MG) e Piracicaba (SP), regiões de recarga de água do Sistema Cantareira (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., Fortaleza, 2009. Anais. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.

LOMBARDI NETO, F. & MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, 51:189-196, 1992.

RIBEIRO JUNIOR, P.J. & DIGGLE, P.J. GeoR: A package for geostatistical analysis. *R-News*, 1:15-18, 2001. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/doc/Rnews>>. Acesso em: 15 mar. 2015.

SABESP. Sistema Cantareira, plano de contingência II: ações contingenciais e resultados. 2014. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/>>. Acesso em: 13 mai. 2015

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p.

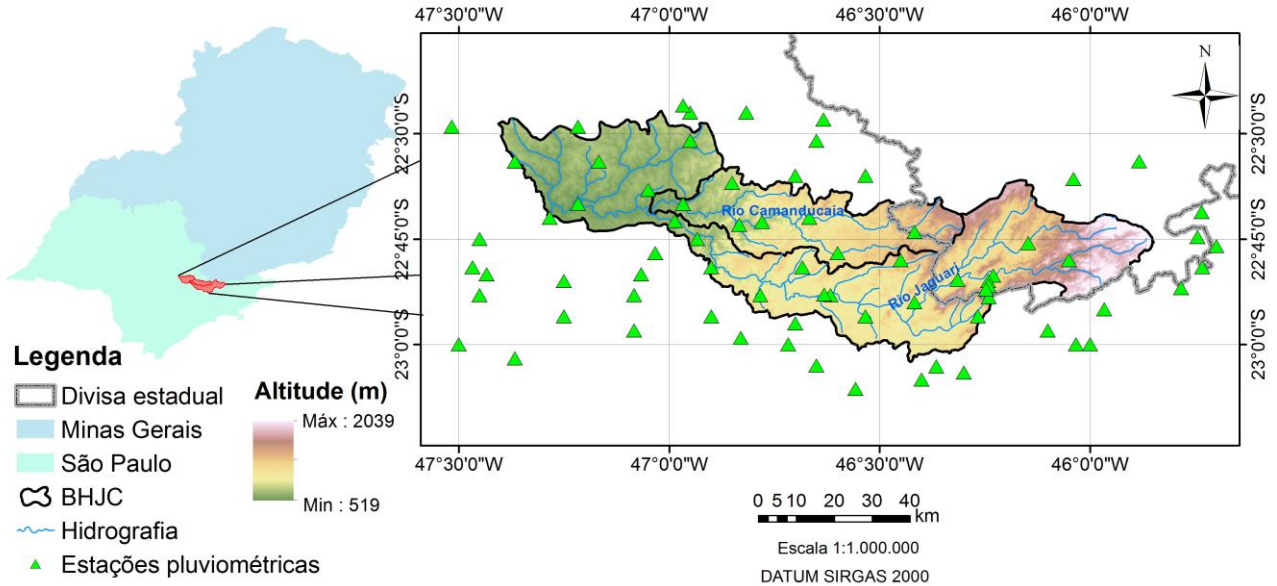


Figura 1 – Localização geográfica da Bacia Hidrográfica dos Rios Jaguarí e Camanducaia e das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

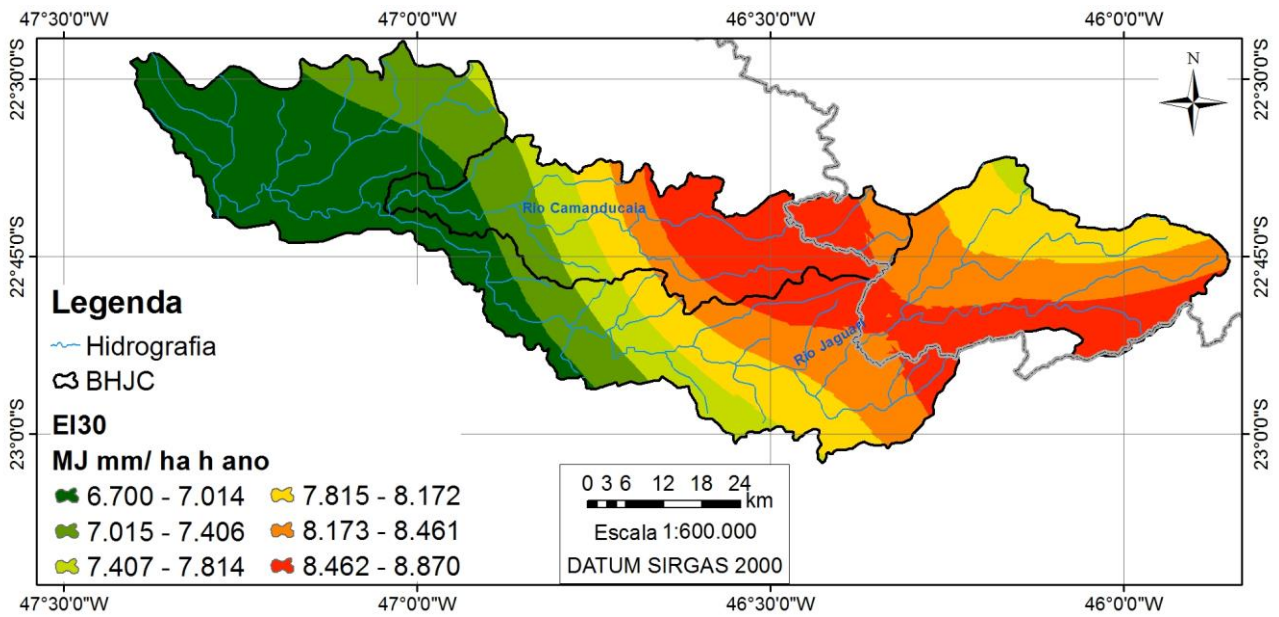


Figura 3 – Mapa de erosividade para a Bacia Hidrográfica dos Rios Jaguarí e Camanducaia.