



**Análise Estatística de Comparação Entre os Modelos de Erosividade da Chuva (Fator R)**  
Comparison of Rain Erosivity Models (Factor R) Using Statistical Analysis

**Edwaldo Henrique Bazana Barbosa; Carlos Nobuyoshi Ide & Fábio Veríssimo Gonçalves**

*Universidade Federal de Mato Grosso do Sul,  
Avenida Costa e Silva, s/n, Bairro Universitário 79070-900, Campo Grande – Mato Grosso do Sul, Brasil  
e-mails: bazana\_barbosa@yahoo.com.br; carlos.ide@ufms.br; fabio.goncalves@ufms.br*

Recebido em: 11/04/2018      Aprovado em: 26/06/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_2\\_133\\_140](http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_133_140)

**Resumo**

A modelagem dos sistemas naturais torna-se necessária para entender o comportamento da paisagem, considerando as potencialidades dos recursos renováveis e as fragilidades dos ambientes naturais. Assim, este trabalho avaliou a aplicação de equações generalizadas e métodos de regionalização, utilizando a análise estatística da erosividade da chuva (Fator R), componente da *USLE*, na bacia hidrográfica do Rio Coxim, inserida na bacia do Alto Taquari, no Estado de Mato Grosso do Sul. Os dados amostrais de diferentes estações meteorológicas foram utilizados para a resolução de duas diferentes equações para o cálculo da erosividade da chuva. Os resultados foram comparados com os resultados de Galdino *et al.* (2004), utilizando análise estatística multivariada. As técnicas de geoprocessamento possibilitaram a espacialização do Fator (R), através do *Inverse Distance Weighting (IDW)*. Os resultados evidenciaram que as aplicações de equações generalizadas superestimam valores e afetam as reais direções de dissipação de energia (escoamento superficial), em uma bacia hidrográfica.

**Palavras – chave:** Análise multivariada; Erosividade da chuva; *Inverse Distance Weighting*

**Abstract**

Comparison of rain erosivity models (Factor R) using statistical analysis. Modeling natural systems contributes to the understanding of the landscape variations, associated to the potential of renewable resources and the natural environments fragilities. The application of generalized equations and regionalization methods were evaluated using statistical analysis of rainfall erosion (Factor R), an *USLE* component, in the Coxim river water basin – Alto Taquari, Mato Grosso do Sul, Brazil. Different meteorological stations data set were used to solve two distinct equations to calculate the rain erosivity. The results were compared to Galdino *et al.* (2004) equation using multivariate statistical analysis. Geoprocessing techniques enabled the specialization of the Factor (R) through *Inverse Distance Weighting (IDW)*. Our findings indicated that the applications of generalized equations overestimate rain erosivity values and affect the real directions of energy dissipation (surface runoff) in a river basin.

**Keywords:** Multivariate analysis; Rain erosivity; *Inverse Distance Weighting*

## 1 Introdução

A estruturação da paisagem consiste no estudo de um mosaico espacial, categorizado por elementos tipológicos dinamizados. A análise da paisagem baseia-se em sua estrutura, função, desenvolvimento e mudança (Sotchava, 1977; Tricart, 1977; Christofolletti, 1999; Lang & Blaschke, 2009). Recentemente, a proposta da teoria Geossistêmica é integrar os sistemas naturais e humanos, visto que sua existência se dá pela relação dialética entre distintos agentes formadores da paisagem (Neves & Salinas, 2017).

As variáveis paisagísticas (clima, relevo, vegetação, arcabouço geológico, usos da terra e tempo) são fragmentadas, de acordo com cada grau de importância e dependência.

Ao apresentar tal quadro teórico-metodológico, a temática clima manifesta mudanças temporais e particularidade espacial, principalmente ao considerar as entradas e saídas de matéria e energia do sistema ambiental. A relação verificada neste arranjo climático e sistêmico é a intensidade pluviométrica.

Ao analisar a paisagem geográfica, torna-se necessária a tradução do mundo real para o ambiente computacional, respeitando-se as representações computacionais do espaço geográfico (Câmara, 1995), estabelecendo um universo ontológico (Câmara, 2005).

Brum *et al.* (2011) conceituam a modelagem ambiental como a abstração do real com algum poder de prever eventos com base em princípios gerais, aliada à modelagem computacional, para delinear as concepções desses princípios na forma de equações matemáticas, passando pela busca de alternativas de solução dessas equações, por meio de técnicas analíticas, utilizando modelos determinísticos e probabilísticos (estocásticos).

Para analisar cada fator da estruturação da paisagem, em bacias hidrográficas, utilizam-se diversas equações generalizadas para obter respostas de fenômenos ambientais, dentre os principais usos destaca-se a aplicação da *Universal Soil Loss Equation (USLE)*. Entre os estudos destacam-se os trabalhos de Didoné *et al.* (2015), Fiorentin *et al.* (2017); Vente *et al.* (2013) e Wu & Chen (2012).

Dentre os componentes da *USLE*, o fator erosividade da chuva (Fator R) é determinado através

do produto da energia cinética total da chuva (E) e a sua intensidade máxima em 30min, a capacidade em provocar erosão, na paisagem (Wischmeier & Smith, 1978).

A área utilizada para este estudo foi a Bacia Hidrográfica do Rio Coxim (BHRC), com 15.592,32km<sup>2</sup> de extensão, inserida na Bacia do Alto Taquari, no Estado de Mato Grosso do Sul. Os municípios que integram a BHRC são Alcinoópolis, Camapuã, Costa Rica, Coxim, Figueirão, Rio Verde de Mato Grosso e São Gabriel do Oeste.

A equação do índice de erosividade desenvolvida por Lombardi Neto & Moldenhauer (1992) foi aplicada por Galdino *et al.* (2004) na Bacia do Alto Taquari e os estudos de Amaral *et al.* (2012) e Zaroni *et al.* (2011) foram executados em municípios inseridos na bacia. Paralelamente, Oliveira *et al.* (2011) elaboraram uma regionalização para o município de Coxim-MS. Ambos os estudos adotaram o coeficiente de chuva de Fournier (1960), modificado por Lombardi Neto (1977).

A hipótese considerada para a realização desta pesquisa é que a BHRC é a maior produtora de sedimentos para o Rio Taquari. Assim, Silva (2003), observou em seu estudo que há uma superestimava da produção de sedimentos nos municípios que integram a BHRC.

A priori, o estudo apresentado utilizou apenas o fator índice de erosividade da chuva, porém a metodologia empregada subsidiará novas análises de validação e apoiará a seleção criteriosa de equações componentes da *USLE*.

Partindo deste pressuposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação de equações generalizadas e métodos de regionalização, através da análise estatística da erosividade da chuva (Fator R), componente da *USLE*, utilizando técnicas de geoprocessamento e validação estatística.

## 2 Materiais e Métodos

O fator erosividade (R) da chuva foi determinado através da aplicação de duas equações, denominados neste trabalho Modelo A e Modelo B.

O Modelo A é expresso pela Equação 1 desenvolvida por Lombardi Neto & Moldenhauer (1992), que por sua vez utilizou registros pluviométricos como médias mensais e anuais de chuva a partir do coeficiente de chuva de Fournier (1960), modificado por Lombardi Neto (1977), conforme a Equação 2.

$$EI = 68,73(Rc)^{0,841} \quad (1)$$

Onde: EI = índice de erosividade;  
Rc = coeficiente de chuva.

$$Rc = \frac{(p)^2}{P} \quad (2)$$

Onde: p = precipitação média mensal;  
P = precipitação média anual.

O Modelo B foi sugerido por Oliveira *et al.* (2011), fruto de uma regionalização, conforme a Equação 3.

$$Ei_{30} = 138,33(Rc)^{0,7341} \quad (3)$$

Onde:  $Ei_{30}$  = índice de erosividade da chuva;  
Rc = coeficiente de chuva.

O coeficiente de chuva, modificado por Lombardi Neto (1977) também foi utilizado para o Modelo B.

Os dados publicados por Galdino *et al.* (2004) foram considerados para fins de comparação com os outros modelos, denominados no decorrer do estudo como Modelo C.

Os modelos A e B foram calculados através dos dados de precipitações mensais (mm) e médias anuais dos períodos de 1969 a 2006, de 6 (seis) diferentes estações meteorológicas, distribuídas na área de influência da BHRC, conforme descritas no Tabela 1.

Os resultados gerados para cada modelo foram comparados com os dados publicados por Galdino *et al.* (2004). Dessa maneira, pretendeu-se verificar o emprego das equações, considerando a escolha das estações pluviométricas, de forma a resultar em alterações nos valores do Fator R.

Os resultados foram dispostos em classes de frequências, com os respectivos valores de média,

Município	Estação Pluviométrica	Localização
Camapuã	Camapuã	19°32'01"S / 54°02'08"W
Coxim	Jauru	18°38'57"S / 54°21'26"W
	Fazenda Carandá	19°18'09"S / 54°10'22"W
Figueirão	Colônia Figueirão	18°40'25"S / 53°38'29"W
Rio Verde de Mato Grosso	Ponte Nova	18°43'27"S / 54°35'56"W
	Rio Verde de Mato Grosso	18°54'36"S / 54°49'56"W

Tabela 1 Estações meteorológicas localizadas na BHRC (EMBRAPA,2016).

desvio padrão, coeficiente de curtose e coeficiente de assimetria (estatística descritiva), para uma comparação direta e visual (com o auxílio do gráfico *boxplot*).

Posteriormente, foi adotado o teste de hipótese para comparação múltipla entre os modelos A, B e C, pautado no coeficiente de correlação (R). Aplicou-se, o teste de *Tukey*, para identificar quais modelos diferem entre si, considerando a hipótese que as amostras seguiram uma distribuição normal, através do teste de *Kolmogorov-Smirnov*.

Os índices de erosividade da chuva, obtidos pelos Modelos A, B e C foram espacializados utilizando o método de interpolação de pontos pela Ponderação do Inverso da Distância (*Inverse Distance Weighting*), conforme a Equação 4, em um Sistema de Informação Geográfica.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{di^p} zi}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{di^p}} \quad (4)$$

Onde:

z = valor interpolado;

n = número de indivíduos observados;

zi = valores atribuídos aos indivíduos observados;

di = distância entre os indivíduos observados e o interpolado (zi e z).

### 3 Resultados e Discussões

A erosividade da chuva representou o potencial da chuva em causar erosão na BHRC. Os dados calculados de erosividade da chuva dos Modelos A e B seguiram uma distribuição normal, a um nível de significância de 95%, segundo o teste de Komolgov-Smirnov.

A Figura 1 apresenta as distribuições de frequências dos valores de EI calculados pelo Modelo A (Lombardi Neto & Moldenhauer, 1992), dos valores de  $EI_{30}$  calculados pelo Modelo B (Oliveira *et al.*, 2011), de pontos pluviométricos localizados na BHRC e dos valores obtidos apresentados no Modelo C (Galdino *et al.*, 2004).

Visando conhecer as respostas dos modelos e seus comportamentos, as distribuições de frequ

ência, coeficiente de curtose e de assimetria foram determinados, e apresentaram distribuições com características distintas, o que sugere diferentes orientações de ação erosiva na área de estudo.

As ações erosivas podem induzir diferentes consequências ao longo do tempo, na paisagem, como por exemplo a retirada de constituintes básicos da formação e desenvolvimento dos solos. Assim, as medidas de dispersão são necessárias para observar o distanciamento das amostradas obtidas pelos modelos.

A distribuição de valores calculados pelo Modelo B apresentou coeficientes de curtose e simetria de, respectivamente, -0,35 e 0,09 mostrando, assim, uma curva de distribuição levemente achatada, simétrica e evidenciando dados igualmente alocados

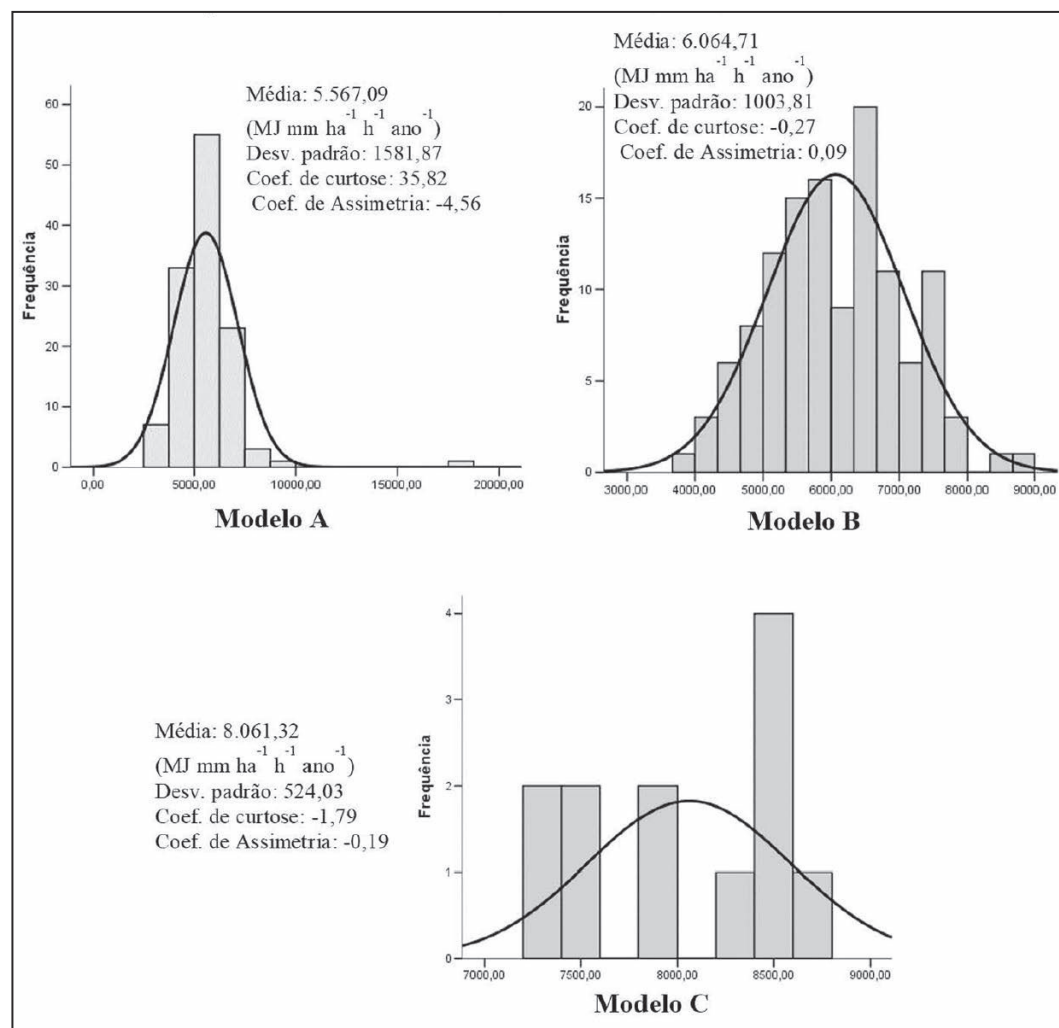


Figura 1 Distribuições de frequências dos valores de erosividade da chuva, calculados pelos modelos A, B e C.

em ambos os lados da média. Ao contrário, os resultados obtidos pelo Modelo A, exibiram um arranjo com características alongadas e com corpo mais fino, enquanto os dados publicados no Modelo C, mostrou-se uma distribuição mais achatada e com leve assimetria negativa para a direita.

Complementando a caracterização da dispersão, o Modelo B, apresentou uma distribuição com a curva de frequência bastante fechada, com os dados fortemente concentrados em torno de seu centro, já o Modelo C, apresentou uma curva de frequência mais aberta, com os dados fracamente concentrados em torno de seu centro. O Modelo A, apresentou uma razoável concentração dos dados em torno de seu centro.

A comparação gráfica (Boxplot) entre as respostas dos modelos permitiu observar a distância entre os dados obtidos. A mediana de cada resposta do modelo se apresentou de maneira característica, bem como as diferenças de quartis e hastes. Assim, nota-se que os resultados do Modelo C apresentaram as maiores diferenças.

A aproximação entre os modelos A e B se deve à utilização dos dados provenientes de seis Estações

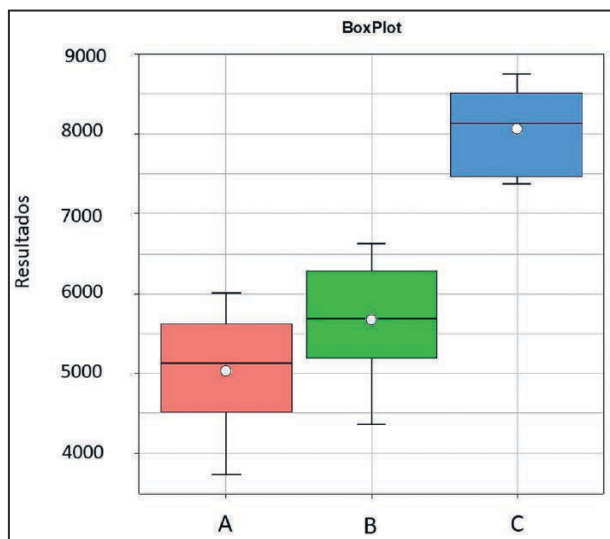


Figura 2 Comparação visual entre os modelos utilizados para o cálculo do Fator R.

Meteorológicas inseridas na bacia hidrográfica e ainda assim, os dados não foram semelhantes. Esperava-se que o Modelo C estaria próximo dos demais modelos, devido a sua inserção na área em questão. No entanto, a erosividade da chuva e a produção de escoamento superficial foi contrária, indicando divergência em diversos pontos amostrais na BHRC.

Para avaliar a igualdade entre as respostas dos modelos de determinação do Fator R, foi realizada análise de variância (ANOVA), pois os dados seguiram distribuição normal.

Ao nível de confiança de 95%, rejeitou-se a hipótese de igualdade entre os grupos, conforme apresentado na Tabela 2, observando-se o teste F e o p-valor menor que o nível de significância de 0,05. Assim, foi comprovado que o fator de erosividade da chuva foi diferente entre os modelos utilizados.

A análise de variância dos resíduos também foi realizada conforme a Figura 3. Os resíduos seguiram uma distribuição normal (segundo o teste de *Anderson-Darling*) a um nível de confiança de 95% e, conforme a plotagem dos resíduos padronizados em função da ordem de coleta, os resíduos confirmam a independência entre si.

Seguindo com o objetivo de avaliar quais os modelos que apresentam diferenças entre si, foi realizada análise multivariada por comparação múltipla adotando-se o teste de *Tukey*, a um nível de confiança de 95%. Conforme os resultados da Tabela 3, confirma-se as diferenças entre os três modelos comparados em pares.

Novamente, os Modelos A e B apresentam valores próximos, mas, estatisticamente não se pode confirmar a hipótese de igualdade. Embora, as equações de tais modelos consideram as mesmas variáveis e utilizaram dados provenientes das mesmas estações meteorológicas seus resultados de erosividade da chuva foram estatisticamente diferentes.

Fonte	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística $F_0$	P-valor
Fator 2		61270297,49	30635148,75	75,7500883	4,64016E-13
Resíduos	33	13345989,84	404423,9344		

Tabela 2 Análise de variância das respostas dos modelos de determinação do Fator R.



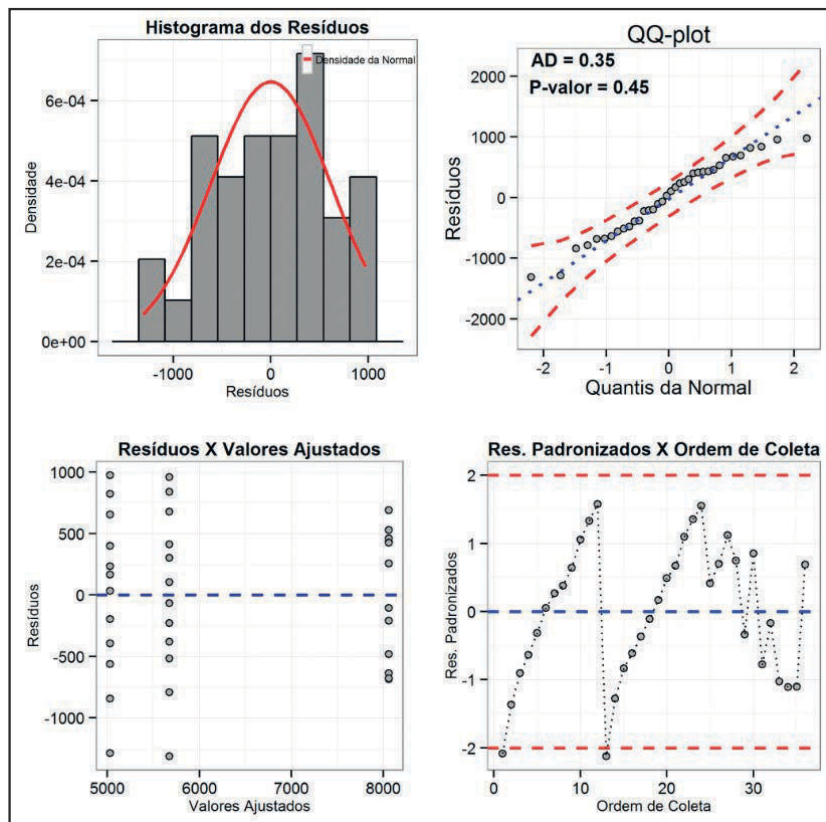


Figura 3 Análise residual dos modelos.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Modelo B e Modelo A	642,1	5,113647581	1279,235568	0,047860393
Modelo C e Modelo A	3032,1	2395,021736	3669,143656	$9,40803 \times 10^{-13}$
Modelo C e Modelo B	2389,9	1752,847128	3026,969048	$3,67924 \times 10^{-10}$

Tabela 3 Comparações múltiplas entre os modelos.

A Figura 4 evidencia os intervalos de confiança, nos quais se confirma a diferença dos modelos apresentados, onde o valor nulo não participa dos intervalos de confiança obtidos.

A observação estatística evidenciou discrepância entre modelos regionalizados e generalizados utilizados em estudos na BHRC.

Ao deparar com os resultados estatísticos observou-se uma tendência similar nos Modelos A e B e uma tendência erosiva contrária no Modelo C. Assim, a necessidade de espacializar as tendências erosivas tornam-se triviais, para observar o comportamento físico do fenômeno, os sentidos e direções erosivas da chuva. A Figura 5 espacializa o fator erosividade da chuva no interior da área estuda.

Os Modelos A e B apresentaram uma tendência de erosividade da chuva nos sentidos Norte-Sul

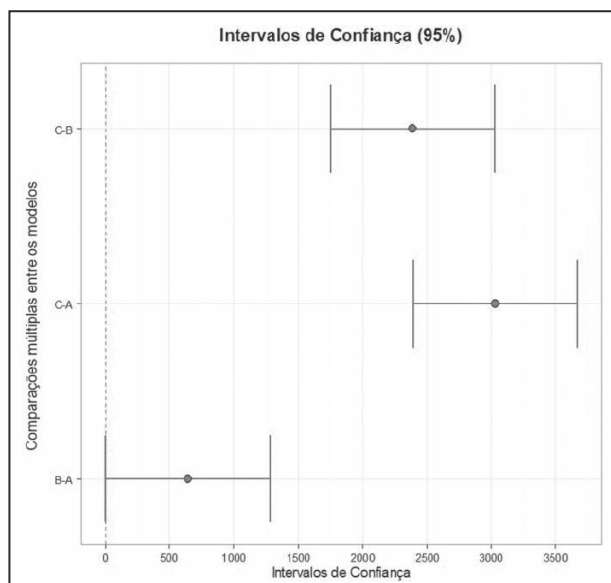


Figura 4 Intervalos de confiança para a média dos diferentes modelos.

Análise Estatística de Comparação Entre os Modelos de Erosividade da Chuva (Fator R)  
 Edwaldo Henrique Bazana Barbosa; Carlos Nobuyoshi Ide & Fábio Veríssimo Gonçalves

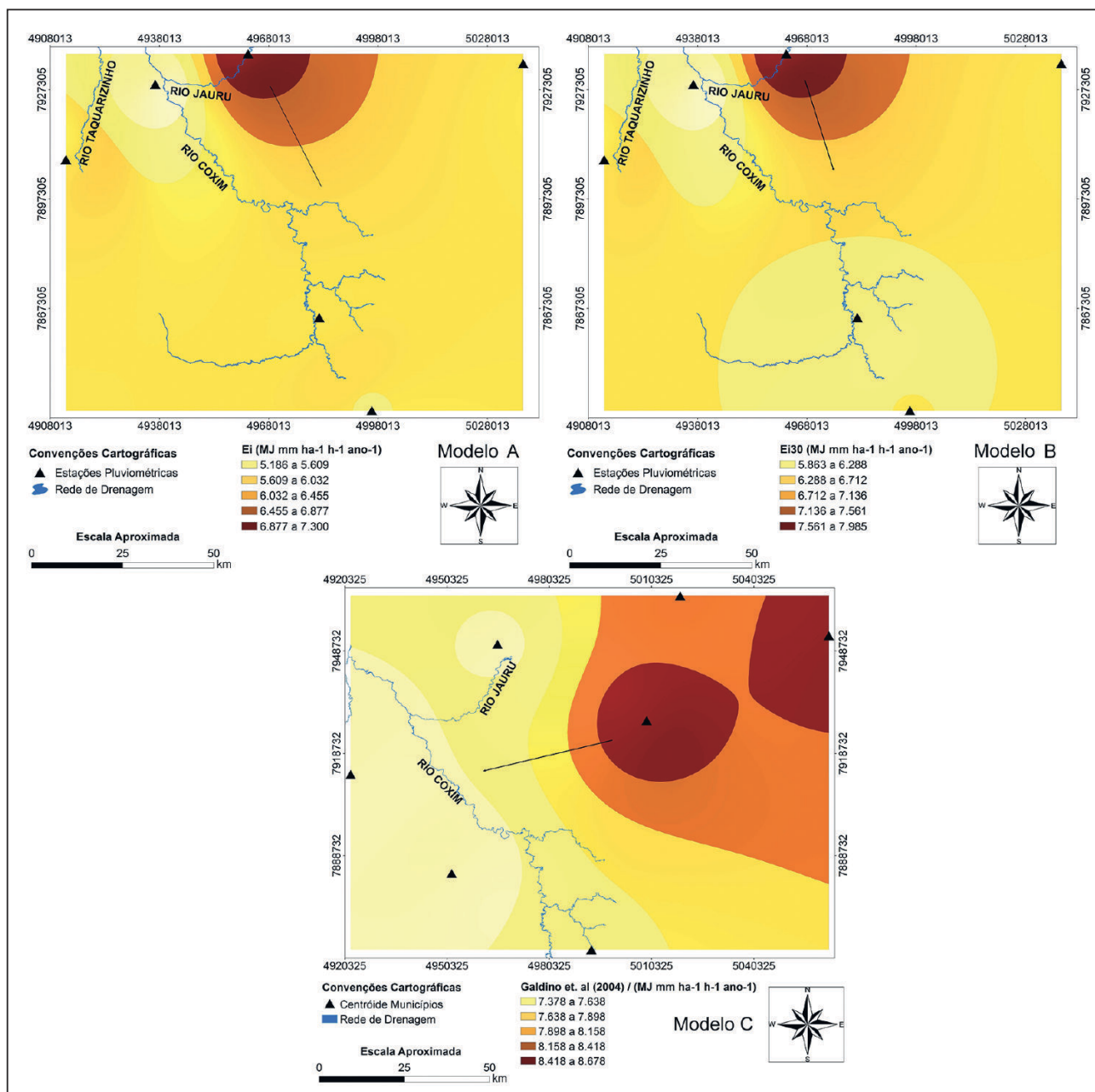


Figura 5 Espacialização do fator erosividade da chuva, conforme os resultados obtidos pelos Modelos A, B e C.

e Noroeste-Sudeste, afetando o médio e baixo curso do Rio Jauru e demais afluentes do Rio Coxim. Ao contrário, o Modelo C apresentou uma tendência elevada de escoamento superficial no sentido Leste-Oeste com tendência direcional para o baixo curso do Rio Coxim e demais afluentes. Assim, comprova-se que o uso de equações generalizadas pode contrariar os sentidos de escoamento superficial e a erosividade na paisagem.

Para a BHRC recomenda-se adotar o Modelo B desenvolvido por Oliveira *et al.* (2011). Os resultados conferiram uma curva de distribuição levemente achatada e dados igualmente distribuídos em ambos os lados da média. Isto se deu em função da regionalização desenvolvida por Oliveira *et al.* (op. cit), por interpolação por krigagem ordinária visando observar a variabilidade espacial da erosividade

das chuvas e a possibilidade de regionalização dos modelos de erosividade da chuva, com o uso dados de estações pluviométricas inseridas na própria bacia hidrográfica.

#### 4 Considerações Finais

Na BHRC, os valores de intensidade média pluviométrica anual não produzem, necessariamente, valores elevados de erosividade da chuva, fato este, caracterizado pelas concentrações de chuvas no período definido como chuvoso, na área de influência da bacia hidrográfica.

A regionalização de variáveis ambientais deve ser a etapa principal e fundamental para qualquer início de trabalho em bacias hidrográficas, considerando os fatores e particularidades ambientais presentes em cada unidade de paisagem.

Nota-se a fragilidade dos modelos generalizados quanto às suas aplicabilidades tornando fundamental o levantamento de informações em campo, para a devida calibração e validação das equações modificadas.

Obtêm-se da comparação, dois fatores: a) o modelo deve ser calibrado com dados da própria bacia hidrográfica a ser analisada; b) a obtenção de valores do fator erosividade baseada simplesmente em médias de intensidades de chuva não convergem às respostas do modelo regionalizado e nem à modelagem ambiental da área.

O estudo e a adoção da metodologia baseada em procedimentos estatísticos demonstraram que modelos generalizados não convergem às mesmas respostas, possibilitando “n” respostas para o mesmo fenômeno e, conseqüentemente, distorcendo as conclusões e resultados da dissipação do fenômeno analisado.

#### 5 Referências

- Amaral, F.C.S.; Chagas, C.S.; Bhering, S.B.; Carvalho Filho, A.; Motta, P.E.F.; Gonçalves, A.O.; Pereira, N.R.; Carvahô Júnior, W.; Zaroni, M.J.; Dart, R.O.; Áglio, M.L.D.; Takagi, J.S. & Lopes, C.H.L. 2012. *Zoneamento agroecológico do município de Coxim – MS*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa Solos. Dados eletrônicos. Rio de Janeiro, 65p.
- Brum, R.S.; Neves, C.S.; Kirinus, E.P.; Santos, R. & Emmendorfer, L.R. 2011. *Modelagem ambiental: Perspectivas e contribuições*. *Revista Júnior de iniciação científica em ciências exatas e engenharia – ICCEEg*, 1(3): 15-20.
- Câmara, G. 1995. *Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Tese de doutorado, 227p.
- Câmara, G. 2005. Representação computacional de dados geográficos. In: Silva, J da et al. (ed.). *Bancos de dados geográficos*. Editora EspaçoGEO, p. 11-52.
- Christofolletti, A. 1999. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo, Edgard Blücher. 256p.
- Didoné, E.J.; Minella, J.P.G & Merten, G.H. 2015. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation. *J Soils Sediments*, 15: 2334 – 2346.
- Embrapa. 2016. *Guia Clima*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: Embrapa Agropecuária Oeste. Disponível em: <http://www.cpao.embrapa.br/clima/>. Acesso em: 2016 mar.
- Fiorentin, A.M.X.; Miranda, R.B.; Vitti, D.M.C.; Scarpinella, G.D’A & Mauad, F.F. 2017. Spatial distribution of areas susceptible to sheet erosion in computing environment. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 28(3): 414 – 429.
- Fournier, R. 1960. *Climate e erosion*. Paris: Press Universitaires de France. 201 p.
- Galdino, S.; Vieira, L.M.; Padovani, C.R. & Soriano, B.M.A. 2004. Erosão Potencial Laminar Hídrica na Bacia do Alto Taquari. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 9 (2): 125 – 133.
- Lang, S & Blasche, T. 2009. *Análise da Paisagem com SIG*. Tradução: Hermann Kux. São Paulo, Oficina de Textos. 424p.
- Lombardi Neto, F. & Moldenhauer, W.C. 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, 51: 189 – 196.
- Lombardi Neto, F. 1977. *Rainfall erosivity - its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brazil*. Purdue University, West Lafayette, Dissertation (Master of science), 53 p.
- Neves, C.E & Salinas, E. 2017. A Paisagem na Geografia Física Integrada: Impressões Iniciais Sobre sua Pesquisa no Brasil entre 2006 e 2016. *Revista do Departamento de Geografia, Volume Especial – Eixo 6*: 124 – 137.
- Oliveira, P.T.S.; Rodrigues, D.B.B.; Sobrinho, T.A.; Carvalho, D.F. & Panachuki, E. 2012. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Eng. Agric.*, 32(1): 69 – 79.
- Silva, J.S.V. 2003. *Análise multivariada em zoneamento para planejamento ambiental; estudo de caso: bacia hidrográfica do alto Rio Taquari MS/MT*. Universidade Estadual de Campinas, Tese de doutorado, 298p.
- Sochava, V.B. 1997. O estudo de geossistemas. *Métodos em questão - IGUSP*: 51.
- Tricart, J. 1977. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro, IBGE. 91p.
- Vente, J.; Poesen, J.; Verstraeten, G.; Govers, G.; Vanmaercke, M.; Rompaey, A.V.; Arabkhedri, M & Boix-Fayos, C. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand?. *Earth-Science Reviews*, 127: 16 – 29.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 537. 58p.
- WU, Y. & CHEN, J. 2012. Modeling of soil erosion and sediment transport in the East River Basin in southern China. *Science of the Total Environment*, 441: 159 – 168.
- Zaroni, M.J.; Pereira, N.R.; Chagas, C.S.; Bhering, S.B.; Carvalho Júnior, W.; Amaral, F.C. S.; Gonçalves, A.O.; Dart, R.O.; Áglio, M.L.D.; Amorin, A.M & Lopes, C.H.L. 2011. *Zoneamento agroecológico do município de Rio Verde de Mato Grosso – MS*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa Solos. Dados eletrônicos. Rio de Janeiro: 65p.