

Estimativa da Erosividade nas Bacias Hidrográficas dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu



ISSN 1678-0892

Dezembro, 2012

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 205

Estimativa da Erosividade nas Bacias Hidrográficas dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo

Dayse Thompson

Evaldo de Paiva Lima

Alexandre Ortega Gonçalves

Azeneth Eufrausino Schuler

Isabelle Cristine Miranda Laureano

Rio de Janeiro, RJ
2012

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024. Jardim Botânico. Rio de Janeiro, RJ
CEP: 22460-000
Fone: (021) 2179 4500
Fax: (021) 2274 5291
Home page: www.cnps.embrapa.br
E-mail (sac): sac@cnps.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Daniel Vidal Pérez

Secretário-Executivo: Jacqueline Silva Rezende Mattos

Membros: Ademar Barros da Silva, Cláudia Regina Delaia, Maurício Rizzato Coelho, Elaine Cristina Cardoso Fidalgo, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Ana Paula Dias Turetta, Fabiano de Carvalho Balieiro, Quitéria Sônia Cordeiro dos Santos.

Supervisão editorial: Jacqueline Silva Rezende Mattos

Revisão de texto: André Luiz da Silva Lopes

Normalização bibliográfica: Ricardo Arcanjo de Lima

Foto da capa: Alexandre Ortega Gonçalves

Editoração eletrônica: Felipe Ferreira Lisboa Luz

Jacqueline Silva Rezende Mattos

2ª edição

E-book (2012)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**Embrapa Solos**

F449e Fidalgo, Elaine Cristina Cardoso.

Estimativa da erosividade nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu / Elaine Cristina Cardoso Fidalgo ... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2012.

35 p. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892 ; 205).

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: < <http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes> >.

Título da página da Web (acesso em 21 dez. 2012).

1. Erosão. 2. Índice de erosividade. 3. Interpolação espacial. I. Thompson. Dayse. II. Lima, Evaldo de Paiva. III. Gonçalves, Alexandre Ortega. IV. Schuler, Azeneth EufRASINO. V. Laureano, Isabelle Cristine Miranda. VI. Título. VII. Série.

CDD (21.ed.) 631.45

© Embrapa 2012

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material e Métodos	11
Caracterização da área de estudo	11
Seleção das estações e cálculo da precipitação pluvial média mensal e anual	12
Cálculo de Erosividade	14
Espacialização dos índices de erosividade EI_{30} e $KE > 25$	17
Resultados e Discussão	18
Precipitação pluvial média mensal e total anual em cada estação meteorológica	18
Erosividade mensal em cada estação meteorológica	22
Validação cruzada	27
Espacialização dos índices de erosividade	29
Conclusões	34
Agradecimentos	34
Referências	34

Estimativa da Erosividade nas Bacias Hidrográficas dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo¹

Dayse Thompson²

Evaldo de Paiva Lima¹

Alexandre Ortega Gonçalves¹

Azeneth Eufrausino Schuler¹

Isabelle Cristine Miranda Laureano³

Resumo

As perdas de solos ocasionadas por eventos de chuvas não dependem somente da resistência que o solo oferece ao impacto das gotas, mas também da energia cinética da chuva e da intensidade e duração. A influência desses fatores na capacidade da chuva em causar erosão é estimada através de índices de erosividade, sendo mais utilizados dois índices na literatura: EI_{30} e $KE > 25$. O presente trabalho teve como objetivo estimar os índices de erosividade com base nos dados pluviométricos de 19 estações e mostrar as distribuições espaciais dos mesmos nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu. Os resultados mostraram que os dois índices apresentaram padrão similar em termos de valores relativos e de distribuição na área de estudo. Os índices apresentaram maiores valores mensais no período de novembro a março que corresponde ao verão, quando é característico ocorrerem chuvas de maiores intensidades, devido ao aumento da temperatura e das movimentações de massas de ar. Ao contrário, os menores valores foram observados nos meses de junho a agosto, período no qual ocorrem chuvas com menores intensidades.

Palavras-chave: erosão, índices de erosividade, interpolação espacial.

¹ Pesquisador Embrapa Solos. E-mail: elaine.fidalgo@embrapa.br; evaldo.lima@embrapa.br; alexandre.ortega@embrapa.br; azeneth.schuler@embrapa.br.

² Graduanda em Geografia pela UFRJ. E-mail: daysethompson20@gmail.com.

³ Graduanda em Ciências Contábeis pela UFRJ. E-mail: isabellemiranda_21@yahoo.com.br.

Estimation of erosivity in watersheds of Guapi-Macacu and Caceribu rivers

Abstract

Soil losses caused by rainfall events depend not only on the soil's resistance to drop impact, but also to the rain kinetic energy, its intensity and duration. The influence of these factors on the capacity of rainfall to cause erosion is estimated by the erosivity index — the two most used indexes are EI_{30} and $KE > 25$. This study aims to estimate the erosivity indexes based on the rainfall data of 19 stations and to present the spatial distribution on the watersheds of the Guapi-Macacu and Caceribu rivers. The results showed that, both indexes have a similar behavior in terms of relative values and their distribution in the study area. The monthly indexes showed higher values in the summer, from November to March, when higher temperatures and the movement of air masses cause heavier rainfall. On the other hand, the lowest values were observed from June to August, when rainfall is not as heavy.

Key words: erosion, erosivity indexes, spatial interpolation.

Introdução

A erosão do solo é um processo de duas fases que consiste na desagregação de partículas individuais do solo e seu transporte por agentes erosivos como a água e o vento. Uma terceira fase se inicia quando não há energia suficiente para o transporte das partículas e ocorre a deposição (MORGAN, 2005). De acordo com Guerra (1999), no momento em que o solo é atingido por gotas de chuva, começa a ocorrer a erosão do tipo salpicamento, o qual se refere ao estágio inicial do processo erosivo e, a partir desse estágio, as partículas desestruturadas do solo estão prontas para serem transportadas por escoamento superficial. Nesse contexto, as perdas de solos ocasionadas pelas chuvas dependerão, não só da própria resistência do solo ao impacto das gotas, como também da energia cinética da chuva, sua intensidade e duração.

A energia disponível para causar erosão se apresenta sob duas formas: potencial e cinética. A energia potencial resulta da diferença de altura de um corpo em relação a outro. Ela é o produto obtido entre massa, diferença de altura e aceleração da gravidade. A energia potencial é convertida em energia cinética, responsável pelo movimento, sendo esta última proporcional à massa e à velocidade do agente erosivo (MORGAN, 2005). A energia atua, portanto, na desagregação de partículas e em seu transporte. A intensidade é a quantidade de chuva que atinge a superfície por unidade de tempo. Quanto maior a intensidade, maior a perda de solo por erosão. Dados obtidos por Suarez Castro (1956), citado por Bertoni e Lombardi Neto (1985), mostram que para uma mesma chuva com o total de 21 mm, uma intensidade de $7,9 \text{ mm h}^{-1}$ produziu uma perda de solo cem vezes maior que uma intensidade de 1 mm h^{-1} . Por outro lado, o fator duração é tido como complemento da intensidade que, combinados, determinam a chuva total. Estudos sobre erosão realizados na Inglaterra por Morgan et al. (1986) mostraram que chuvas de alta intensidade e curta duração produzem erosão similar às chuvas de baixa intensidade e longa duração.

A influência desses fatores na capacidade da chuva em causar erosão é estimada através de índices de erosividade, sendo mais citados dois índices na literatura: EI_{30} e $KE > 25$. O índice de erosividade EI_{30} , proposto por

Wischmeier e Smith (1958), citado por Morgan (2005), relaciona os efeitos do impacto das gotas de chuva, o escoamento superficial e a erosão com a energia cinética (E) e a intensidade máxima de chuva medida em 30 minutos (I_{30}). Neste caso, a erosividade da chuva é dada pela variável EI_{30} , calculada como o produto de E por I_{30} . Hudson (1973), citado por Morgan (2005), desenvolveu e propôs o uso do índice $KE > 25$, o qual apresentou melhor correlação com a perda de solos em ambientes tropicais. Esse índice de erosividade é calculado pela soma da energia cinética dos segmentos da chuva com intensidade superior a 25 mm h^{-1} .

Na determinação dos índices de erosividade é necessário o emprego de dados pluviográficos de uma série histórica. Porém, quando esses dados são escassos, esses índices podem ser estimados a partir de séries históricas de dados pluviométricos, os quais são mais comumente disponíveis (GONÇALVES et al., 2006). Os índices de erosividade são determinados em relação a cada estação pluviográfica ou pluviométrica que registrou e forneceu os dados de precipitação pluvial para aquele local, sendo, portanto, dados pontuais. Porém, muitas vezes, aplicam-se modelos de interpolação e espacialização desses dados pontuais para obter resultados espacializados em formato de linhas isoerosivas ou grades de valores de erosividade.

Considerando a importância da análise da capacidade erosiva das chuvas em estudos da vulnerabilidade das terras aos processos erosivos, o presente trabalho teve como principal objetivo estimar os índices de erosividade EI_{30} e $KE > 25$ e apresentar suas distribuições espaciais nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu. O estudo ocorre nessas bacias devido à sua importância para o abastecimento de aproximadamente dois milhões de pessoas. Esse trabalho é parte do Projeto "As transformações na paisagem da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, RJ e sua relação com a vulnerabilidade das terras", financiado com recursos da FAPERJ.

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende as bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu, localizadas na parte leste da baía de Guanabara e nos municípios de Guapimirim, Cachoeiras de Macacu, São Gonçalo, Itaboraí, Tanguá e Rio Bonito, no estado do Rio de Janeiro (Figura 1). A área total é de aproximadamente 2 111 km², sendo 1 284 km² da bacia do Guapi-Macacu e 827 km² do Caceribu. Esses limites são provenientes do Plano de Despoluição da baía de Guanabara (ECOLOGUS-AGAR, 2005). A bacia do rio Guapi-Macacu, no presente trabalho, agrega duas áreas de drenagem vizinhas e uma microbacia isolada, do Guarai, e a bacia do Caceribu abrange ainda duas áreas de drenagem vizinhas.

A área envolve das escarpas serranas às planícies costeiras, passando por colinas, maciços e tabuleiros costeiros, envolvendo uma diversidade de ambientes onde ocorrem ecossistemas diversos como florestas, campos de altitude, restingas e mangues. As altitudes máximas são observadas junto às nascentes dos rios e possuem cerca de 2 000 m no rio Guapimirim e 1 700 m no rio Macacu. As colinas e maciços costeiros, situados na área de transição entre as escarpas da serra do Mar e as planícies costeiras, ou ainda, no limite sul da bacia do Caceribu, apresentam relevo menos acidentado, tendo as colinas formas arredondadas e os maciços altitudes inferiores a 1 000 m.

O clima na região é quente e chuvoso, tipicamente tropical, com médias de chuvas anuais entre 1 200 e 1 600 mm (AMADOR, 1997), sendo do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen. Os meses de verão (dezembro a fevereiro) são muito úmidos com precipitação pluvial mensal de até 350 mm. Entretanto, no período menos chuvoso, que envolve os meses de inverno, este padrão se reverte, quando a precipitação não ultrapassa 90 mm por mês. Observa-se ainda que a precipitação se intensifica das regiões próximas ao ambiente costeiro em direção à serra do Mar, onde os valores são bastante elevados.

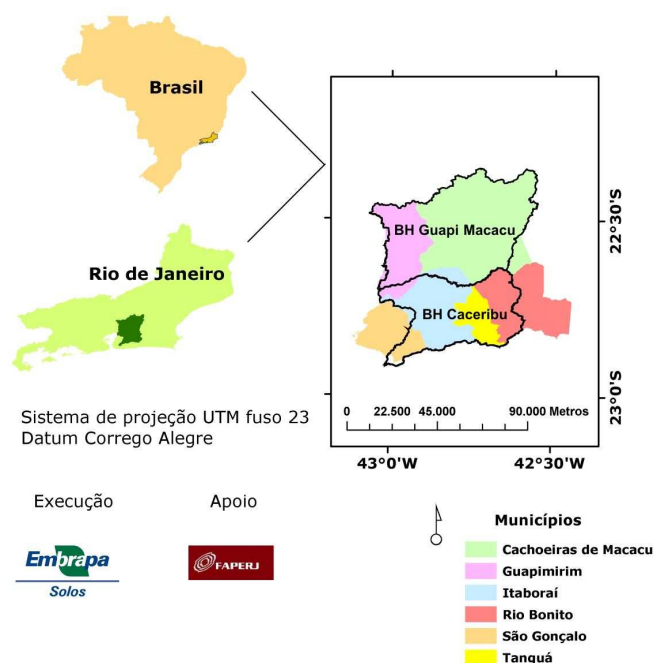


Figura 1. Localização da área de estudo.

Seleção das estações e cálculo da precipitação pluvial média mensal e anual

No cálculo da erosividade foram utilizados dados diários de precipitação de estações, pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), presentes nas bacias hidrográficas dos rios Guapimirim e Macacu (bacia Guapi-Macacu) e Caceribu. Também foram utilizados dados de estações circunvizinhas à área de estudo, que possuíam condições climáticas similares. A Tabela 1 contém as informações referentes às estações utilizadas no estudo; e na Figura 2 observa-se a distribuição espacial dessas estações.

Não foram utilizados dados de estações localizadas ao norte da bacia do Guapi-Macacu por causa da presença da serra do Mar. Essa serra, por apresentar altitudes elevadas, age como uma barreira à movimentação das massas de ar, que influencia de forma diferenciada no regime de chuvas das

regiões adjacentes à bacia do Guapi-Macacu.

Como critério de seleção, considerou-se a disponibilidade de dados em períodos comuns e o tamanho da série. Dessa forma, selecionaram-se as estações com registros nos períodos compreendidos de 1977 a 1994 e 1995 a 2005 (Tabela 1). Os intervalos dos períodos analisados atendem à proposta de Wischmeier e Smith (1978), citados por Gonçalves et al. (2006), que é de 10 a 20 anos de coleta de dados para se obter valores representativos de erosividade. Embora outros autores, citados por Gonçalves et al. (2006), tenham utilizado séries históricas menores devido à dificuldade de obter bases de dados com essas características. Para cada estação e período selecionados foram calculados os valores médios de precipitação pluvial mensal e o total anual.

Tabela 1. Estações selecionadas para os períodos: (1) 1977 a 1994 e (2) 1995 a 2005.

Cód. Estação	Nome Estação	Entidade	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período utilizado
2242010	Manuel Ribeiro	ANA	Maricá	-22°54'24"	-42°43'55"	0	(1) e (2)
2242011	Estação de Bomb. de Imunana	ANA	Magé	-22°40'49"	-42°56'56"	10	(1) e (2)
2242012	Represa do Paraíso	ANA	Magé	-22°29'55"	-42°54'40"	60	(1) e (2)
2242013	Fazenda do Carmo	ANA	Cachoeiras de Macacu	-22°26'17"	-42°46'03"	40	(1) e (2)
2242014	Japuiba	ANA	Cachoeiras de Macacu	-22°33'33"	-42°41'56"	50	(1) e (2)
2242016	Fazenda São Joaquim	ANA	Cachoeiras de Macacu	-22°26'28"	-42°37'19"	275	(1) e (2)
2242090	Japuiba (P-37R)	ANA	Cachoeiras de Macacu	-22°33'41"	-42°41'37"	20	(1)
2242091	Tanguá (P-41R)	ANA	Rio Bonito	-22°42'29"	-42°42'15"	40	(1)
2242092	Apolinário (E-04)	ANA	Cachoeiras de Macacu	-22°22'36"	-42°34'30"	700	(1)
2242093	Quizanga (P-43R)	ANA	Magé	-22°31'13"	-42°49'50"	10	(1)
2242094	Escola União	ANA	Magé	-22°35'03"	-42°56'27"	10	(1)
2242096	Fazenda Sto. Amaro	ANA	Cachoeiras de Macacu	-22°24'39"	-42°43'25"	260	(1)
2242097	Sambaetiba	ANA	Itaboraí	-22°38'22"	-42°48'02"	10	(1)
2242098	Posto Garrafão	ANA	Magé	-22°28'56"	-42°59'46"	640	(1)
2243001	Andorinhas	ANA	Magé	-22°32'00"	-43°03'00"	210	(1)
2243235	Andorinhas-1	ANA	Magé	-22°32'36"	-43°03'37"	60	(1)
2243236	Horto Florestal	ANA	Niterói	-22°52'58"	-43°06'27"	20	(1)
83048	Rio Bonito-RJ	INMET	Rio Bonito	-22°42'00"	-42°37'48"	62	(2)
83089	Maricá-RJ	INMET	Maricá	-22°54'36"	-42°48'36"	04	(2)

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

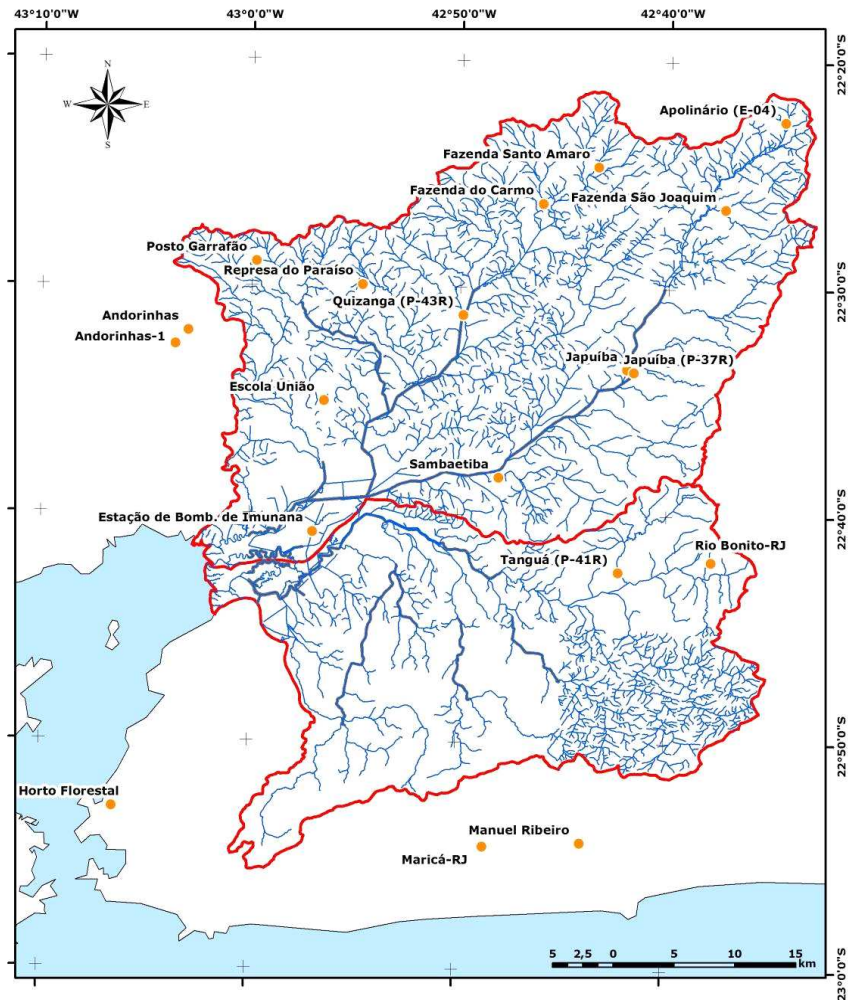


Figura 2. Localização das estações meteorológicas selecionadas.

Cálculo de Erosividade

O cálculo da erosividade em cada estação e período foi realizado empregando as equações ajustadas por Gonçalves et al. (2006) para quatro estações localizadas nas áreas das bacias Guapi-Macacu e Caceribu (Tabelas 2 e 3). Os autores utilizaram dados pluviográficos de 14 estações distribuídas no

Estado para calcular índices de erosividade. Inicialmente calcularam EI_{30} e $KE > 25$ para cada evento de chuva erosiva em cada uma das estações e totalizaram os resultados mensalmente, e assim obtiveram os índices mensais. Em seguida, a partir dos valores calculados mensalmente nas séries históricas, determinaram os valores médios mensais de cada índice. Considerando que a maioria das estações meteorológicas disponibiliza apenas dados pluviométricos diários, os autores ajustaram curvas de regressão para a estimativa da erosividade mensal média utilizando esses dados. Para tal, os valores de erosividade calculados a partir de dados pluviográficos foram correlacionados com a precipitação média mensal e com o coeficiente de chuva, obtidos a partir de dados pluviométricos. Como resultado, Gonçalves et al. (2006) obtiveram as equações de regressão para estimativa da erosividade em cada estação meteorológica.

O coeficiente de chuva, proposto por Lombardi Neto (1977), foi calculado pela seguinte equação:

$$Rc = \frac{p^2}{P} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que,

Rc = coeficiente de chuva (mm);

p = precipitação pluvial mensal média (mm); e

P = precipitação pluvial anual média (mm).

Tabela 2. Estações meteorológicas selecionadas do estudo de Gonçalves et al. (2006), que deram origem às equações de regressão utilizadas neste trabalho.

Cód. Estação	Nome Estação	Entidade	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)
2242013	Fazenda do Carmo	ANA	Cachoeiras de Macacu	-22°26'17"	-42°46'03"	40
2242094	Escola União	ANA	Magé	-22°35'03"	-42°56'27"	10
2242091	Tanguá (P-41R)	ANA	Rio Bonito	-22°42'29"	-42°42'15"	40
2242098	Posto Garrafão	ANA	Magé	-22°28'56"	-42°59'46"	640

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA).

Tabela 3. Equações de regressão para estimativa de EI_{30} ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$) e $KE > 25$ ($MJ\ ha^{-1}$) referente a cada estação meteorológica, por período.

Cód. Estação	Nome Estação	Município	Equação para estimativa EI_{30}	Equação para estimativa $KE > 25$
2242013	Fazenda do Carmo	Cachoeiras de Macacu	$EI_{30} = 37,90 R_c + 39,86$	$KE > 25 = 0,46R_c + 0,23$
2242094	Escola União	Magé	$EI_{30} = 47,68 R_c + 64,59$	$KE > 25 = 0,59R_c + 0,25$
2242091	Tanguá (P-41R)	Rio Bonito	$EI_{30} = 35,13 R_c + 38,48$	$KE > 25 = 0,46R_c - 0,03$
2242098	Posto Garrafão	Magé	$EI_{30} = 46,37 R_c + 146,28$	$KE > 25 = 0,57R_c - 0,03$

Fonte: Gonçalves et al. (2006).

A estimativa da erosividade para as quatro estações citadas anteriormente, aqui denominadas estações de referência, foi obtida aplicando-se as equações propostas aos dados disponíveis. Para as demais estações pluviométricas foi feita a análise da distribuição da precipitação mensal média nas séries históricas correspondentes, visando selecionar a estação de referência que apresentasse padrão similar a cada uma das estações. Para tanto, as estações foram comparadas em pares, sendo sempre uma estação sem equação associada com uma estação de referência. Para cada par de estações foi calculada a somatória do módulo da diferença entre o valor mensal médio da precipitação pluvial (Eq. 2), sendo selecionado aquele que apresentasse o menor resultado da somatória:

$$\sum_{i=1}^{12} |x_j - y_k|_i \quad (\text{Eq. 2})$$

em que,

x_j = precipitação pluvial média mensal da estação em análise ou estação sem equação associada,

y_k = precipitação pluvial média mensal da estação de referência,

i = mês correspondente.

Dessa forma, foram selecionadas as estações com o padrão de chuvas mensal médio similar para aplicação das equações de regressão disponíveis.

Após a seleção da equação de regressão mais adequada aos dados diários

disponíveis das 19 estações selecionadas para a área de estudo foi calculada a precipitação pluviométrica média mensal das séries temporais disponíveis para cada estação (Tabela 1) e, em seguida, o valor do coeficiente de chuva mensal (R_c).

Espacialização dos índices de erosividade EI_{30} e $KE > 25$

Os índices de erosividade mensais foram especializados para análise de sua distribuição, com a utilização do software ARCGIS 10 da ESRI. Para tal, utilizou-se a ferramenta de interpolação espacial pelo inverso da distância ponderada (em inglês *Inverse Distance Weighted*, IDW) do módulo de análise Geoestatística. A escolha desse método baseou-se no seu emprego por outros autores (SILVA, 2004; GONÇALVES et al., 2006) para estimar valores de erosividade.

Para aplicação de IDW, a ponderação pode ser feita pelo inverso da distância elevada a qualquer potência. Neste caso, foram testados dois valores, potência dois e três, cujos resultados foram comparados pelo método de validação cruzada. A validação cruzada permite comparar modelos e analisar a adequação do modelo selecionado para prever valores em locais onde não há dados disponíveis. Para tal, o modelo é aplicado sucessivas vezes, com número de vezes igual ao número de pontos de valor conhecido. A cada rodada do modelo é retirado um ponto de valor conhecido, sendo estimado o valor no local e calculada a raiz quadrada da média dos erros de predição (em inglês, *Root Mean Square Prediction Error*, RMSPE). Neste trabalho, selecionou-se a potência de IDW que minimizou os valores de RMSPE para aplicação do algoritmo de interpolação dos dados.

A aplicação de método de interpolação por krigagem não foi realizada considerando a pequena malha de pontos amostrais disponível face aos resultados obtidos por Montebeller (2005) ao aplicar tal método para espacialização da erosividade no estado do Rio de Janeiro. O autor observou a dependência espacial para a variável erosividade, mas esta dependência estava diretamente relacionada ao grid de amostragem analisado. Considerando os conjuntos amostrais com 36 e 62 valores, o número de amostras não foi suficiente para a obtenção de semivariogramas confiáveis. Com o aumento do número de amostras para 98 valores foi possível obter semivariogramas com maior grau de confiabilidade.

Resultados e Discussão

Precipitação pluvial média mensal e total anual em cada estação meteorológica

Os resultados de precipitação pluvial média mensal e anual para os diferentes períodos analisados (Tabelas 4 e 5, e Figura 3) mostraram a variabilidade desse termo na área das duas bacias hidrográficas. Na Figura 3, observa-se que as estações abaixo da linha tracejada, com exceção de Rio Bonito-RJ, localizada a nordeste da bacia do Caceribu, os valores anuais de precipitação foram inferiores a 1 500 mm. Entretanto, precipitações superiores a 1 500 mm anuais foram observadas ao norte da estação Sambaetiba, principalmente nas estações de altitudes mais elevadas, ou seja, as localizadas nas escarpas da serra do Mar, com totais anuais de até 2 998,7 mm (Posto Garrafão, município de Magé). A presença da serra do Mar, juntamente com a proximidade do ambiente costeiro, podem explicar as precipitações elevadas no norte da bacia do Guapi-Macacu. As precipitações que ocorrem nessa situação são conhecidas como chuva orográfica, que é um tipo de precipitação local que se forma quando uma barreira de relevo, neste caso a serra do Mar, impede a passagem dos ventos marítimos, quase saturados de vapor d'água pela evaporação do mar. Assim, durante a transposição desse obstáculo, os ventos, em ascensão, se resfriam e condensam o vapor de água originando nuvens e chuva a barlavento, isto é, na vertente exposta ao fluxo de ar. Com relação aos dados mensais de precipitação, observa-se na Figura 3 que as estações localizadas, principalmente, ao norte da bacia do Guapi-Macacu apresentam uma diferença marcante entre o período chuvoso (novembro a março) e o menos chuvoso (junho a agosto). Diferentemente das estações localizadas no sul da bacia do Caceribu (Horto Florestal, Maricá-RJ e Manuel Ribeiro), que apresentam um regime mais homogêneo.

Tabela 4. Precipitação pluvial média mensal e anual em milímetros para cada estação analisada no período de 1977 a 1994.

Nome da estação	Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Manuel Ribeiro	Maricá	127,7	98,3	125,7	139,5	101,0	96,0	77,7	59,9	105,1	80,1	128,2	152,3	1291,2
Est. de Bomb. de Imunana	Magé	203,2	153,9	175,8	140,9	80,4	59,0	54,2	52,1	89,9	83,6	140,3	207,2	1440,4
Represa do Paraíso	Magé	381,9	226,3	287,9	206,9	106,4	83,8	85,2	82,2	159,9	183,2	270,5	366,3	2440,5
Fazenda do Carmo	Cachoeira de Macacu	297,6	225,6	227,5	198,4	96,0	67,4	69,9	72,1	134,2	143,0	258,1	316,9	2106,7
Japuiba	Cachoeira de Macacu	238,7	172,1	212,7	162,2	101,4	60,5	61,8	64,2	108,4	114,0	192,5	271,2	1759,7
Fazenda São Joaquim	Cachoeira de Macacu	321,8	216,0	262,2	226,6	143,7	94,2	98,3	103,2	166,2	173,2	281,0	331,4	2417,7
Japuiba (P-37R)	Cachoeira de Macacu	233,9	176,2	204,8	153,6	97,7	57,0	61,7	60,7	100,9	103,5	185,4	260,9	1696,2
Tanguá (P-41R)	Rio Bonito	173,3	151,2	169,2	142,9	84,9	58,3	54,6	46,2	86,4	77,3	137,4	201,6	1383,2
Apolinário (E-04)	Cachoeira de Macacu	384,0	235,3	292,6	263,7	150,3	116,4	121,9	126,3	208,7	215,2	345,9	406,5	2866,8
Quizanga (P-43R)	Magé	284,3	189,5	226,0	175,9	91,6	56,6	67,8	54,3	113,5	120,3	213,3	264,7	1857,8
Escola União	Magé	272,3	210,9	231,6	162,4	94,7	63,5	58,5	57,2	111,3	110,2	180,9	280,7	1834,3
Fazenda Santo Amaro	Cachoeira de Macacu	347,4	268,7	281,4	248,7	127,5	93,2	93,0	98,8	182,8	180,7	326,1	374,6	2622,9
Sambaeitiba	Itaboraí	205,6	170,3	167,5	143,2	87,4	59,2	52,0	48,9	90,1	82,8	151,9	215,5	1474,2
Posto Garraão	Magé	422,0	301,7	372,6	274,4	145,0	96,1	97,3	106,3	208,4	219,3	337,7	418,0	2998,7
Andorinhas	Magé	353,8	270,7	315,2	234,2	121,7	89,4	74,1	72,0	156,3	166,1	251,1	398,1	2502,5
Andorinhas-1	Magé	355,0	279,2	315,1	234,4	114,9	91,5	73,9	73,8	155,9	164,4	249,9	385,3	2493,1
Horto Florestal	Niterói	123,6	105,8	115,8	118,4	74,9	68,8	61,7	52,5	85,9	77,4	100,4	149,8	1134,9

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA).

Tabela 5. Precipitação pluvial média mensal e anual em milímetros para cada estação analisada no período de 1995 e 2005.

Nome da estação	Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Manuel Ribeiro	Maricá	155,2	134,8	133,8	71,2	110,2	83,4	96,5	75,8	122,6	100,5	154,8	182,9	1421,8
Est. Bomb. de Imunana	Magé	244,3	189,9	176,4	68,5	87,3	41,7	56,1	45,0	90,2	91,0	156,3	228,2	1474,9
Represa do Paraíso	Magé	406,2	278,4	276,3	178,7	138,2	76,1	102,0	81,0	176,8	228,8	308,3	428,7	2679,6
Fazenda do Carmo	Cachoeira de Macacu	326,2	222,9	218,5	131,7	90,8	51,6	77,6	64,7	136,3	154,8	272,8	340,8	2088,9
Japuíba	Cachoeira de Macacu	296,9	253,7	193,9	123,5	100,0	44,6	69,8	51,1	104,6	111,7	194,5	329,2	1873,4
Fazenda São Joaquim	Cachoeira de Macacu	378,2	279,8	262,6	176,4	143,4	79,4	105,5	92,9	194,0	152,3	394,4	413,9	2672,9
Rio Bonito-RJ	Rio Bonito	184,9	181,8	207,0	93,9	88,6	38,2	69,3	67,6	99,9	101,1	217,4	203,9	1553,6
Maricá-RJ	Maricá	155,2	118,0	126,6	65,5	110,8	75,2	78,4	81,9	99,9	102,4	147,1	143,8	1304,7

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Deve-se ainda considerar que, durante os meses de novembro a março, é comum o estabelecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que se caracteriza por uma banda de nebulosidade convectiva, estendendo-se em geral desde a Amazônia, numa direção noroeste-sudeste, até o oceano Atlântico (KOUSKY, 1988). Este sistema meteorológico é típico dos meses de verão, quando a convecção tropical mais acentuada contribui para a geração e manutenção do fenômeno (KODAMA, 1992). Além desse sistema, o estado do Rio de Janeiro permanece sob a influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) na maior parte do tempo, mas a situação de estabilidade, ou seja, com condições de céu claro ou com pouca nebulosidade, sobre o estado é interrompida pela chegada de sistemas meteorológicos, tais como: sistemas frontais, ciclones extratropicais, vórtices ciclônicos dos altos níveis de origem subtropical, sistemas convectivos de mesoescala e outros sistemas que promovem a intensificação dos ventos, o aumento da nebulosidade e a ocorrência de precipitação.

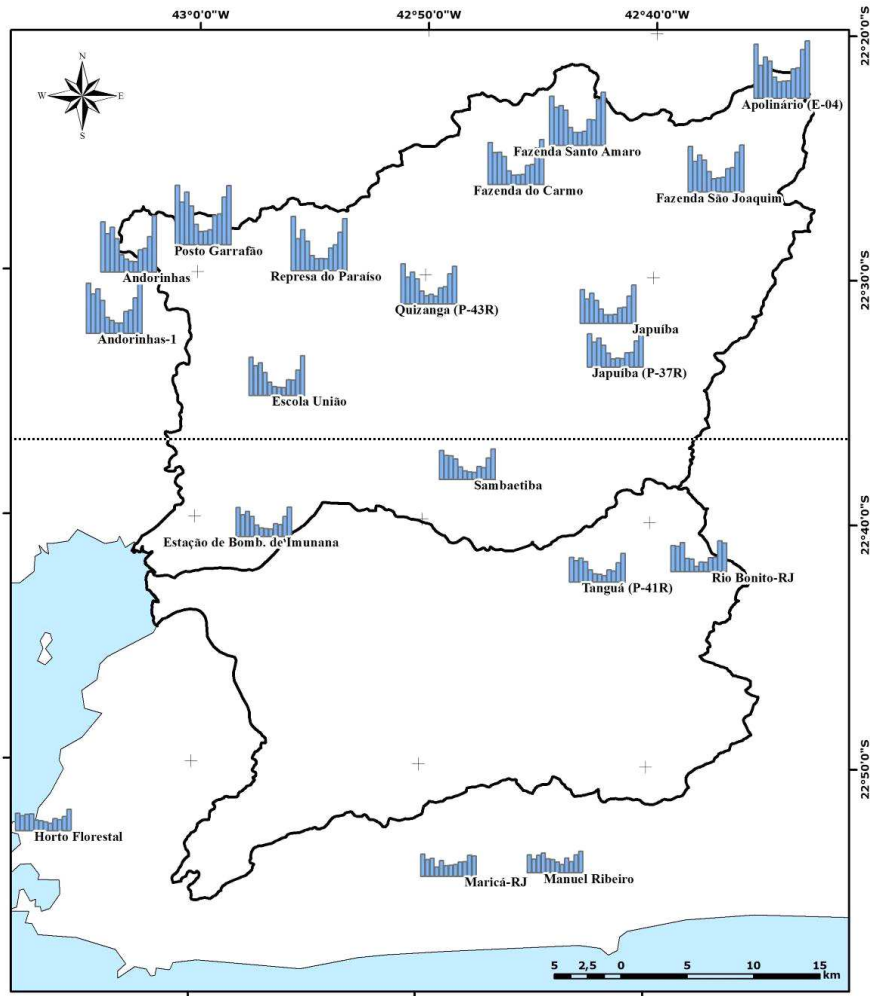


Figura 3. Distribuição da precipitação pluvial, em termos médios, ao longo do ano.

A variação da precipitação pluvial observada nos dois períodos estudados (1977 a 1994 e 1995 a 2005), no caso de duas estações em que havia registros para esses períodos – Fazenda do Carmo e Bombeamento de Imunana, foi pequena quando analisadas as médias anuais (17,8 e 34,5 milímetros, respectivamente). As médias mensais tiveram maior variação, principalmente nos meses de janeiro, fevereiro (somente na estação de Bombeamento de Imunana) e abril. Esses resultados mostraram que podem ocorrer diferenças de precipitação nos distintos períodos, em um mesmo local. Mesmo diante dessa constatação, optou-se por utilizar as equações de regressão criadas e comparar a distribuição de chuvas em períodos distintos devido à ausência de dados que permitissem melhor ajuste e precisão.

Erosividade mensal em cada estação meteorológica

Os resultados de erosividade mensais baseados no EI_{30} para os períodos de 1977 a 1994 e 1995 a 2005 são apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. Observou-se que os maiores valores mensais de erosividade EI_{30} para o período de 1977 a 1994 (Tabela 6) foram encontrados nas estações das escarpas serranas ou próximas a essas, ou seja, na parte norte da bacia hidrográfica do Guapi-Macacu. Como exemplo, observaram-se os valores de 2 818,9 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹ (Apolinário) e 2 671,1 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹ (Fazenda Santo Amaro) em dezembro e de 2 900,5 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹ (Posto Garrafão) em janeiro. Esses valores do EI_{30} , conforme era esperado, concordaram com os maiores valores mensais de precipitação pluvial observados (Tabela 4). O valor médio de precipitação em dezembro foi de 406,5 mm (Apolinário) e 374,6 mm (Fazenda Santo Amaro) e de 422,0 mm em janeiro na estação de Posto Garrafão. Os menores valores de erosividade EI_{30} foram verificados nas estações da área central do estudo, ou seja, ao sul da bacia do Guapi-Macacu (Sambaetiba) e ao norte da bacia do Caceribu (Tanguá P-41R). Nestas estações foram observados, no mês agosto, valores de 95,5 e 92,6 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹, respectivamente. Também se verificou uma relação direta com a precipitação ocorrida no mês de agosto, pois nessas estações foram observados os menores valores anuais desse termo, ou seja, 48,9 mm (Sambaetiba) e 46,2 mm (Tanguá P-41R), conforme pode ser observado na Tabela 4.

No caso do EI_{30} para o período de 1995 a 2005 (Tabela 7), observaram-se os maiores valores em dezembro nas estações de Japuíba (2 822,3 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹), Represa do Paraíso (3 326,4 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹) e Fazenda São Joaquim (3 117,6 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹). No caso das estações de Represa do Paraíso e Fazenda São Joaquim, os valores encontrados de EI_{30} no período de 1995 a 2005 foram superiores aos das demais estações do período de 1977 a 1994. O menor valor de EI_{30} no período de 1995 a 2005, foi observado em junho, na estação de Rio Bonito-RJ (71,5 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹).

Tabela 6. Erosividade EI_{30} (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹) em cada estação estimada com base no período de 1977 a 1994.

Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Fazenda do Carmo													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Magé	Represa do Paraíso	2304,5	834,8	1326,8	704,6	215,7	149,0	152,6	144,9	437,0	561,0	1176,5	2123,7
Cachoeira de Macacu	Fazenda do Carmo	1633,7	955,1	971,2	748,0	205,5	121,7	127,8	133,3	363,9	407,8	1237,9	1847,0
Cachoeira de Macacu	Fazenda São Joaquim	1663,4	771,0	1117,2	844,6	363,4	179,0	191,4	206,9	473,1	510,3	1277,4	1761,2
Magé	Andorinhas	1935,1	1149,9	1544,4	870,2	264,2	160,9	123,0	118,3	409,7	457,6	994,6	2439,7
Magé	Andorinhas-1	1955,5	1224,9	1549,3	874,8	240,6	167,1	123,0	122,6	409,1	450,5	988,8	2296,6
Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Escola União													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Japuíba	2069,7	1216,0	1236,3	955,5	273,0	167,5	175,2	182,1	472,3	527,5	1571,8	2338,0
Cachoeira de Macacu	Japuíba (P-37R)	1608,2	867,1	1290,3	777,7	343,3	163,6	168,0	176,4	382,8	417,0	1068,8	2057,0
Magé	Quizanga (P-43R)	2138,7	986,1	1374,9	858,7	280,0	146,9	182,5	140,3	395,3	436,2	1232,2	1863,2
Magé	Escola União	1992,5	1220,8	1458,8	750,3	297,7	169,5	153,6	149,6	386,5	380,5	915,0	2113,1
Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Tanguá													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Maricá	Manuel Ribeiro	481,8	301,3	468,5	567,5	315,8	289,1	202,5	136,2	338,8	213,0	485,5	669,5
Magé	Est. de Bomb. de Imunana	1045,5	615,8	792,2	522,7	196,0	123,4	110,1	104,7	235,6	209,1	518,4	1085,6
Rio Bonito	Tanguá (P-41R)	801,0	619,3	765,6	557,3	221,5	124,7	114,1	92,6	228,2	190,2	517,8	1071,0
Itaboraí	Sambatiba	1045,7	729,5	706,9	527,3	220,6	121,9	102,9	95,5	231,7	201,7	588,1	1144,7
Niterói	Horto Florestal	511,1	384,8	453,7	472,1	212,0	185,1	156,5	123,9	266,7	223,7	350,6	732,7
Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Garrafão													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Apolinário (E-04)	2531,4	1042,1	1531,4	1270,9	511,6	365,3	386,7	404,2	850,7	895,2	2082,0	2818,9
Cachoeira de Macacu	Fazenda Santo Amaro	2279,6	1422,9	1546,7	1240,1	433,6	299,7	299,3	318,9	736,9	723,3	2025,9	2627,1
Magé	Posto Garrafão	2900,5	1553,9	2293,1	1310,4	471,6	289,0	292,7	320,9	817,9	889,7	1909,3	2847,8

Tabela 7. Erosividade EI_{30} ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ mês^{-1}$) em cada estação estimada com base no período de 1995 a 2005.

Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Fazenda do Carmo													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Fazenda do Carmo	1970,2	941,4	906,3	354,6	189,5	88,2	149,2	115,9	377,1	474,7	1390,4	2147,4
Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Escola União													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Japuiba	2307,5	1702,3	1021,6	452,9	319,1	115,2	188,6	131,0	343,1	381,9	1027,7	2822,3
Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Tanguá													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Maricá	Manuel Ribeiro	687,2	413,6	470,1	154,0	369,2	190,6	203,9	219,2	306,9	320,6	620,9	595,2
Rio Bonito	Rio Bonito-RJ	811,5	786,1	1.007,5	237,7	216,1	71,5	147,1	141,7	263,9	269,7	1.107,6	978,3
Maricá	Maricá-RJ	633,5	487,6	480,8	163,8	338,6	210,5	268,5	180,5	409,9	288,2	630,4	865,0
Magé	Est. Bomb. de Imunana	1.459,8	897,8	779,8	150,3	219,9	79,9	113,4	86,7	232,3	235,8	620,3	1.279,0
Cálculo de EI_{30} utilizando a equação desenvolvida para a estação Garrafão													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Magé	Represa do Paraíso	3001,9	1487,6	1467,8	698,6	477,0	246,4	326,3	259,8	687,4	1052,3	1791,6	3326,4
Cachoeira de Macacu	Fazenda São Joaquim	2628,2	1504,4	1342,8	686,2	503,2	255,7	339,3	296,0	799,0	548,8	2845,3	3117,6

As erosividades mensais estimadas por meio do $KE > 25$ nos períodos de 1977 a 1994 e de 1995 a 2005 são apresentadas nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. Observaram-se os maiores valores de erosividade $KE > 25$ no período de 1977 a 1994 (Tabela 8) nas estações das escarpas serranas ou próximas a essas, ou seja, no norte da bacia hidrográfica do Guapi-Macacu. Como exemplo, observaram-se os valores de $32,8\ MJ\ ha^{-1}\ mês^{-1}$ (Apolinário) e $30,5\ MJ\ ha^{-1}\ mês^{-1}$ (Fazenda Santo Amaro) em dezembro e de $33,8\ MJ\ ha^{-1}\ mês^{-1}$ (Posto Garrafão) em janeiro. Esses valores do $KE > 25$ estão de acordo com os valores mensais elevados de precipitação dos meses em questão (Tabela 4). O menor valor de erosividade $KE > 25$ ($0,7\ MJ\ ha^{-1}\ mês^{-1}$), conforme destacado em negrito, foi verificado em agosto em duas estações da área central do estudo (Sambaetiba e Tanguá P-41R). Verificou-se que esse menor valor do $KE > 25$ teve relação com a precipitação pluvial ocorrida em agosto nessas duas estações.

No caso do $KE > 25$ no período de 1995 a 2005 (Tabela 9), os maiores valores foram observados em dezembro nas estações de Japuiba

(34,4 MJ ha⁻¹ mês⁻¹), Represa do Paraíso (39,1 MJ ha⁻¹ mês⁻¹) e Fazenda São Joaquim (36,5 MJ ha⁻¹ mês⁻¹). No caso das estações de Represa do Paraíso e Fazenda São Joaquim, os valores observados de KE > 25 no período de 1995 a 2005 foram superiores aos das demais estações com leituras no período de 1977 a 1994. O menor valor do KE > 25 ocorreu para o período de 1995 a 2005, em junho, na estação de Rio Bonito-RJ (0,4 MJ ha⁻¹ mês⁻¹).

Tabela 8. Erosividade KE > 25 (MJ ha⁻¹ mês⁻¹) em cada estação estimada com base no período de 1977 a 1994.

Cálculo de KE > 25 utilizando a equação desenvolvida para a estação Fazenda do Carmo													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Magé	Represa do Paraíso	27,7	9,9	15,8	8,3	2,4	1,6	1,6	1,5	5,0	6,6	14,0	25,5
Cachoeira de Macacu	Fazenda do Carmo	19,6	11,3	11,5	8,8	2,2	1,2	1,3	1,4	4,2	4,7	14,8	22,2
Cachoeira de Macacu	Fazenda São Joaquim	19,9	9,1	13,3	10,0	4,2	1,9	2,1	2,3	5,5	5,9	15,3	21,1
Magé	Andorinhas	23,2	13,7	18,5	10,3	3,0	1,7	1,2	1,2	4,7	5,3	11,8	29,4
Magé	Andorinhas-1	23,5	14,6	18,6	10,4	2,7	1,8	1,2	1,2	4,7	5,2	11,7	27,6
Cálculo de KE > 25 utilizando a equação desenvolvida para a estação Escola União													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Japuiba	19,4	10,2	15,4	9,1	3,7	1,5	1,5	1,6	4,2	4,6	12,7	24,9
Cachoeira de Macacu	Japuiba (P-37R)	19,3	11,1	14,8	8,5	3,6	1,4	1,6	1,5	3,8	4,0	12,2	23,9
Magé	Quizanga (P-43R)	25,9	11,7	16,5	10,1	2,9	1,3	1,7	1,2	4,3	4,8	14,7	22,5
Magé	Escola União	24,1	14,6	17,5	8,7	3,1	1,5	1,4	1,3	4,2	4,2	10,8	25,6
Cálculo de KE > 25 utilizando a equação desenvolvida para a estação Tanguá													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Maricá	Manuel Ribeiro	5,8	3,4	5,6	6,9	3,6	3,3	2,1	1,2	3,9	2,3	5,8	8,2
Magé	Est. de Bomb. De Imunana	13,2	7,5	9,8	6,3	2,0	1,1	0,9	0,8	2,6	2,2	6,3	13,7
Rio Bonito	Tanguá (P-41R)	10,0	7,6	9,5	6,8	2,4	1,1	1,0	0,7	2,5	2,0	6,2	13,5
Itaboraí	Sambaetiba	13,2	9,0	8,7	6,4	2,4	1,1	0,8	0,7	2,5	2,1	7,2	14,5
Niterói	Horto Florestal	6,2	4,5	5,4	5,6	2,2	1,9	1,5	1,1	3,0	2,4	4,1	9,1
Cálculo de KE > 25 utilizando a equação desenvolvida para a estação Garrafão													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Apolinário (E-04)	29,3	11,0	17,0	13,8	4,5	2,7	2,9	3,1	8,6	9,2	23,8	32,8
Cachoeira de Macacu	Fazenda Santo Amaro	26,2	15,7	17,2	13,4	3,5	1,9	1,9	2,1	7,2	7,1	23,1	30,5
Magé	Posto Garrafão	33,8	17,3	26,4	14,3	4,0	1,7	1,8	2,1	8,2	9,1	21,6	33,2

Tabela 9. Erosividade $KE > 25$ ($MJ\ ha^{-1}\ mês^{-1}$) em cada estação estimada com base no período de 1995 a 2005.

Cálculo de $KE > 25$ utilizando a equação desenvolvida para a estação Fazenda do Carmo													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Fazenda do Carmo	23,7	11,2	10,7	4,0	2,0	0,8	1,6	1,2	4,3	5,5	16,6	25,8
Cálculo de $KE > 25$ utilizando a equação desenvolvida para a estação Escola União													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cachoeira de Macacu	Japuiba	28,0	20,5	12,1	5,1	3,4	0,9	1,8	1,1	3,7	4,2	12,2	34,4
Cálculo de $KE > 25$ utilizando a equação desenvolvida para a estação Tanguá													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Maricá	Manuel Ribeiro	8,5	4,9	5,6	1,5	4,3	2,0	2,1	2,3	3,5	3,7	7,6	7,3
Rio Bonito	Rio Bonito-RJ	10,1	9,8	12,7	2,6	2,3	0,4	1,4	1,3	2,9	3,0	14,0	12,3
Maricá	Maricá-RJ	7,8	5,9	5,8	1,6	3,9	2,2	3,0	1,8	4,8	3,2	7,7	10,8
Magé	Est. Bomb. de Imunana	18,6	11,2	9,7	1,4	2,3	0,5	1,0	0,6	2,5	2,6	7,6	16,2
Cálculo de $KE > 25$ utilizando a equação desenvolvida para a estação Garrafão													
Município	Nome da estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Magé	Represa do Paraíso	35,1	16,5	16,2	6,8	4,0	1,2	2,2	1,4	6,6	11,1	20,2	39,1
Cachoeira de Macacu	Fazenda São Joaquim	30,5	16,7	14,7	6,6	4,4	1,3	2,3	1,8	8,0	4,9	33,1	36,5

Os resultados obtidos corroboram com os resultados encontrados por Montebeller (2005), mostrando que ambos os índices, quando analisados os valores mensais, apresentaram de modo geral, maiores valores no período de novembro a março que corresponde ao “verão”, onde é característico ocorrerem chuvas de maiores intensidades, devido a maiores temperaturas e movimentações de massas de ar. Ao contrário, os menores valores foram observados nos meses de junho a agosto, período no qual ocorrem chuvas com menores intensidades.

De forma geral, os índices de erosividade EI_{30} e $KE > 25$ apresentaram padrões similares tanto no que se refere aos meses de ocorrência dos valores máximos e mínimos, assim como nas estações de ocorrência desses registros. A principal diferença entre os índices foi a ordem de grandeza dos resultados, que está diretamente relacionada ao princípio teórico de sua formulação. O EI_{30} , por exemplo, representa os efeitos do impacto das gotas de chuva e a turbulência combinados com a capacidade de transporte do

escoamento superficial, sendo resultado do produto da energia cinética da chuva (E) pela sua intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}). Entretanto, o $KE > 25$ é calculado pela soma da energia cinética dos segmentos da chuva com intensidade superior a 25 mm h^{-1} , ressaltando ainda que, neste estudo, os valores apresentados corresponderam à erosividade total mensal, resultado do efeito das chuvas nesse período.

Validação cruzada

Os erros de predição (Tabela 10) ao se aplicar os pesos 2 e 3 para a interpolação do inverso da distância ponderada apresentaram valores mínimos que variaram entre os pesos e os meses analisados. Porém, os menores erros ocorreram com maior frequência para o peso igual a 2, o que justificou a escolha desta potência para se interpolar os índices de erosividade pelo inverso da distância ponderada.

Tabela 10. Erros de predição resultantes da validação cruzada, aplicando-se pesos iguais a 2 e 3 para o cálculo do IDW - resultados para a interpolação do índice de erosividade EI_{30} . Destaque em negrito para os menores valores.

Peso	2	3
Raiz quadrada da média dos erros de predição (RMSPE) - período 1977 a 1994		
Janeiro	620,2	598,6
Fevereiro	337,6	340,7
Março	416,4	411,9
Abril	255,2	263,5
Maió	101,3	107,4
Junho	80,9	87,8
Julho	79,6	86,0
Agosto	86,6	91,6
Setembro	186,4	193,4
Outubro	200,5	198,9
Novembro	487,3	487,7
Dezembro	609,2	601,9
Raiz quadrada da média dos erros de predição (RMSPE) - período 1995 a 2005		
Janeiro	667,1	667,5
Fevereiro	374,6	389,0
Março	276,8	283,6
Abril	211,1	219,2
Maió	149,9	159,1
Junho	91,3	95,5
Julho	106,5	112,5
Agosto	92,1	97,4
Setembro	232,4	241,5
Outubro	277,4	285,3
Novembro	713,2	727,6
Dezembro	844,9	864,0

Tabela 11. Erros de predição resultantes da validação cruzada, aplicando-se pesos iguais a 2 e 3 para o cálculo do IDW - resultados para a interpolação do índice de erosividade $KE > 25$. Destaque em negrito para os menores valores.

Peso	2	3
Raiz quadrada da média dos erros de predição (RMSPE) - período 1977 a 1994		
Janeiro	6,7	6,4
Fevereiro	3,4	3,4
Março	4,6	4,5
Abril	2,4	2,4
Maio	0,7	0,7
Junho	0,6	0,6
Julho	0,4	0,4
Agosto	0,5	0,4
Setembro	1,6	1,6
Outubro	1,9	1,8
Novembro	4,9	4,8
Dezembro	6,7	6,6
Raiz quadrada da média dos erros de predição (RMSPE) - período 1995 a 2005		
Janeiro	7,5	7,4
Fevereiro	4,1	4,3
Março	2,7	2,7
Abril	1,9	2,0
Maio	1,1	1,2
Junho	0,5	0,5
Julho	0,7	0,7
Agosto	0,5	0,5
Setembro	2,1	2,2
Outubro	2,8	2,9
Novembro	8,1	8,2
Dezembro	9,7	9,9

Espacialização dos índices de erosividade

A espacialização dos índices de erosividade mensais foi apresentada para os períodos de 1977 a 1994 (Figuras 4 e 5) e 1995 a 2005 (Figuras 6 e 7). É importante ressaltar que a matriz resultante da interpolação teve seus limites restritos às coordenadas das estações para as quais havia dados pluviométricos disponíveis. Devido a isso, a interpolação nem sempre abrangeu toda a área de estudo, principalmente quando foram utilizados dados do período de 1995 a 2005.

As classes de erosividade foram estabelecidas de forma a manter as amplitudes proporcionais aos valores máximos e mínimos de cada índice de erosividade (EI_{30} e $KE > 25$) nos dois períodos. Observou-se que os resultados em termos da distribuição dessas classes de erosividade nas bacias não diferiram muito, e apresentaram configuração similar. Disto pode-se concluir que os índices de erosividade mensais ao longo das bacias apresentaram padrões similares em termos dos valores relativos, embora, como visto anteriormente, apresentaram diferenças ao serem considerados os valores absolutos.

Analisando os períodos estudados (1977 a 1994 e 1995 a 2005), em todos os meses, os índices de erosividade foram maiores na parte norte da área de estudo. Para janeiro e dezembro, os valores ao norte da área se encontraram nas faixas superiores a $1\ 733\ \text{MJ mm ha}^{-1}\ \text{h}^{-1}\ \text{mês}^{-1}$ para EI_{30} e $20,2\ \text{MJ ha}^{-1}\ \text{mês}^{-1}$ para $KE > 25$. Os menores índices de erosividade foram encontrados na bacia do Caceribu, onde atingiram seus máximos em janeiro e dezembro, em que apresentaram EI_{30} entre 887 e $1\ 732\ \text{MJ mm ha}^{-1}\ \text{h}^{-1}\ \text{mês}^{-1}$ e $KE > 25$ entre $10,2$ e $20,1\ \text{MJ ha}^{-1}\ \text{h}^{-1}\ \text{mês}^{-1}$.

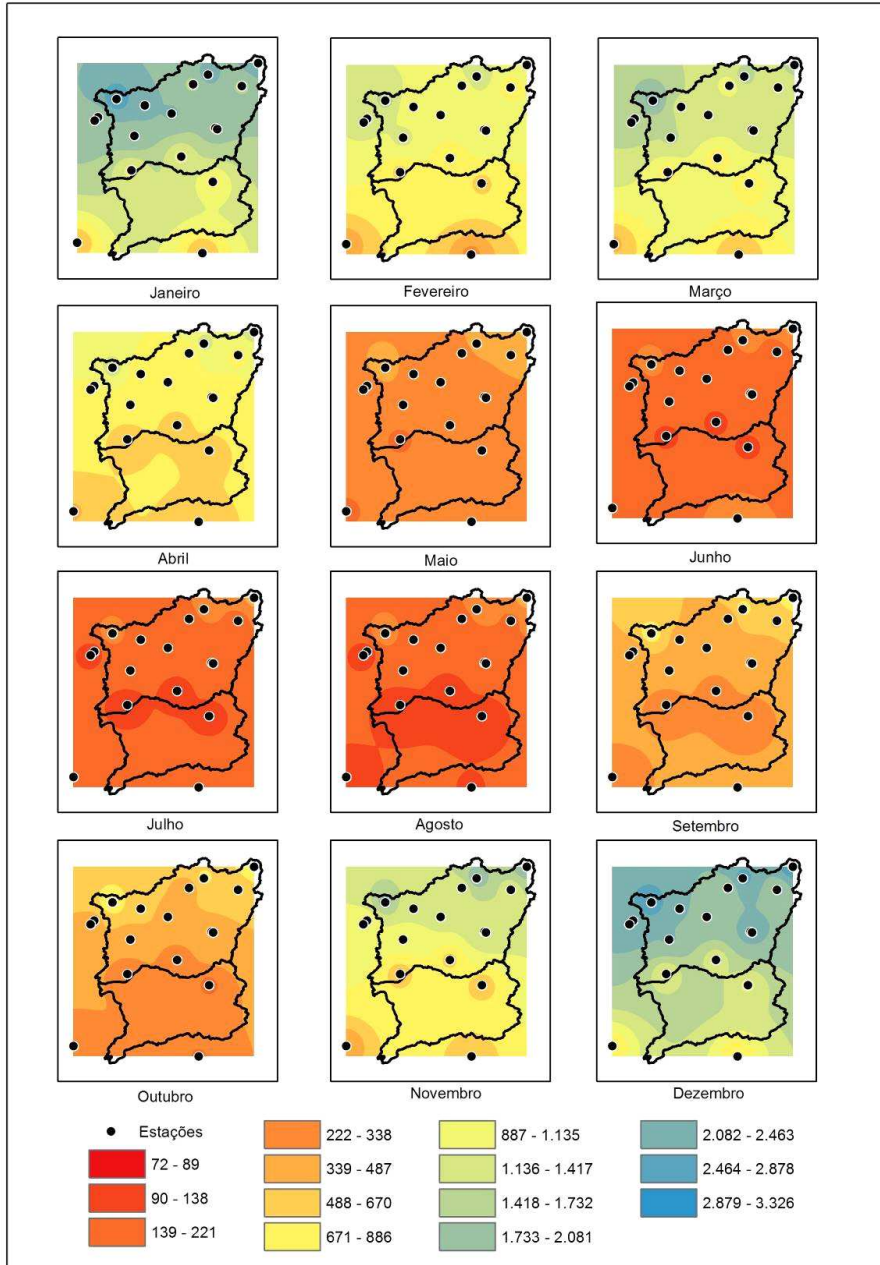


Figura 4. Índices de erosividade mensais EI_{30} ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot m\acute{e}s^{-1}$) no período 1977 a 1994.

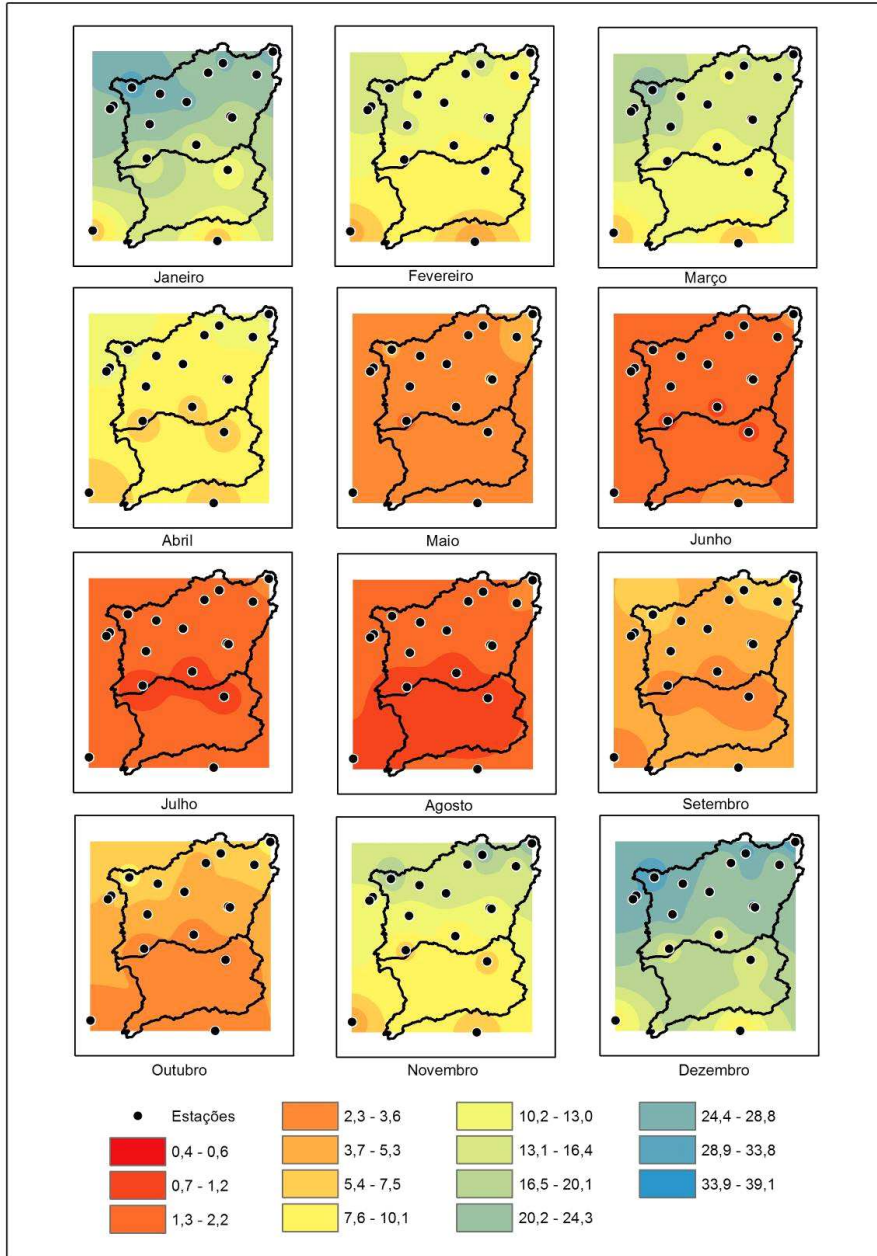


Figura 5. Índices de erosividade mensais $KE > 25$ (MJ.ha⁻¹.mês⁻¹) no período 1977 a 1994.

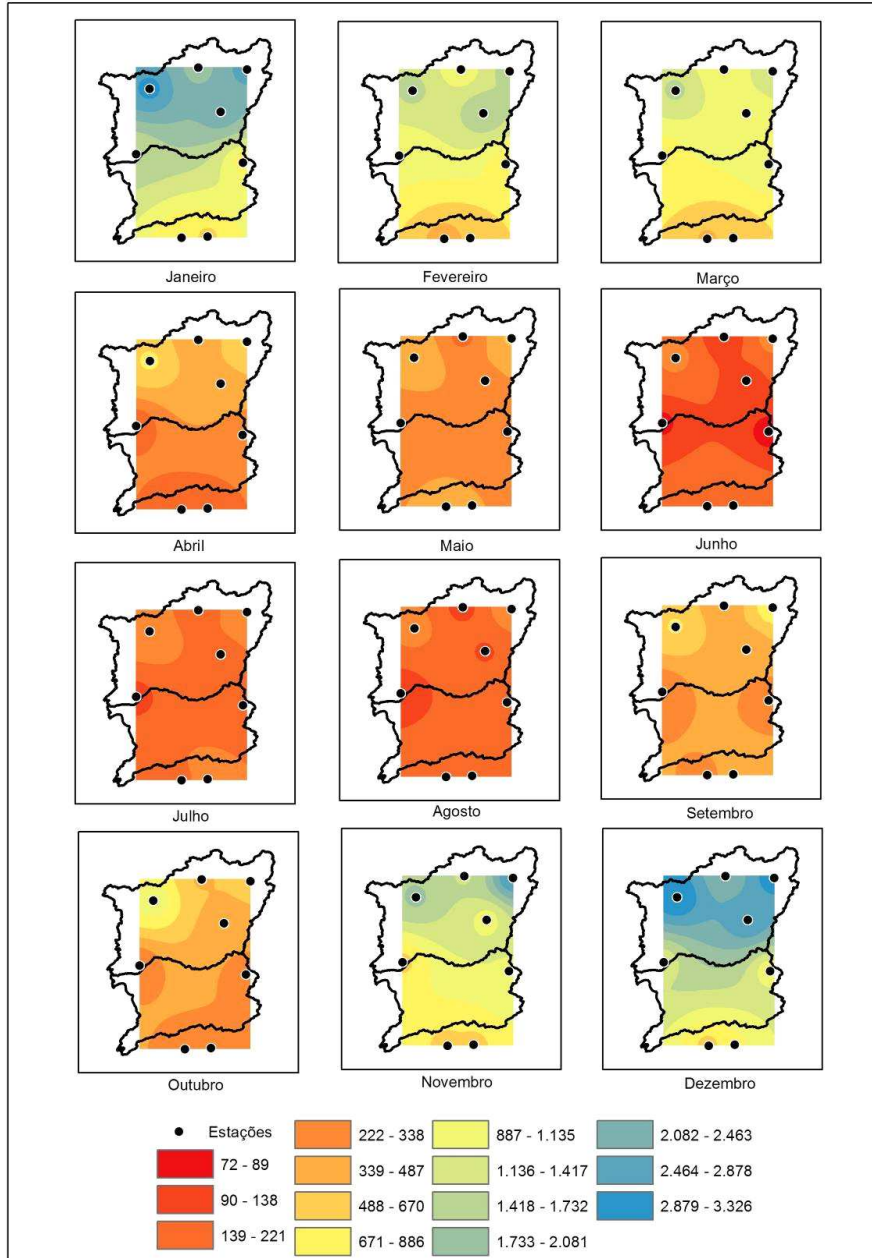


Figura 6. Índices de erosividade mensais EI_{30} ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.mês^{-1}$) no período 1995 a 2005.

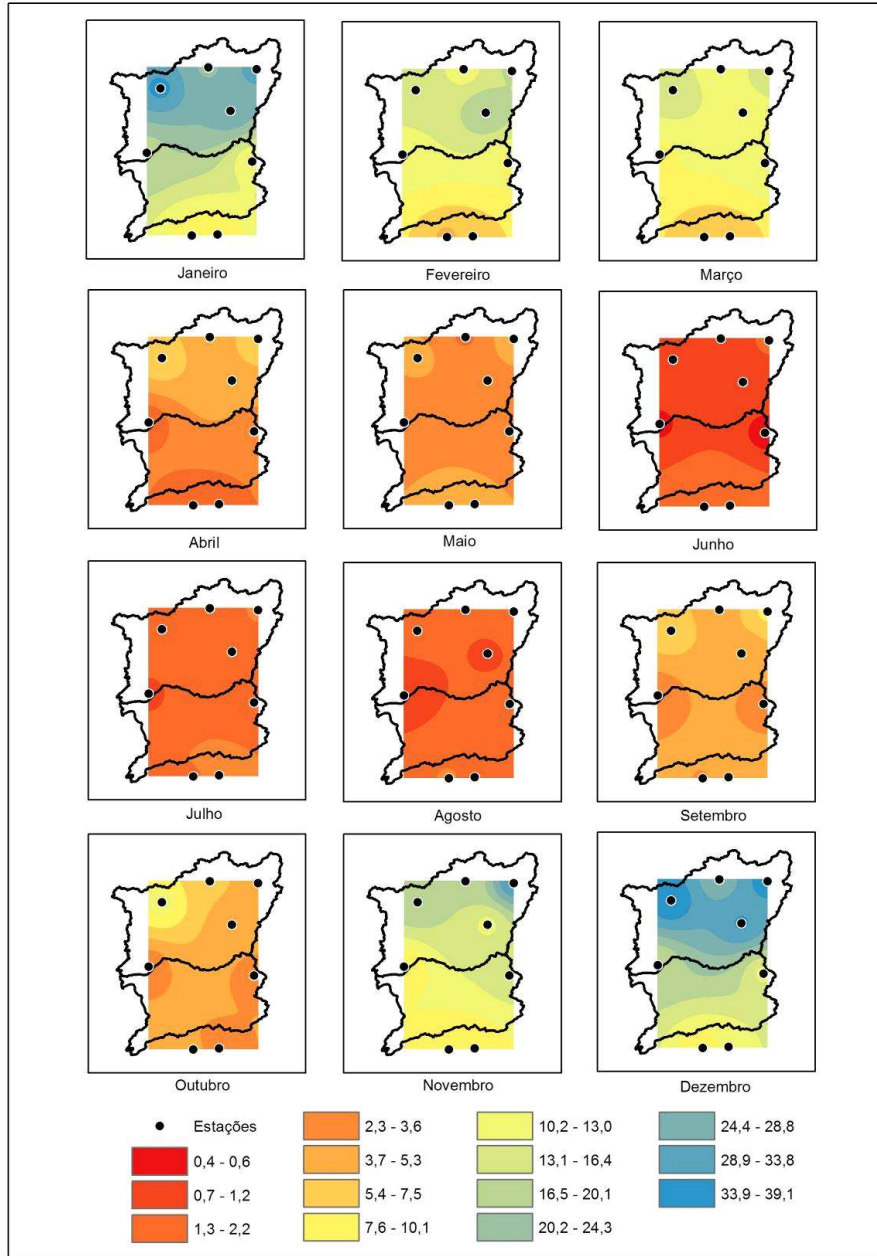


Figura 7. Índices de erosividade mensais $KE > 25$ ($MJ \cdot ha^{-1} \cdot mês^{-1}$) no período 1995 a 2005.

Conclusões

O método aplicado permitiu analisar a distribuição da erosividade na área das bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu.

Os índices de erosividade mensais ao longo das bacias mostraram comportamento similar em termos dos valores relativos, embora apresentem grandes diferenças em termos de valores absolutos ou de ordem de grandeza, o que é resultado da diferença em sua concepção e formulação original.

Os resultados mostraram que ambos os índices, quando analisados os valores mensais, apresentaram, de modo geral, maiores valores no período de novembro a março que corresponde ao “verão”, onde é característico ocorrerem chuvas de maiores intensidades, devido a maiores temperaturas e movimentações de massas de ar. Ao contrário, os menores valores foram observados nos meses de junho a agosto, período no qual ocorrem chuvas com menores intensidades.

Agradecimentos

À Agência Nacional de Águas (ANA) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelo fornecimento dos dados pluviométricos utilizados neste trabalho.

À FAPERJ pelo apoio financeiro (Processo nº E-26/110.824/2010).

Referências

AMADOR, E. S. **Baía de Guanabara e ecossistemas periféricos: homem e natureza**. Rio de Janeiro: Reproarte Gráfica e Editora, 1997. 539 p. Tese (Doutorado). - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. Piracicaba: Livrocere, 1985. 392 p.

ECOLOGUS-AGAR. Bacias Hidrográficas. In: PLANO diretor de recursos hídricos da região hidrográfica da baía de Guanabara. 2005. Mapa colorido em escala 1:50.000.

GONÇALVES, F. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S. Índice e espacialização da erosividade das chuvas para o Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 269-276, 2006.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

KODAMA, Y. Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**. Tokyo, v. 70, n. 4, p. 813-835, 1992.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São Paulo, v. 3, p. 217-231, 1988.

LOMBARDI NETO, F. **Rainfall erosivity**: its distribution and relationship with soil loss at Campinas. Brazil. 1977. Dissertação (Mestrado) - Purdue University, West Lafayette.

MONTEBELLER, C. A. **Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no estado do Rio de Janeiro**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. Harlow: Longman, 1986.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3 ed. Malden: Blackwell, 2005.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251-259, 2004.

Embrapa

Solos