

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

ANA LUÍZA FERREIRA TRINDADE

Variabilidade Espacial Do Potencial
Erosivo Das Chuvas Do Brasil

São Carlos, SP

2014

ANA LUÍZA FERREIRA TRINDADE

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO POTENCIAL
EROSIVO DAS CHUVAS DO BRASIL**

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia Ambiental
da Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Edson Cezar Wendland

Coorientador: Paulo Tarso Sanches de Oliveira

São Carlos, SP

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

T833v Trindade, Ana Luíza Ferreira
Variabilidade espacial do potencial erosivo das
chuvas do Brasil / Ana Luíza Ferreira Trindade;
orientador Edson Cezar Wendland. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2014.

1. Erosão pluvial. 2. Erosividade. 3. Fator R. 4.
Mapa de erosividade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Ana Luiza Ferreira Trindade**

Data da Defesa: 21/11/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Edson Cezar Wendland (Orientador(a))


Aprovada

Paulo Tarso Sanches de Oliveira

Aprovada

Luisa Fernanda Ribeiro Reis

Aprovada


Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo carinho, apoio e pelas palavras de sabedoria que me acompanharam nos meus anos de graduação.

Ao professor Edson Cezar Wendland, pela orientação e paciência durante a execução deste trabalho, por providenciar os recursos necessários para a realização desta pesquisa e, especialmente, por ter me dado a oportunidade de realizar este projeto.

Ao Paulo Tarso de Oliveira, por todo auxílio ao longo deste trabalho, pela grande ajuda na resolução de dúvidas e problemas e por contribuir, juntamente com o Prof. Edson, para minha formação acadêmica.

Ao Paulino, pelo carinho, companheirismo, incentivo e pelo grande auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

À Agência Nacional de Águas – ANA que gentilmente disponibilizou os dados necessários para o desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

TRINDADE, A. L. F. **Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Brasil**. 2014. 21 f. Trabalho de Graduação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

A erosão hídrica é uma das grandes responsáveis pela erosão do solo em regiões de clima tropical, como o Brasil. Este tipo de erosão se inicia pelo impacto das gotas de chuva, que promove a desagregação e liberação das partículas do solo, que são transportadas pelo escoamento superficial. Seu potencial erosivo, definido por suas características como energia cinética e intensidade, pode ser calculado por meio do fator R da Equação Universal de Perda de Solo (USLE). O mapeamento da erosividade possibilita a análise da variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas e pode ser uma importante ferramenta para determinação de práticas conservacionistas do solo. O presente trabalho teve por objetivo elaborar um mapa da erosividade anual das chuvas do Brasil, utilizando séries históricas de, no mínimo, 20 anos de dados pluviométricos. Foram utilizados os dados de chuvas de 1.521 estações pluviométricas, os quais foram aplicados a 75 equações de regressão, desenvolvidas para diversas regiões do país, que relacionam parâmetros como precipitação média anual (P) e o coeficiente de chuvas (R_c) com o índice de erosividade EI_{30} . Os valores de erosividade para os locais não amostrados foram obtidos por meio de interpolação, utilizando o método da krigagem ordinária.

Os maiores valores de erosividade foram observados na região norte do país, enquanto a região do nordeste apresentou os menores índices de erosividade. Os resultados da erosividade anual variaram entre 1.409 e 22.816 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, sendo. Estes resultados podem ajudar a definir as áreas do país que precisam de mais cuidados com os processos erosivos, principalmente nas regiões que não possuem dados pluviográficos.

Palavras-chave: erosão pluvial; erosividade; fator R; mapa de erosividade.

ABSTRACT

TRINDADE, A. L. F. **Spatial variability of rainfall erosivity in Brazil**. 2014. 21 f. Trabalho de Graduação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Rainfall erosion is the main factor driving soil erosion in tropical regions, such as Brazil. This type of erosion begins from raindrops striking soil that promotes detachment of soil's particles, which are transported by the runoff. The rainfall erosivity can be defined by its kinetic energy and intensity and can be obtained by the R Factor of the Universal Soil Losses Equation (USLE). Mapping the rainfall erosivity allows the assessment of spatial variability of rainfall erosivity and could be an important tool to determine soil conservationist practices. The present study aimed to make a rainfall erosivity map from Brazil, build up from 20-years rainfall pluviometric data, obtained from meteorological stations managed by Brazilians National Water Agency (ANA). The rainfall data collected were obtained from 1.521 rain gauges, and then applied to 75 regression equations, developed for different regions of the country, which relate parameters such as mean annual precipitation (P) and the rainfall coefficient (R_c) with the erosivity index EI_{30} . The erosivity values for unsampled locations were obtained by interpolation using the method of ordinary kriging. The obtained results of anual rainfall erosivity were between 1.409 and 22.816 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹ year⁻¹.

The highest values of erosivity were observed in the northern region of the country, while the northeast region had the lowest levels of erosivity. These results may help to define the areas of the country that need more care with erosion, especially in regions that there are no high-resolution rainfall data.

Keywords: rainfall erosion; erosivity; R Factor; erosivity map.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Impacto da gota de chuva no solo.....	14
Figura 2 - Distribuição espacial dos estudos de erosividade conduzidos no Brasil. .	19
Figura 3 - Bacias hidrográficas do território brasileiro.....	24
Figura 4 - Áreas de influências das equações de erosividade.....	30
Figura 5 – Áreas de influência que não possuem estações pluviométricas em seu perímetro.	31
Figura 6 - Gráfico de dispersão dos valores estimados e valores amostrados, utilizando o método do "cross-validation".	33
Figura 7 - Estações pluviométricas selecionadas para o cálculo do índice de erosividade.	35
Figura 8 - Gráfico de dispersão dos valores estimados e valores amostrados, utilizando o método do "cross-validation", para o mapa de erosividade anual do Brasil.....	41
Figura 9 – Mapa da precipitação média anual (mm) do Brasil.....	43
Figura 10 – Mapa da precipitação média anual de 1977 a 2006 – Atlas Geográfico de Recursos Hídricos do Brasil.....	43
Figura 11 – Mapa do índice de erosividade das chuvas ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) do Brasil.....	44
Figura 12–Variação da erosividade média mensal do Brasil ao longo do ano.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos de erosividade no Brasil.	25
Tabela 2 – Extensão média das séries históricas de dados e densidade de estações por bacia.....	34
Tabela 3 – Médias mensais de precipitação por bacia hidrográfica.	37
Tabela 4 – Médias anuais de precipitação e coeficiente médio de chuva por bacia hidrográfica.....	37
Tabela 5–Índices de erosividade anual e mensal das bacias hidrográficas brasileiras.	39

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Erosão pluvial.....	13
2.2	Erosividade em modelos de perda de solo	16
2.3	Cálculo dos Índices de Erosividade	17
2.4	Geoestatística e Mapa de Erosividade.....	19
3.	OBJETIVOS.....	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	Base de dados pluviométricos	23
4.2	Seleção das equações.....	24
4.3	Cálculo do índice de erosividade	31
4.4	Mapa de erosividade.....	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Banco de Dados.....	34
5.2	Índice de Erosividade da chuva	38
5.3	Mapa de erosividade do Brasil	40
6.	CONCLUSÃO	48
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. Introdução

Nos últimos anos, estudos sobre a erosão pluvial tem ganhado destaque, tanto no Brasil quanto no exterior, devido aos danos causados por este fenômeno nos mais diversos aspectos, como ambiental, econômico e até mesmo social. Os efeitos da erosão incluem alteração das características físicas e químicas do solo; redução da fertilidade do solo; contaminação da água por meio do material transportado; assoreamento de corpos d'água e deslizamento de encostas (SILVEIRA, 2002).

Devido à importância do agronegócio no país, a erosão do solo tem sido estudada principalmente com enfoque na produção agrícola, uma vez que o fenômeno é responsável por sérias perdas de produtividade em diversas culturas (MARTIN NETO; VAZ; CRESTANA, 2007). Em estudo realizado por Hernani et al. (2002), estima-se que a erosão hídrica tenha ocasionado perdas anuais de solo e água em áreas agrícolas do país da ordem de 822,7 milhões de toneladas e 171 bilhões de m³, respectivamente. Estes valores estão associados a uma perda anual de US\$ 4,2 bilhões, devido aos custos relativos à reposição de corretivos e fertilizantes, à redução da produtividade, aos maiores custos de produção, ao tratamento de água, à manutenção de estradas e ao maior consumo de energia (MOREIRA et al., 2006).

Apenas recentemente as preocupações têm sido direcionadas aos problemas ambientais relacionados aos processos erosivos, como perdas de solo, degradação de qualidade em corpos d'água e transporte e deposição de sedimentos (MARTIN NETO; VAZ; CRESTANA, 2007). Como consequência, a erosão pode influenciar no equilíbrio ecológico das águas que recebem os sedimentos carregados; no assoreamento de reservatórios e outros cursos d'água, reduzindo sua capacidade de armazenamento; reduzindo áreas disponíveis para agricultura e até mesmo ameaçando obras de infraestrutura (SILVEIRA, 2002).

A erosão pluvial é causada principalmente pela precipitação: o impacto das gotas de chuvas promove a desagregação e liberação de partículas finas do solo, que são transportadas pelo escoamento superficial. Sendo assim, seu potencial erosivo é de grande relevância para estimar perdas de solo causadas por este tipo de erosão (SHAMSAD et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2012). A estimativa da erosividade pluvial pode auxiliar, por exemplo, na identificação de áreas mais

vulneráveis à erosão, bem como os períodos ao longo do ano em que as chuvas apresentam maior potencial erosivo, e quando se deve tomar especial cuidado no uso do solo.

O potencial erosivo das chuvas está relacionado com as características físicas das chuvas, como quantidade, intensidade, diâmetro das gotas, velocidade terminal e energia cinética (SANTOS et al., 2012). No entanto, estes parâmetros são de difícil obtenção, necessitando muitas vezes de dados de alta resolução e de medição contínua, como os pluviográficos. Por isso, os dados necessários para o cálculo do índice de erosividade não possuem boa cobertura espacial ou temporal, o que impossibilita analisar os valores de erosividade para diversas localidades. Desta maneira, a utilização de modelos capazes de estimar os valores de erosividade a partir de dados mais acessíveis, como precipitação média mensal ou anual, torna-se uma importante ferramenta na tomada de decisão de práticas de conservação da água e do solo, que visem minimizar tais impactos (MOREIRA et al., 2006; LEE; HEO, 2011; OLIVEIRA et al., 2012).

No Brasil, diversos autores buscaram relacionar o índice de erosividade com dados pluviométricos por meio de equações de regressão como uma maneira de estimar com boa precisão os valores de erosividade para locais onde não há cobertura de dados pluviográficos. Oliveira et al. (2013) realizou um levantamento detalhado de diversos trabalhos sobre erosividade em andamento no país com intuito analisar a qualidade dos resultados obtidos e sua representatividade, contribuindo desta forma para melhor compreensão do potencial erosivo das chuvas no Brasil.

Embora a utilização de equações de regressão permita estimar valores para o índice de erosividade para diversos locais, ainda haverá regiões onde nem mesmo medições simples de chuvas são realizadas e, portanto, não haverá séries de dados pluviométricos para aplicar nas equações até então desenvolvidas. Os valores de erosividade para estas áreas em particular podem ser estimadas por meio da aplicação de métodos de interpolação baseados nos valores amostrados (MONTEBELLER et al., 2007). Dentre as várias técnicas de interpolação, pode-se citar o método do inverso do quadro da distância, o método das isoietas e métodos de geoestatística, que são utilizados para estimar valores de precipitação.

Os métodos de interpolação podem ser aplicados na elaboração de mapas de erosividade, que fornecem informações importantes sobre o potencial de erosão da

chuva em uma região, auxiliando a implementação de medidas necessárias para a redução da erosão do solo (SILVA, 2004). Silva (2004) elaborou um mapa de erosividade do Brasil, a partir de dados pluviométricos de 1.600 estações, usando séries históricas de precipitação de, no mínimo, 10 anos. No entanto, o autor utilizou somente oito equações de regressão para o cálculo da erosividade a partir das médias mensais e anuais de chuvas.

O presente trabalho pretende analisar a distribuição espacial dos valores de erosividade para o Brasil a partir de dados pluviométricos e realizar o mapeamento destes valores utilizando o método de krigagem (interpolador geoestatístico). Para a obtenção de um mapa de valores de erosividade mais detalhado, será utilizada uma extensa base de dados, constituída por medições mensais de 1.521 estações pluviométricas, que serão aplicadas a 75 equações de regressão levantadas no estudo realizado por Oliveira et al. (2013).

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Erosão pluvial

Os tipos e a intensidade de erosão são influenciados pelas condições ambientais atuantes em determinada área. A erosão hídrica é um fenômeno natural de grande importância nos processos geomorfológicos em grande parte do planeta. Sua ação é caracterizada pela desagregação das partículas do solo e, conseqüentemente, seu arraste, transporte e deposição (TERRENCE, 2002).

Este tipo de erosão pode ser classificado como laminar ou linear. A erosão laminar é responsável pela perda das camadas mais superficiais do solo, causando problemas como perda de solos cultiváveis, enquanto a erosão linear ocorre quando o escoamento superficial se dá por vias preferenciais no solo, formando sulcos e ravinas no terreno (MARTIN NETO; VAZ; CRESTANA, 2007).

Em casos em que o processo erosivo torna-se muito avançado, as ravinas tornam-se cada vez mais profundas, podendo atingir o lençol freático. Neste estágio, a feição erosiva passa a ser denominada voçoroca e, a partir daí, as águas subterrâneas passam a atuar no processo erosivo juntamente com as chuvas. As voçorocas são responsáveis por grandes perdas de solo, além de ameaçar diversas obras de engenharia, como estradas e até mesmo construções.

De maneira geral, a erosão é condicionada por fatores ambientais como: precipitação, características do solo, topografia, cobertura vegetal e práticas de uso e ocupação do solo (COGO, 2003; HUDSON, 1977; TERRENCE, 2002). As características do solo que determinam sua suscetibilidade intrínseca de sofrer erosão é denominada erodibilidade, e que pode ser influenciada por fatores como a permeabilidade do solo à água, a capacidade de armazenamento de água, a textura, a coesão, o grau e tipo de estrutura, entre outros (SILVA et al., 2009). O clima determina as forças atuantes na erosão hídrica, sendo o principal fator para estimar o potencial erosivo das chuvas: erosividade. Fatores ambientais como topografia, vegetação e uso e manejo do solo influenciam nas forças que os agentes erosivos aplicam no solo (TERRENCE, 2002).

As principais forças motrizes da erosão pluvial são as tensões de cisalhamento causadas pelo impacto da gota de chuva no solo e o conseqüente escoamento superficial decorrente da precipitação. Desta forma, a erosão hídrica

pode ser descrita como a relação entre a atuação destas forças e a capacidade do solo em resistir à erosão (MORGAN, 2005).

A ação das gotas de chuvas nas partículas do solo pode ser entendida como a transferência do momento das gotas às partículas de solo. Ao tocar o solo, a gota da chuva transfere parte do seu momento inicial para o solo, compactando-o. O restante do momento inicial é transferido às partículas de solos, lançando-as com as gotículas de água resultante do impacto da gota de chuva com a superfície do solo, como pode ser observado na Figura 1 (MORGAN, 2005).



Figura 1- Impacto da gota de chuva no solo.

Fonte: WEPP (2014)

O arraste das partículas do solo promovido pelos jatos laterais das gotas de chuvas pode ocasionar a formação de uma pequena cratera no local do impacto. Esta cratera é um indicativo da quantidade de sedimento que foi removido com o impacto, e sua dimensão pode ser determinada pelo tamanho das gotas de chuva e sua velocidade no impacto. De forma geral, quanto maior o diâmetro das gotas e a velocidade terminal que as gotas atingem o solo, maiores serão as crateras formadas. Por outro lado, gotas de pequenos diâmetros que colidem com o solo em baixa velocidade tendem a promover pouco ou nenhum movimento das partículas do solo (TERRENCE, 2002). Entretanto, mesmo grandes gotas de chuvas não são capazes de mover partículas de maior densidade, como cascalho. Desta forma, o efeito do impacto das gotas no solo também é influenciado pela densidade e

tamanho das partículas que o compõem, sendo possível observar diferentes efeitos em função da textura do solo. Em solos não grosseiros quase não se observa a formação da cratera no local do impacto devido às ligações mais fortes entre as partículas do solo. Neste tipo de solo, a força aplicada no impacto é despendida na desagregação das partículas. Nos solos de textura mais grosseira, por outro lado, as forças do impacto atuam diretamente no arraste e transporte dos sedimentos. Em comparação aos solos coesivos, a quantidade de sedimento removido pelo impacto de uma única gota de chuva é bem maior em solos não coesivos (TERRENCE, 2002).

O efeito de consolidação do solo pode ser observado a partir da formação de uma crosta na superfície do solo, que normalmente apresenta poucos milímetros de espessura. A formação desta camada é consequência da obstrução dos poros do solo por meio da compactação e pelo carreamento de partículas finas desagregadas pelo impacto das gotas de chuva (MORGAN, 2005). Estudos realizados por Farres (1978) mostram que após uma chuva, grande parte dos agregados presentes na superfície do solo é destruída, enquanto que aqueles localizados abaixo da crosta permanecem intactos, mesmo na condição de solo saturado. No entanto, uma leve pressão neste solo poderia causar seu desmoronamento. Desta forma, o estudo conclui que, embora a saturação do solo reduza a força interna entre os agregados do solo, os mesmos não se desintegram por meio do impacto das gotas de chuvas, após a formação desta fina camada superficial (MORGAN, 2005).

O nível de água na superfície do solo também é um importante fator neste tipo de processo erosivo. Baixos níveis de água na superfície do solo implicam em maior quantidade de material removido. À medida que a altura da lâmina d'água sobre o solo aumenta, atinge-se um nível a partir do qual as forças aplicadas ao solo começam a reduzir. Quando o nível de água na superfície for equivalente ao triplo do diâmetro da gota, as forças atuantes no solo são essencialmente anuladas (TERRENCE, 2002).

A perda total de solo em uma bacia pode ser entendida como o somatório da desagregação de partículas causada por cada gota de chuva que atinge o solo. As forças aplicadas ao solo pela precipitação aumentam conforme a velocidade do impacto e a massa das gotas. Devido à dificuldade de mensurar tais forças, a erosividade das chuvas normalmente é obtida a partir da energia do impacto de uma

gota de chuva. Desta maneira, a erosividade total de uma chuva é dada pela soma das energias de impacto de cada gota de chuva (TERRENCE, 2002).

2.2 Erosividade em modelos de perda de solo

As equações de perda de solo foram desenvolvidas com objetivo de prever as perdas de solo em uma determinada bacia hidrográfica, dando base para medidas conservacionistas (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Dentre estas equações, a equação universal de perda de solo (Universal Soil Losses Equation - USLE) é um dos modelos matemáticos mais utilizados para estimar a perda de solo e estudar os diversos fatores que compõem o processo erosivo.

A USLE estima a perda média anual de solo associada tanto à erosão laminar quanto à erosão linear, utilizando seis fatores associados ao clima, solo, topografia e manejo do solo da área estudada (KINNEL, 2010). A equação é expressa como:

$$A = RKLSCP$$

em que A é a taxa de perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$); R é o fator de erosividade da chuva ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$); K é o fator de erodibilidade do solo ($t.ha.h.ha^{-1} MJ^{-1}.mm^{-1}$); L é o fator de comprimento do declive; S é o fator da declividade do terreno; C é o fator de uso e manejo do solo; P é o fator para prática conservacionista do solo.

A erosividade das chuvas é representada na USLE pelo fator R , que expressa o potencial erosivo da precipitação média anual da região. Segundo Wischmeier e Smith (1978), o conceito da erosividade baseia-se na interação entre a energia cinética das gotas de chuva e a cobertura do solo. De acordo com os autores, o grau de desagregação das partículas do solo e o transporte destas partículas são influenciados pela energia cinética e intensidade das chuvas, considerando o mesmo tipo de solo, as mesmas condições topográficas e a mesma cobertura e manejo do solo (SILVA, 2004).

De acordo com Gonçalves (2006), são vários os parâmetros que podem ser utilizados para estimar a erosividade da chuva. No entanto, deve-se atentar para a escolha do parâmetro mais adequado, uma vez que cada ambiente e evento são únicos, tanto em escala espacial quanto temporal, influenciando na maneira como ocorrem os processos erosivos.

Dentre os diversos índices desenvolvidos para o estudo da erosividade, pode-se citar o parâmetro El_{30} . Por definição, o fator representa o produto da energia cinética proveniente do impacto das gotas de chuva no solo (E) e intensidade máxima de chuvas de 30 minutos (I_{30}) (WISCHMEIER&SMITH, 1978). O fator de erosividade R é obtido a partir do somatório dos valores de El_{30} calculados para cada chuva erosiva observado no ano:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (El_{30})_k$$

onde R é a erosividade média anual ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$); n é o número de anos da série histórica de dados; m_j é o número de eventos erosivos do ano j ; e El_{30} é o índice de erosividade de um evento k (ALMEIDA et al., 2011b; OLIVEIRA et al., 2012).

Em regiões de clima temperado, o parâmetro El_{30} apresenta bons resultados na análise da erosividade, onde os coeficientes de correlação entre os fatores de erosividade El_{30} e as perdas de solo variam entre 0,84 e 0,98 (GONÇALVES, 2006; BERTOL et al., 2002; ANGULO-MARTINEZ, 2009). De acordo com Bertol et al. (2002), os coeficientes de correlação entre os fatores de erosividade das chuvas e as perdas de solo variam entre 0,57 e 0,81.

Para regiões tropicais e subtropicais, índices de erosividade como o $KE>25$, tem apresentado melhor correlação com as perdas de solo (BERTOL et al., 2002). O fator $KE>25$ é representado pelo somatório da energia energética cinética total das chuvas com intensidade superior a $25\ mm^{-1}$. Em estudo realizado por Hudson (1981), na África do Sul, os coeficientes de correlação entre o fator $KE>25$ e as perdas de solo variaram de 0,92 a 0,96.

2.3 Cálculo dos Índices de Erosividade

Embora o fator El_{30} apresente boa correlação na estimativa de perdas de solo em países de clima temperados, diversos estudos no Brasil demonstraram uma boa correlação com o índice e a perda de solo (BERTOL et al., 2007, 2008; LOMBARDI NETO; MOLDENHAUER, 1992; Silva et al., 2009; Almeida et al., 2011).

Para obter o índice de erosividade El_{30} , da maneira originalmente proposto por Wischmeier e Smith (1978), faz-se necessário trabalhar com longas séries históricas de dados pluviográficos, que são de difícil obtenção em diversos locais do

mundo. Além disso, a utilização de tais dados é complexa e demanda muito tempo (LEE; HOO, 2011). Desta maneira, o cálculo do índice de erosividade ficaria limitado às poucas localidades em que estes dados encontram-se disponíveis (MOREIRA et al., 2006).

Por outro lado, medições mais simples de precipitação, como dados pluviométricos, são mais facilmente disponíveis e possuem melhor abrangência espacial e temporal. Desta maneira, alternativas que permitem obter com boa precisão os valores para erosividade mensal e anual usando dados pluviométricos tornam-se bastante atrativas (SILVA, 2004).

Em diversos estudos no Brasil e no mundo, uma das alternativas mais usadas para contornar este problema é através da determinação de equações de regressão para estimar a erosividade local a partir de dados pluviométricos (OLIVEIRA et al., 2013).

De maneira simplificada, as equações de regressão levantadas no estudo de Oliveira et al. (2013) foram desenvolvidas na tentativa dos autores de descrever matematicamente a relação entre os valores de EI_{30} mensal, obtidos a partir de séries de dados pluviométricos, com simples medições de precipitação (ALMEIDA et al., 2011c).

Os principais parâmetros utilizados nas equações obtidas são a precipitação média anual (P , em mm), e o Índice Modificado de Fournier, ou coeficiente de chuvas, dado pela seguinte expressão:

$$R_c = \frac{M_x^2}{P}$$

em que R_c é o Índice Modificado de Fournier; M é o valor da precipitação (mm) para o mês x ; e P é a precipitação (mm) média anual.

Oliveira et al (2012) analisou a distribuição espacial dos estudos de erosividade conduzidos em diversas regiões do país, a fim de determinar em quais regiões tais estudos são escassos. Os estudos analisados estavam focados em 80 cidades de 14 dos 26 estados brasileiros, ou seja, praticamente metade dos estados não apresentam estudos sobre erosividade. Entre as cidades estudadas, aproximadamente 60% se encontram nas regiões sul e sudeste do Brasil. Na Figura 2 é possível observar a distribuição espacial dos estudos sobre erosividade conduzidos no Brasil levantados por Oliveira et al. (2013).

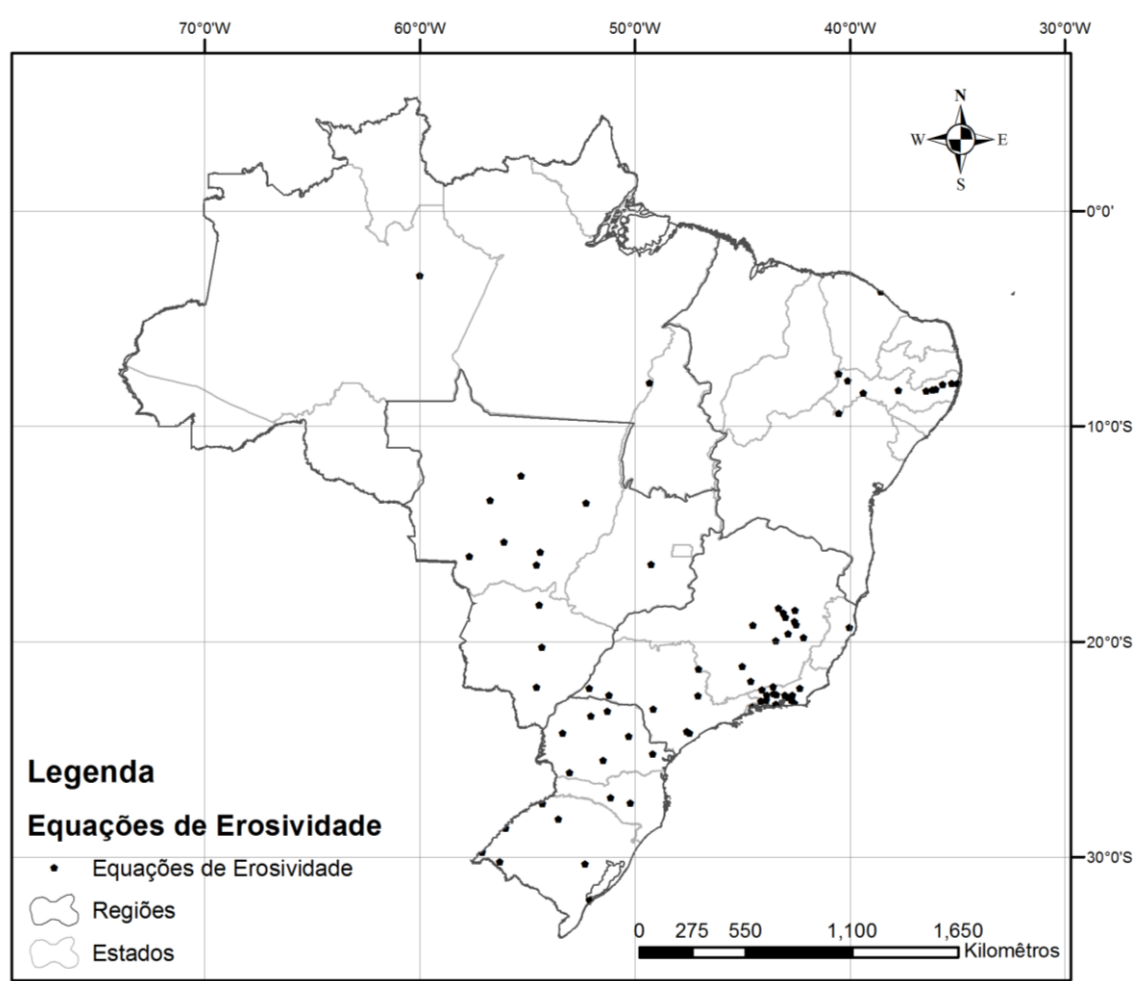


Figura 2 - Distribuição espacial dos estudos de erosividade conduzidos no Brasil.
 Fonte: Oliveira et al (2012)

Dos 85 estudos revisados sobre erosividade conduzidos no Brasil, 75 desenvolveram equações de regressão que relacionam o índice de erosividade EI_{30} à precipitação média anual (P) ou ao Índice Modificado de Fournier (R_c). Dentre as equações desenvolvidas, 44 apresentaram valores de R^2 inferiores a 0,70, das quais 22 não apresentaram relação significativa entre os parâmetros analisados, 39 equações apresentaram R^2 entre 0,70 e 0,90; e 26 equações obtiveram R^2 iguais ou superiores a 0,90.

2.4 Geoestatística e Mapa de Erosividade

As equações de regressão levantadas (Tabela 1) permitem obter valores de erosividade pontuais, para as localidades onde há monitoramento dos índices de chuvas, sejam eles pluviográficos ou pluviométricos. No entanto, há diversas regiões no país onde a disponibilidade destes tipos de dados é precária ou inexistente, não

sendo possível realizar tal análise. Nestes casos, a utilização de ferramentas estatísticas permite estimar os valores de erosividade para a área de estudo, baseado nos valores pontuais obtidos. As ferramentas estatísticas clássicas, no entanto, não consideram a dependência geográfica dos valores amostrados (CARVALHO et al., 2009).

Em diversos estudos, analisou-se a distribuição espacial da precipitação, concluindo que o parâmetro apresenta dependência espacial (ALMEIDA et al., 2011; MELO JUNIOR et al., 2006; MELLO; SILVA, 2009). Portanto, seu potencial erosivo, também apresenta tal característica, que deve ser levada em conta para estimar os valores de erosividade para locais não amostrados.

No entanto, para realizar tal análise é preciso utilizar métodos estatísticos apropriados, que consideram as coordenadas geográficas dos parâmetros analisados, tal como a geoestatística. Trata-se de uma ferramenta de análise espacial baseada na técnica *Kriging* (KRIGE, 1951), desenvolvida com objetivo de estimar valores não amostrados. O modelo probabilístico é associado à localização espacial dos pontos amostrados, o que permite analisar a variabilidade espacial dos valores observados (ALMEIDA et al., 2011). De acordo com Martheron (1963), o método baseia-se na teoria das variáveis regionalizadas, em que as observações vizinhas de uma variável aleatória possuem dependência espacial, distribuída de forma contínua no espaço (ALMEIDA et al, 2011).

O semivariograma é uma ferramenta básica para a aplicação da geoestatística, uma vez que expressa o grau de dependência espacial dentro da área estudada, permitindo estimar parâmetros para locais que não apresentam valores amostrados. Trata-se de uma função matemática que expressa o nível de dependência entre duas variáveis aleatórias regionalizadas, estimado pela equação de semivariância:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

onde: $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados por uma distância h .

A aplicação deste método possibilita a construção de mapas de isolinhas ou tridimensionais, que permitem avaliar a variabilidade espacial de diversos parâmetros, como a precipitação e erosividade (CARVALHO et al., 2009; VIEIRA,

2000). Tais mapas podem ser de grande importância na fase de planejamento das técnicas de manejo do solo, permitindo identificar as áreas que precisam de ações mais urgentes contra processo erosivos (ANGULO-MARTINEZ et al., 2009, CAPOLONGO et al., 2008).

Diversos estudos de erosividade desenvolveram mapas do potencial erosivo das chuvas utilizando a interpolação por krigagem ordinária. Pode-se citar os trabalhos de Ferro et al., (1999), no sul da Itália e sudeste da Austrália; Angulo-Martinez et al., (2009) na região nordeste da Espanha; e Bonilla e Vidal (2011) na região central do Chile. No Brasil, foram elaborados diversos mapas de erosividade para diversos estados, como São Paulo (VIEIRA; LOMBARDI NETO, 1995); Minas Gerais (MELLO et al., 2007); Rio de Janeiro (MONTEBELLER et al., 2007; GONÇALVES, 2006), Mato Grosso do Sul (OLIVEIRA et al., 2012). Também se pode citar o trabalho de Silva et al. (2004), que desenvolveu um mapa de erosividade para todo território brasileiro.

3. Objetivos

O objetivo do presente trabalho é elaborar um mapa de erosividade do território brasileiro a partir de dados de 1.521 estações pluviométricas e 75 equações de erosividade, utilizando de técnicas de interpolação por krigagem ordinária.

De forma específica, este trabalho tem por objetivo: construir uma base de dados pluviométricos, de série histórica de, no mínimo, 20 anos; verificar estatisticamente tendências na distribuição geográfica da erosividade das chuvas no Brasil; e interpolar os valores de erosividade obtidos para regiões sem dados pluviométricos, utilizando interpolação geoestatística, do tipo krigagem ordinária.

4 Materiais e Métodos

4.1 Base de dados pluviométricos

Para aplicar as equações de erosividade levantadas por Oliveira et al (2012), é necessário trabalhar com séries históricas mensais de chuvas de, no mínimo, 20 anos (Renard et al., 1997). Desta maneira, fez-se necessário a construção de uma base de dados de chuvas, indicando quais as estações pluviométricas cumprem este requisito; quantos anos elas apresentam em sua série histórica; qual a média de precipitação anual e mensal de cada estação; e qual a média de precipitação de cada mês.

Foram utilizadas para esta análise todas as estações pluviométricas do território brasileiro, registradas pela Agência Nacional de Água - ANA. Os dados destas estações estão disponíveis em portal eletrônico gerenciado pela própria agência, denominado *HidroWeb*. Neste sistema, os dados são disponibilizados por "registros", que representam as medições mensais de uma dada estação.

Atendendo a solicitação dos autores, a ANA enviou todos os dados medidos para todas as estações que possuíam mais de 240 registros, ou seja, possuíam pelo menos 240 meses de medições mensais. Foi observado, no entanto, que para diversos meses não foram efetuadas as medições de chuvas, fazendo com que vários anos não pudessem ser computados na série histórica de diversas estações. Desta maneira, foi feita uma seleção das estações que apresentaram 20 anos ou mais de dados completos. É importante destacar que não foi observada a simultaneidade dos períodos que compuseram as séries históricas, uma vez que isto limitaria a extensão da série de dados.

Devido ao grande volume de informações, utilizou-se auxílio do *software* Scilab, que permitiu fazer as análises necessárias para montagem do banco de dados. Foi escolhido o SciLab por ser um programa livre, além de permitir a importação de planilhas no formato .xls (Microsoft Office Excel) e exportação em formato .csv, que poderia ser novamente importado para o Excel.

Para simplificar a análise dos dados, as estações selecionadas foram separadas por bacias hidrográficas, seguindo a separação proposta pela ANA (Figura 3).

Por fim, as estações selecionadas foram inseridas em Sistema de Informações Geográficas (SIG), mais especificamente utilizando o programa ArcGIS (ESRI, 2006), para que se pudesse efetuar posteriormente a interpolação dos dados.

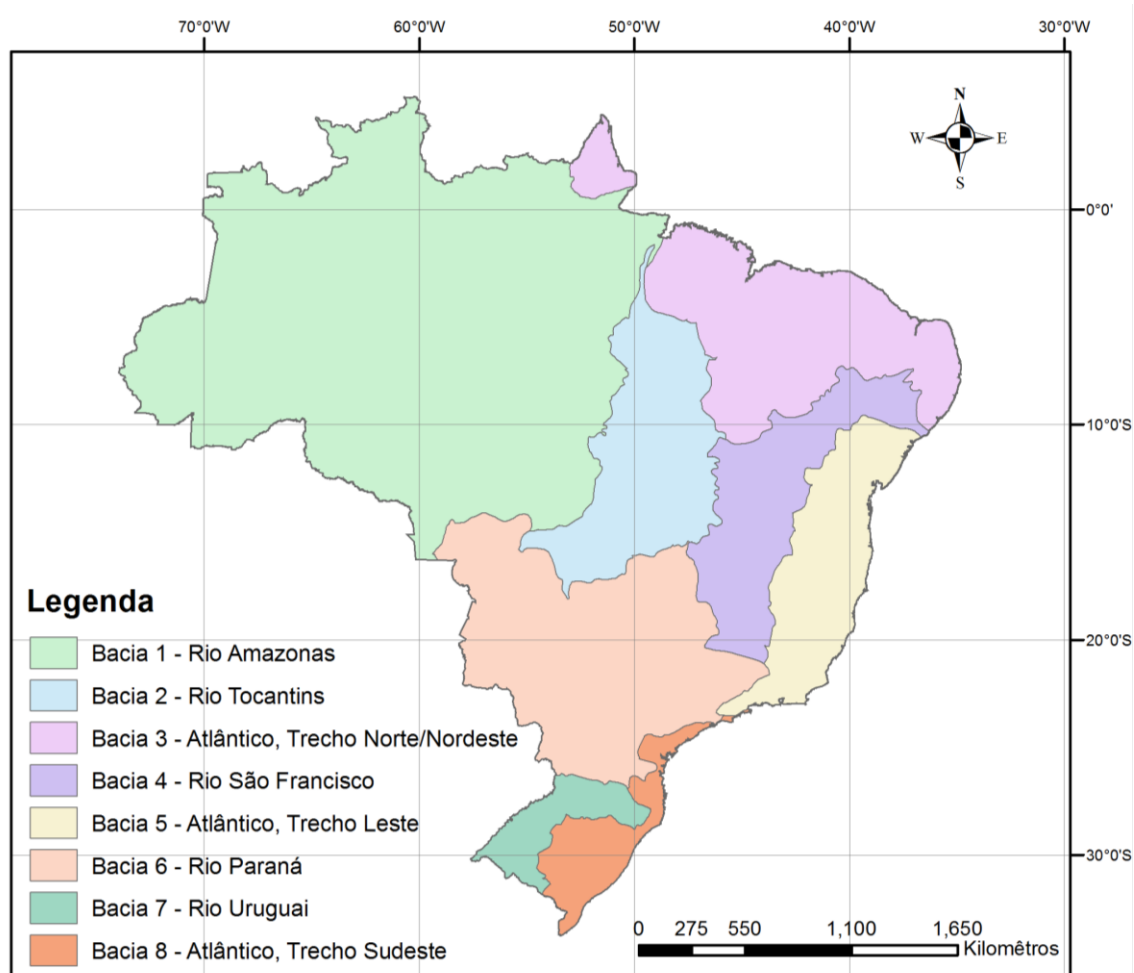


Figura 3 - Bacias hidrográficas do território brasileiro.

Fonte: Adaptado de ANA (2014)

4.2 Seleção das equações

Uma vez definidas quais estações serão utilizadas para o cálculo da erosividade, é necessário definir qual equação, dentre aquelas levantadas por Oliveira et al. (2013) (Tabela 1) será utilizada para cada estação pluviométrica.

Tabela 1 – Estudos de erosividade no Brasil.

Latitude	Longitude	Cidade	Estado	Anos	Altitude	Precipitação	Fator R	Equações	R ²	Autores
3° 0' 0"S	60° 0' 0"W	Manaus	AM	-	-	2,219	14,129	$El_{30} = 42.77 + 3.76 (MFI)$	-	Oliveira Jr. and Medina, 1990
3° 44' 0"S	38° 33' 0"W	Fortaleza	CE	20	20	1,677	6,774	-	-	Dias and Silva, 2003
19° 35' 0"S	40° 0' 0"W	Aracruz	ES	7	40	1,400	8,536	$El_{30} = 40.578 + 7.9075 (P)$	0.61	Martins et al., 2010
16° 41' 0"S	49° 23' 0"W	Goiânia	GO	5	750	1,280	8,353	$El_{30} = 215.33 + 30.23 (MFI)$	0.77	Silva et al., 1997
21° 8' 24"S	45° 0' 0"W	Lavras	MG	15	919	1,530	5,403	-	-	Evangelista et al., 2006
19° 25' 0"S	44° 15' 0"W	Sete Lagoas	MG	3	732	1,340	5,835	$El_{30} = 25.3 + 43.35 (MFI) - 0.232 (MFI)^2$	-	Marques et al., 1997
19° 04' 11"S	42° 32' 56"W	Açucena	MG	3	493	1,481	18,646	$El_{30} = 158.35 (MFI)^{0.85}$	0.88	Silva et al., 2010b
19° 38' 23"S	42° 51' 13"W	Antônio Dias	MG	3	420	1,198	12,919	$El_{30} = -119.27 + 7.84 (P)$	0.9	Silva et al., 2010b
19° 13' 20"S	42° 29' 41"W	Belo Oriente	MG	3	280	1,223	8,670	$El_{30} = 215.4 (MFI)^{0.65}$	0.89	Silva et al., 2010b
19° 47' 55"S	42° 08' 51"W	Caratinga	MG	3	660	1,037	10,115	$El_{30} = 321.63 (MFI)^{0.48}$	0.86	Silva et al., 2010b
18° 33' 25"S	42° 32' 35"W	Peçanha	MG	3	890	1,100	9,013	$El_{30} = -141.07 + 9.63 (P)$	0.9	Silva et al., 2010b
18° 40' 23"S	43° 04' 52"W	Sabinópolis	MG	3	760	1,078	8,670	$El_{30} = 123.33 (MFI)^{0.74}$	0.95	Silva et al., 2010b
19° 57' 26"S	43° 24' 60"W	Santa Bárbara	MG	3	810	1,272	9,145	$El_{30} = 170.59 (MFI)^{0.64}$	0.93	Silva et al., 2010b
18° 27' 19"S	43° 18' 16"W	Sto. Ant. Itambé	MG	3	720	1,411	15,280	$El_{30} = 179.33 (MFI)^{0.77}$	0.9	Silva et al., 2010b
18° 51' 87"S	42° 58' 29"W	Sto D. do Prata	MG	3	621	1,102	13,145	$El_{30} = 114.42 (MFI)^{0.81}$	0.86	Silva et al., 2010b
22° 6' 54"S	54° 33' 39"W	Dourados	MS	8	458	1,378	9,256	$El_{30} = 73.464 + 56.562 (MFI)$ $El_{30} = 80.305 (MFI)^{0.8966}$	0.80 0.88	Oliveira et al., 2011b
18° 18' 10"S	54° 26' 43"W	Coxim	MS	4	238	1,371	10,439	$El_{30} = 247.35 + 41.036 (MFI)$ $El_{30} = 138.33 (MFI)^{0.7431}$	0.90 0.91	Oliveira et al., 2011b
20° 15' 57"S	54° 18' 54"W	Campo Grande	MS	3	592	1,419	9,872	$El_{30} = 171.40 + 42.173 (MFI)$ $El_{30} = 139.44 (MFI)^{0.6784}$	0.78 0.91	Oliveira et al., 2011b
15° 37' 18"S	56° 06' 30"W	Cuiabá	MT	18	151	1,387	8,810	$El_{30} = 109.412 (MFI)^{0.744}$	0.91	Almeida et al., 2011a
16° 27' 0"S	54° 34' 12"W	Rondonópolis	MT	6	284	1,274	6,641	$El_{30} = 133.2004291 (MFI)^{0.5372499}$	0.90	Almeida et al., 2011b
16° 03' 0"S	57° 40' 48"W	Caceres	MT	7	118	1,191	5,056	$El_{30} = 172.6326451 (MFI)^{0.5245258}$	0.94	Almeida et al., 2011b
15° 39' 0"S	57° 29' 00"W	Caceres	MT	9	135	1,369	8,493	$El_{30} = 56.115 (MFI)^{0.9504}$	0.87	Morais et al., 1991
16° 02' 0"S	57° 16' 00"W	Caceres	MT	7	155	1,316	7,830	$El_{30} = 36.849 (MFI)^{1.0852}$	0.84	Morais et al., 1991
13° 33' 0"S	52° 15' 36"W	Canarana	MT	-	406	1,796	12,516	$El_{30} = 317.397829 (MFI)^{0.484654}$	0.86	Almeida et al., 2011c

Tabela 1 – Estudos de erosividade no Brasil. (Continuação)

Latitude	Longitude	Cidade	Estado	Anos	Altitude	Precipitação	Fator R	Equações	R ²	Autores
12° 17' 24"S	55° 17' 24"W	Vera	MT	-	379	2,259	15,965	$El_{30} = 399.538719 (MFI)^{0.458718}$	0.84	Almeida et al., 2011c
15° 50' 24"S	54° 23' 24"W	Poxoréo	MT	-	370	1,688	8,652	$El_{30} = 272.865645 (MFI)^{0.419164}$	0.66	Almeida et al., 2011c
13° 26' 24"S	56° 42' 36"W	São J. Rio Claro	MT	-	360	1,881	7,107	$El_{30} = 147.262400 (MFI)^{0.533025}$	0.83	Almeida et al., 2011c
8° 13' 42"S	49° 21' 58"W	Conc. Araguaia	PA	8	203	1,729	11,487	$El_{30} = 321.5 + 36.2 (MFI)$	0.89	Oliveira Jr, 1996
5° 24' 35"S	49° 06' 48"W	Marabá	PA	-	98	1,969	13,915	-	-	Oliveira Jr. et al., 1992
1° 04' 48"S	46° 47' 21"W	Bragança	PA	-	21	2,318	12,351	-	-	Oliveira Jr. et al., 1992
2° 15' 30"S	49° 31' 06"W	Cametá	PA	-	11	2,255	14,756	-	-	Oliveira Jr. et al., 1989
3° 47' 04"S	49° 42' 18"W	Tucuruí	PA	-	203	2,207	14,487	-	-	Oliveira Jr. et al., 1989
3° 01' 41"S	47° 21' 10"W	Paragominas	PA	-	140	1,954	13,251	-	-	Oliveira Jr. et al., 1989
1° 26' 37"S	48° 28' 30"W	Belem	PA	-	15	3,144	22,452	-	-	Oliveira Jr. et al., 1995
7° 58' 48"S	35° 8' 60"W	Olinda	PE	10	61	1,852	6,325	$El_{30} = 57.25 + 30.8 (MFI)$	0.88	Cantalice et al., 2009
8° 24' 4"S	35° 25' 54"W	Catende	PE	5	160	699	3,601	$El_{30} = 69.24(MFI)^{0.75}$	0.87	
8° 0' 1"S	35° 10' 42"W	Gloria do Goitá	PE	10	153	956	3,212	$El_{30} = 57.32 (MFI)^{0.618}$	0.75	Cantalice et al., 2009
8° 17' 17"S	35° 58' 56"W	Caruaru	PE	9	540	501	1,909	$El_{30} = 97.79 + 15 (MFI)$	0.72	Cantalice et al., 2009
8° 11' 33"S	36° 4' 53"W	São Caetano	PE	11	650	500	1,672	$El_{30} = 50.75 (MFI)^{0.724}$	0.78	
8° 20' 38"S	36° 25' 26"W	Belo Jardim	PE	7	610	628	2,862	$El_{30} = 61.81 (MFI)^{0.58}$	0.67	Cantalice et al., 2009
7° 34' 12"S	40° 30' 02"W	Araripina	PE	9	630	719	2,860	$El_{30} = 61.81 (MFI)^{0.58}$	0.67	
8° 17' 1"S	39° 14' 7"W	Cabrobó	PE	9	336	446	2,518	$El_{30} = 73.34 + 23.18 (MFI)$	0.94	Cantalice et al., 2009
7° 52' 57"S	40° 04' 49"W	Ouricuri	PE	11	450	580	2,538	$El_{30} = 95.48 (MFI)^{0.56}$	0.82	
9° 23' 33"S	40° 30' 16"W	Petrolina	PE	8	370	438	3,480	$El_{30} = 73.34 + 23.18 (MFI)$	0.94	Cantalice et al., 2009
8° 19' 16"S	37° 43' 26"W	Poço da Cruz	PE	8	470	498	3,159	$El_{30} = 95.48 (MFI)^{0.56}$	0.82	
24° 15' 18"S	53° 20' 35"W	Oeste Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 73.34 + 23.18 (MFI)$	0.94	Cantalice et al., 2009
								$El_{30} = 95.48 (MFI)^{0.56}$	0.82	
								$El_{30} = 182.86 + 56.21 (MFI)$	-	Rufino et al., 1993

Tabela 1 – Estudos de erosividade no Brasil. (Continuação)

Latitude	Longitude	Cidade	Estado	Anos	Altitude	Precipitação	Fator R	Equações	R ²	Autores
26° 4' 21"S	53° 1' 31"W	Sudoeste Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 144.86 + 55.20 \text{ (MFI)}$	-	Rufino et al., 1993
22° 28' 57"S	51° 11' 29"W	Norte Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 216.31 + 41.30 \text{ (MFI)}$	-	Rufino et al., 1993
23° 13' 25"S	51° 16' 13"W	Noroeste Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 164.12 + 39.44 \text{ (MFI)}$	-	Rufino et al., 1993
23° 26' 43"S	52° 1' 54"W	Centro Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 191.79 + 48.40 \text{ (MFI)}$	-	Rufino et al., 1993
25° 30' 55"S	51° 27' 51"W	Centro S. Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 107.52 + 46.89 \text{ (MFI)}$	-	Rufino et al., 1993
24° 24' 19"S	50° 15' 45"W	Centro L. Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 93.29 + 41.20 \text{ (MFI)}$	-	Rufino et al., 1993
25° 13' 30"S	49° 8' 32"W	Leste Paraná	PR	-	-	-	-	$El_{30} = 33.26 + 40.71 \text{ (MFI)}$	-	Rufino et al., 1993
22° 10' 12"S	42° 19' 17"W	Nova Friburgo	RJ	5	857	1,063	5,431	$El_{30} = -67.99 + 33.86 \text{ (MFI)}$	0.85	Carvalho et al., 2005
22° 27' 30"S	43° 24' 39"W	Seropédica	RJ	7	33	1,118	5,472	$El_{30} = 64.87 + 38.14 \text{ (MFI)}$	0.82	Carvalho et al., 2005
22° 04' 04"S	43° 33' 30"W	Rio das Flores	RJ	5	400	1,028	4,118	$El_{30} = 112.54 + 20.70 \text{ (MFI)}$	0.82	Gonçalves et al., 2006
22° 13' 39"S	44° 03' 41"W	Valença	RJ	7	567	1,550	6,971	$El_{30} = 194.08 + 27.74 \text{ (MFI)}$	0.82	Gonçalves et al., 2006
23° 1' 48"S	44° 31' 12"W	Angra dos Reis	RJ	6	6	2,034	10,140	$El_{30} = 73.21 + 44.61 \text{ (MFI)}$	0.84	Gonçalves et al., 2006
21° 50' 24"S	44° 34' 48"W	Carmo	RJ	15	146	1,013	5,653	$El_{30} = 223.87 + 21.00 \text{ (MFI)}$	0.72	Gonçalves et al., 2006
22° 28' 48"S	43° 50' 24"W	Barra do Pirai	RJ	14	371	1,486	4,985	$El_{30} = 50.36 + 24.53 \text{ (MFI)}$	0.96	Gonçalves et al., 2006
22° 41' 60"S	43° 52' 48"W	Pirai	RJ	15	462	1,451	6,696	$El_{30} = 112.54 + 20.70 \text{ (MFI)}$	0.82	Gonçalves et al., 2006
22° 45' 0"S	44° 7' 12"W	Rio Claro	RJ	15	479	1,466	9,031	$El_{30} = 118.71 + 38.48 \text{ (MFI)}$	0.98	Gonçalves et al., 2006
22° 42' 36"S	42° 42' 0"W	Rio Bonito	RJ	16	40	1,387	5,289	$El_{30} = 38.48 + 35.13 \text{ (MFI)}$	0.81	Gonçalves et al., 2006
22° 34' 48"S	42° 56' 24"W	Magé	RJ	19	10	1,859	10,235	$El_{30} = 64.59 + 47.68 \text{ (MFI)}$	0.89	Gonçalves et al., 2006
22° 28' 48"S	42° 39' 36"W	Conc. Macabu	RJ	15	40	1,915	7,961	$El_{30} = 39.86 + 37.90 \text{ (MFI)}$	0.91	Gonçalves et al., 2006
22° 28' 48"S	43° 0' 0"W	Magé	RJ	16	640	3,006	15,806	$El_{30} = 146.28 + 46.37 \text{ (MFI)}$	0.70	Gonçalves et al., 2006
22° 51' 0"S	42° 32' 60"W	Saquarema	RJ	15	10	1,252	5,448	$El_{30} = -13.36 + 50.02 \text{ (MFI)}$	0.65	Gonçalves et al., 2006
22° 55' 12"S	43° 25' 12"W	Rio de Janeiro	RJ	17	40	1,280	4,439	$El_{30} = 3.89 + 37.76 \text{ (MFI)}$	0.79	Gonçalves et al., 2006
22° 57' 36"S	43° 16' 48"W	Rio de Janeiro	RJ	16	460	2,170	9,331	$El_{30} = -76.27 + 53.31 \text{ (MFI)}$	0.40	Gonçalves et al., 2006
22° 42' 38"S	43° 52' 41"W	Pirai	RJ	18	462	-	6,772	-	-	Machado et al., 2008

Tabela 1 – Estudos de erosividade no Brasil. (Continuação)

Latitude	Longitude	Cidade	Estado	Anos	Altitude	Precipitação	Fator R	Equações	R ²	Autores
30° 23' 0"S	56° 26' 0"W	Quaraí	RS	38	100	1,513	9,292	$El_{30} = -47.35 + 82.72 (MFI)$	0.84	Bazzano et al., 2007
32° 01' 0"S	52° 09' 0"W	Rio Grande	RS	23	15	1,162	5,135	non-significant correlation	-	Bazzano et al., 2010
								$El_{30} = 99.646 + 63.874 (MFI)$	0.77	
28° 39' 0"S	56° 0' 0"W	São Borja	RS	48	99	1,540	9,751	$El_{30} = 55.564 (MFI)^{1.1054}$	0.84	Cassol et al., 2008
30° 32' 0"S	52° 31' 0"W	Enc. do Sul	RS	31	420	1,279	5,534	non-significant correlation	-	Eltz et al., 2011
29° 45' 0"S	57° 05' 0"W	Uruguaiana	RS	29	74	1,171	8,875	$El_{30} = -96735 + 81.967 (MFI)$	0.94	Hickmann et al., 2008
								$El_{30} = 330.86 + 34.54 (MFI)$	0.40	
28° 33' 0"S	53° 54' 0"W	Ijuí	RS	31	448	1,667	8,825	$El_{30} = 109.65 (MFI)^{0.76}$	0.53	Cassol et al., 2007
								$El_{30} = 354.71 + 44.927 (MFI)$	0.41	
27° 51' 0"S	54° 29' 0"W	Santa Rosa	RS	29	273	1,832	11,217	$El_{30} = 118.52 (MFI)^{0.8034}$	0.50	Mazurana et al., 2009
								$El_{30} = 238.585 + 22.626 (MFI)$	0.50	
27° 24' 0"S	51° 12' 0"W	Campos Novos	SC	10	947	1,754	6,329	$El_{30} = 59.265 (MFI)^{1.087}$	0.86	Bertol, 1994
27° 49' 0"S	50° 20' 0"W	Lages	SC	10	953	1,549	5,790	-	-	Bertol et al., 2002
22° 37' 0"S	52° 10' 0"W	Teod. Sampaio	SP	19	255	1,282	7,172	$El_{30} = 106.8183 + 46.9562 (MFI)$	0.93	Colodro et al., 2002
22° 31' 12"S	47° 2' 40"W	Campinas	SP	22	670	1,280	6,738	$El_{30} = 68.730 (MFI)^{0.841}$	0.98	Lombardi Neto and Moldenhauer, 1992
23° 13' 0"S	49° 14' 0"W	Piraju	SP	23	571	1,482	7,074	$El_{30} = 72.5488 (MFI)^{0.8488}$	0.93	Roque et al., 2001
24° 17' 0"S	47° 57' 0"W	Sete Barras	SP	9	30	1,434	12,664	$El_{30} = 316.20 + 55.40 (MFI)$	0.98	Silva et al., 2009b
24° 24' 0"S	47° 45' 0"W	Juquiá	SP	7	60	824	6,145	$El_{30} = 207.21 + 40.65 (MFI)$	0.90	Silva et al., 2009b
21° 16' 58"S	47° 0' 36"W	Mococa	SP	-	-	-	-	$El_{30} = 111.173 (MFI)^{0.691}$	0.98	Carvalho et al., 1991

Fonte: Oliveira et. al (2013)

Desta forma, as equações foram georeferenciadas e inseridas no ArcGIS, permitindo fazer uma análise das áreas de influência das equações determinadas a partir do método dos polígonos de Thiessen (Figura 4).

O método foi desenvolvido no início do Século XX, pelo engenheiro americano Thiessen, com objetivo de determinar a precipitação média de uma área - no caso, uma bacia hidrográfica - onde as medições de chuvas são pontuais e não estão distribuídas de forma homogênea. De maneira simplificada, o método dos polígonos de Thiessen determina uma área representativa entorno de cada local onde há registro de precipitação. O tamanho destas áreas - polígonos - é determinado de acordo com as distâncias entre cada medida e seus limites são desenhados de modo que sejam equidistantes de cada local de registro de chuvas. Uma vez determinados os polígonos representativos de cada dado de precipitação, é possível determinar a precipitação média em toda área de estudo (DAVIE, 2002).

No presente trabalho, o método dos polígonos de Thiessen foi utilizado para determinar polígonos em torno dos pontos com as equações de erosividade estudadas por Oliveira et. al. (2012). Desta maneira, os parâmetros necessários para o cálculo da erosividade de uma determinada equação seriam definidos a partir das estações pluviométricas que estiverem localizadas dentro da área de influência daquela equação.

O método dos polígonos de Thiessen foi adotado devido a facilidade de delimitar as áreas entorno das equações de erosividade, definindo sua região de influência. No entanto, este modelo foi desenvolvido para áreas de relevo uniforme e, por isso, pode apresentar limitações. A delimitação das áreas não considera, por exemplo, a diferença de altitude entre dois pontos, característica que interfere na precipitação e, conseqüente, erosividade.

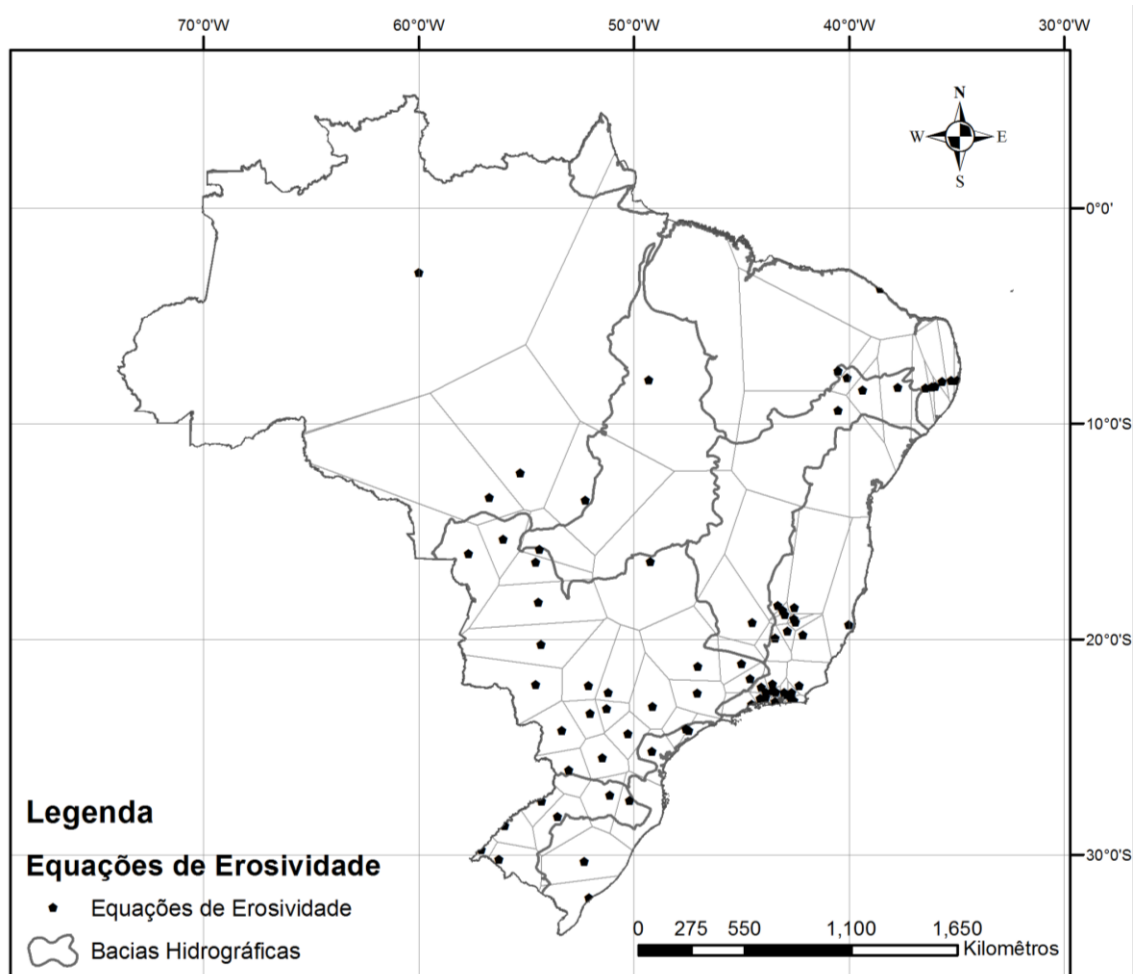


Figura 4 - Áreas de influências das equações de erosividade.

Fonte: Oliveira et al. (2011); ANA (2014)

O mapa das áreas de influência das equações de erosividade foi obtido utilizando todos os estudos levantados por Oliveira et al. (2013) (Tabela 1). No entanto, algumas das áreas geradas não apresentaram estações pluviométricas internamente, como exemplificado na Figura 5, e, portanto, não foram utilizadas nos cálculos do Fator R. Os estudos em questão são listados a seguir, identificado o(s) autor(es), ano do estudo e a cidade em que foi realizado:

- Gonçalves et al., 2006; Piraí-RJ;
- Gonçalves et al., 2006; Rio Bonito – RJ;
- Machado et al., 2008; Ribeirão das Lajes – RJ;
- Silva et al., 2010; Antônio Dias – MG;
- Silva et al., 2010; Açucena – MG.

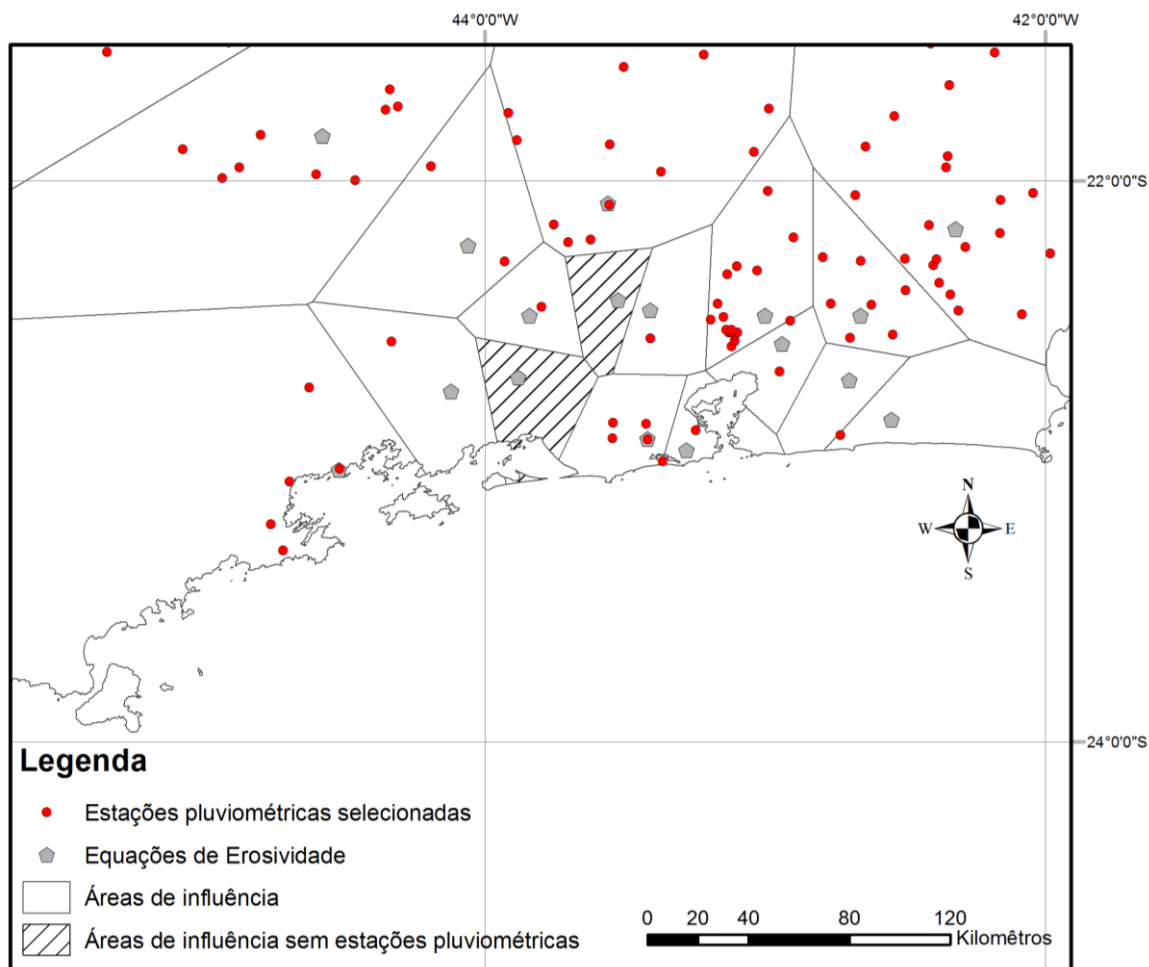


Figura 5 – Áreas de influência que não possuem estações pluviométricas em seu perímetro.

4.3 Cálculo do índice de erosividade

Uma vez determinadas quais equações serão utilizadas para cada estação pluviométrica (item 2.1), aplicam-se as médias de chuvas levantadas no banco de dados para obter o índice El_{30} . Grande parte das equações utiliza como parâmetro o coeficiente de chuvas R_c , que também foi calculado para todas as estações necessárias, utilizando a expressão descrita anteriormente.

As equações de regressão encontradas para os municípios de Aracruz-ES (Martins et al., 2010), Antônio Dias-MG e Peçanha-MG (Silva et al., 2010) utilizaram como parâmetro de entrada a precipitação média anual e, portanto, não foram calculados o R_c para as respectivas estações. Nestes casos, os valores do El_{30} foram calculados utilizando a proporção de precipitação média mensal em relação à precipitação média anual, seguindo a expressão:

$$EI_{30x} = R \cdot \frac{M_x}{P}$$

em que: EI_{30x} é o índice de erosividade mensal do mês x ($MJ.mm.h^{-1}.ha^{-1}.mês^{-1}$); R é o índice de erosividade anual ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$); M_x , precipitação média do mês x (mm); e P é a precipitação média anual (mm).

Inicialmente, foram obtidos os valores de EI_{30} para cada mês do ano e o índice de erosividade anual (Fator R) foi calculado a partir do somatório dos valores de erosividade mensais.

Em alguns estudos apresentados por Oliveira et al. (2013), foram desenvolvidas pelo menos duas equações para o cálculo do índice de erosividade utilizando diferentes técnicas de regressão. Para cada equação descrita foi também apresentado o coeficiente de determinação encontrado (R^2) pelos respectivos autores entre os valores anuais de erosividade e os parâmetros de entrada da equação (precipitação média anual ou coeficiente de chuvas). Nestes casos, optou-se inicialmente pela equação que apresentou o maior valor de R^2 para o cálculo do EI_{30} .

Como uma forma preliminar de validação dos resultados, comparou-se os valores de erosividade obtidos aqueles apresentados por Oliveira et al. (2013), uma vez que os valores do Fator R apresentados para cada estudo (Tabela 1) foram obtidos utilizando o método originalmente proposto por Wischmeier e Smith (1978) e, portanto, tratam-se de valores observados de erosividade.

4.4 Mapa de erosividade

Para a elaboração dos mapas de erosividade do Brasil, os índices de erosividade obtidos foram georeferenciados, anexando os valores de EI_{30} e R às estações pluviométricas selecionadas. Em seguida, os dados de erosividade foram interpoladas por meio de krigagem ordinária com objetivo de estimar os valores de erosividade para os locais não amostrados dados, utilizando o programa ArcGis. O mapa de erosividade anual do Brasil foi elaborado a partir da interpolação dos valores do Fator R , enquanto os mapas de erosividade mensais foram obtidos a partir dos valores de EI_{30} referentes a cada mês do ano.

A validação do mapa de erosividade anual gerado foi feita por meio do *cross-validation*. O método consiste na remoção de um valor componente da base de dados e a realização da estimativa para as regiões não amostradas, como é feito

usualmente. Em seguida, faz-se uma comparação entre o valor real e o estimado para aquele ponto removido. O procedimento é repedido para todos os pontos da base de dados.

A ferramenta de geoestatística utilizada pelo ArcGis realiza o *cross-validation* antes de gerar a superfície de interpolação desejada, gerando diversos gráficos de dispersão que permitem avaliar a confiabilidade dos dados estimados. No presente trabalho, foi utilizado o gráfico de dispersão dos valores estimados em função dos valores amostrados (Figura 6) para validar os valores estimados de erosividade.

Em um modelo ideal, os valores estimados após a realização do *cross-validation* deveriam coincidir com os valores reais, inicialmente inseridos no programa. Desta forma, o gráfico entre os valores estimados e amostrados deveria gerar uma reta com inclinação 1:1, partindo da origem. (linha cinza - Figura 6). No entanto, a prática mostra que os valores não coincidem completamente, gerando uma linha de tendência linear que desvia da situação ideal (linha azul - Figura 6). De maneira geral, a inclinação da reta obtida tende a ser menor que 1, uma vez que o método da krigagem tende a subestimar os valores elevados da base de dados analisados, e superestimar os valores pequenos.

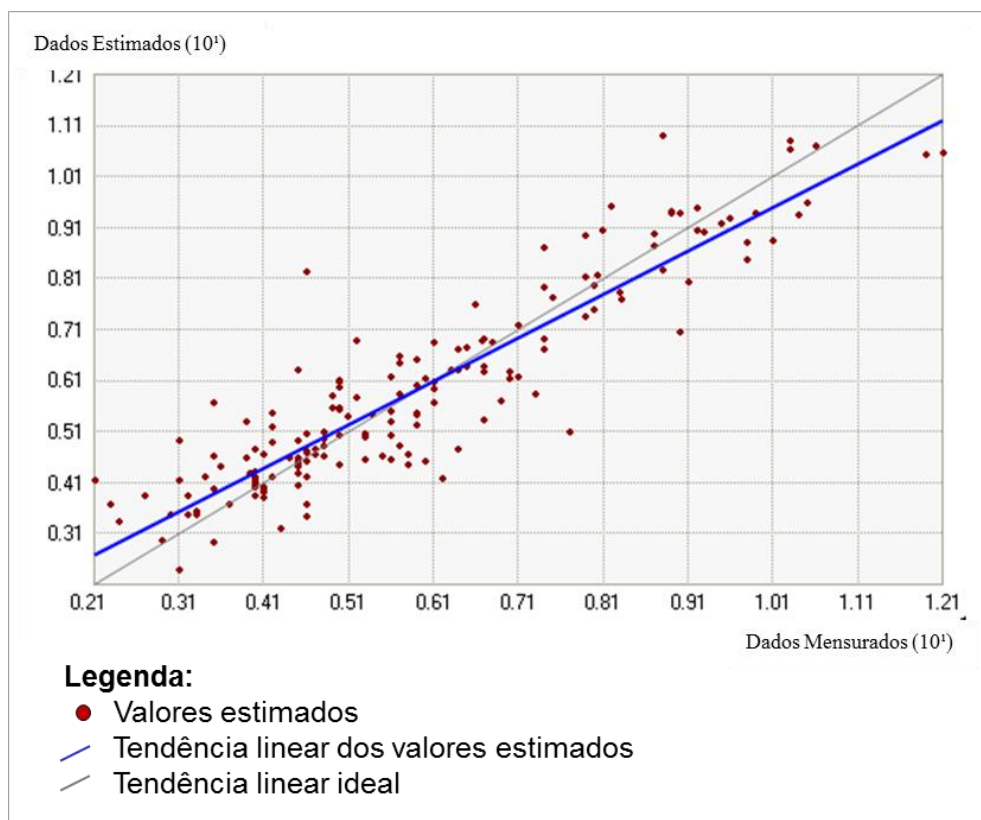


Figura 6 - Gráfico de dispersão dos valores estimados e valores amostrados, utilizando o método do "cross-validation".

Fonte: ArcGIS (2014)

5 Resultados e Discussão

5.1 Banco de Dados

Conforme descrito anteriormente, a Agência Nacional das Águas forneceu as medições mensais de chuvas de 8.587 estações pluviométricas. Deste total, somente 1.521 estações apresentaram série histórica igual ou superior a 20 anos, o que representa aproximadamente 20% do total de estações disponibilizadas.

As estações pluviométricas concentram-se no litoral, especialmente das regiões sul e sudeste, enquanto as regiões norte e centro-oeste possuem uma cobertura precária de monitoramento das chuvas (Tabela 2 e Figura 7). Em particular, a bacia amazônica apresenta a maior área territorial, no entanto, apresentou série histórica mais curta de dados e a menor densidade de estações, em relação à área.

Também se pode destacar a Bacia 6 (Rio Paraná) que, embora apresente o maior número de estações pluviométricas selecionadas, sua cobertura de dados não está entre as mais elevadas. Isto acontece, pois esta bacia possui a segunda maior área territorial, cobrindo desde o litoral do estado de São Paulo, até a divisa com Bolívia, Paraguai e Argentina. Além disso, as estações estão concentradas na região sudeste que está inserida na bacia, enquanto a região centro-oeste é escassa em dados de chuvas, mesmo pluviométricos.

Tabela 2 – Extensão média das séries históricas de dados e densidade de estações por bacia

<i>Bacia</i>	<i>Série Histórica Média (anos)</i>	<i>Área da Bacia (10⁶.km²)</i>	<i>Número de Estações Selecionadas</i>	<i>Relação de estações por área (unid./10⁶.km²)</i>
Rio Amazonas	24	3.870	123	32
Rio Tocantins	31	0.919	161	175
Atlântico, Trecho N/NE	32	0.894	130	145
Rio São Francisco	39	0.639	249	390
Atlântico, Trecho E	39	0.603	333	552
Rio Paraná	33	1.243	372	299
Rio Uruguai	35	0.175	110	630
Atlântico, Trecho SE	40	0.188	43	229

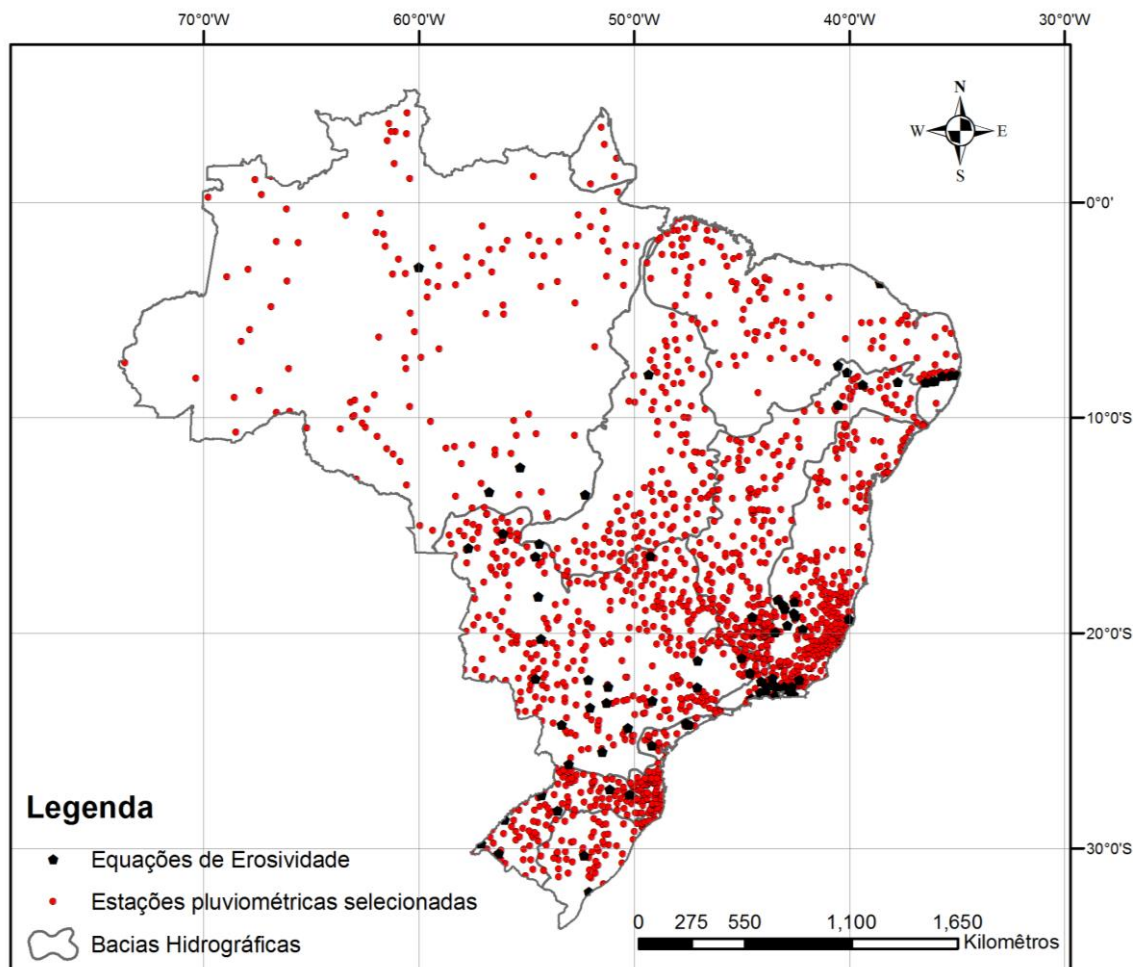


Figura 7 - Estações pluviométricas selecionadas para o cálculo do índice de erosividade.

O banco de dados pluviométricos foi montado a partir das medições de chuvas de cada ano completo de dados para cada estação selecionada. As precipitações médias foram obtidas através da média aritmética das precipitações, tanto as mensais quanto as anuais, em relação ao número de anos componentes da série histórica da estação.

Como mencionado no item 2, a maioria das equações de erosividade utilizam como principal parâmetro o coeficiente de chuvas, R_c , ou índice modificado de Fournier. Por isso, também foram incluídos no banco de dados, os valores médios de precipitação referentes a cada mês, possibilitando o cálculo do coeficiente.

Devido ao grande volume de dados, os resultados obtidos serão apresentados por meio das médias por bacia hidrográfica, de modo a facilitar sua interpretação. As Tabelas 3 e 4 a seguir apresentam as precipitações médias anuais e mensais, além das médias de chuvas de cada mês e o coeficiente de chuvas.

Ao analisar as precipitações médias de cada mês (Tabela 3), nota-se que, de forma geral, as estações do ano no país estão bem definidas, apresentado maiores precipitações entre os meses de janeiro e março, e um período de estiagem entre julho e setembro. Destacam-se desta análise as bacias 7 e 8, que se encontram na região sul do país, em que os índices de chuvas se mantêm praticamente constantes ao longo do ano, sem uma distinção clara entre as estações chuvosas e secas.

Como esperado, os maiores valores anuais de precipitação foram registrados na Bacia Amazônica (Bacia 1), que apresentou precipitação mínima de aproximadamente 80 mm no mês de agosto, máxima de 281 mm em março, e precipitação média anual de 2.143 mm.

As menores medições anuais de chuvas foram registradas na Bacia 4 (Rio São Francisco), cuja área está parcialmente inserida na região do sertão nordestino. Nesta bacia, a precipitação máxima mensal foi de 222 mm, no mês de dezembro, mínima de 10 mm no mês de agosto, e precipitação anual de 1.107 mm.

No entanto, os menores valores de precipitação mensal foram encontrados na Bacia 2, do Rio Tocantins, que apresentou em julho média de 4,22 mm. A mesma bacia também registrou o maior valor de precipitação mensal, no valor de 279 mm no mês de janeiro.

Tabela 3 – Médias mensais de precipitação por bacia hidrográfica.

BACIA	Precipitação Média Mensal (mm)	Precipitação média referente a cada mês (mm)											
		<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
Rio Amazonas	178.61	263.67	261.63	281.11	240.66	186.34	120.69	91.65	79.93	96.50	135.42	170.00	215.03
Rio Tocantins	130.92	279.05	234.34	232.67	119.47	35.43	7.89	4.22	9.12	44.64	127.64	205.64	270.94
Atlântico, Trecho N/NE	126.59	190.09	209.41	274.52	243.08	164.97	95.95	75.53	45.21	32.46	36.07	50.99	100.85
Rio São Francisco	92.26	203.57	138.70	142.06	62.00	27.73	13.44	12.11	10.18	29.35	79.06	166.19	222.77
Atlântico, Trecho E	104.81	175.28	118.49	139.98	94.45	64.41	47.93	48.78	40.73	58.86	99.83	167.97	200.96
Rio Paraná	119.88	235.09	189.14	170.01	91.39	66.05	39.16	27.57	31.48	72.58	126.86	166.78	222.45
Rio Uruguai	144.26	154.36	153.46	131.82	145.76	136.43	132.60	134.44	120.85	154.30	182.97	144.22	139.93
Atlântico, Trecho SE	131.94	182.13	175.82	146.28	109.15	103.19	103.77	113.50	102.48	134.31	143.87	122.08	146.70
Média		210.41	185.12	189.81	138.25	98.07	70.18	63.47	55.00	77.87	116.47	149.23	189.95

Tabela 4 – Médias anuais de precipitação e coeficiente médio de chuva por bacia hidrográfica.

BACIA	Precipitação Média Anual (mm)	Coeficiente de chuva R_c (mm)											
		<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
Rio Amazonas	2,143.29	35.72	34.43	39.24	28.67	20.01	11.49	7.53	4.81	4.87	9.70	15.62	24.86
Rio Tocantins	1,571.06	50.17	35.08	34.71	9.94	1.03	0.06	0.02	0.07	1.36	10.51	27.36	47.50
Atlântico, Trecho N/NE	1,519.12	25.30	30.04	52.07	40.12	19.46	8.63	6.42	2.22	0.98	1.16	2.65	8.16
Rio São Francisco	1,107.16	38.36	17.73	19.23	4.18	1.34	0.76	0.60	0.26	0.91	6.01	26.08	46.43
Atlântico, Trecho E	1,257.68	26.46	11.80	15.92	7.76	4.75	3.19	3.04	1.88	3.01	8.22	24.04	34.79
Rio Paraná	1,438.58	39.57	25.38	20.72	6.06	3.69	1.71	0.91	0.97	4.05	11.39	19.85	35.49
Rio Uruguai	1,731.15	13.88	13.76	10.19	12.84	10.87	10.24	10.59	8.67	13.86	19.47	12.10	11.44
Atlântico, Trecho SE	1,583.28	21.94	20.26	14.09	7.83	6.88	7.29	8.77	7.09	11.59	13.18	9.48	13.91

A distribuição de chuvas ao longo do ano é o principal fator que influencia nos valores dos coeficientes de chuvas, como pode ser observado na Tabela 4. A Bacia 2, por exemplo, apresenta os maiores e menores valores dos coeficientes de chuvas entre todas as bacias, assim como também apresenta as maiores e menores medições de chuvas, como apresentado anteriormente.

É importante lembrar que o potencial erosivo das chuvas não depende somente de sua quantidade, sendo sua intensidade o principal parâmetro para determinar o valor da erosividade. Por isso, torna-se relevante destacar que a concentração de chuvas em determinados períodos do ano por interferir significativamente nos valores calculados da erosividade.

5.2 Índice de Erosividade da chuva

Uma vez consolidado o banco de dados, calcularam-se os índices de erosividade EI_{30} para cada estação selecionada, utilizando as equações levantadas por Oliveira et al. (2013) (Tabela 1) e considerando as áreas de influência de cada estação, conforme apresentado na Figura 4.

Para os municípios de São Borja-RS (Cassol et al., 2008), Ijuí – RS (Cassol et al., 2007), Santa Rosa – RS (Mazurana et al., 2009) e Campos Novos – SC (Bertol, 1994) foram determinadas duas equações de erosividade utilizando diferentes métodos de regressão. Para estes casos, optou-se inicialmente por calcular os índices de erosividade utilizando aquelas equações que apresentaram maior valor de R^2 , seguindo a metodologia descrita no capítulo de Materiais e Métodos. No entanto, ao comparar os valores de erosividade estimados pelas equações de regressão com os valores de erosividade observados pelos respectivos autores, notou-se uma divergência significativa dos resultados, que apresentaram valores abaixo do esperado.

Com isso, os valores anuais de erosividade (Fator R) foram novamente estimados utilizando a outra equação proposta, com índice de correlação inferior. Desta vez, os resultados obtidos ficaram mais próximos daqueles apresentados pelos autores das equações. Os resultados obtidos também se mostraram mais próximos àqueles apresentados no mapa de erosividade elaborado por Silva (2004).

Tabela 5—Índices de erosividade anual e mensal das bacias hidrográficas brasileiras.

BACIA	R-FACTOR	<i>El₃₀ - Erosividade Média Mensal (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹)</i>											
		<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
Rio Amazonas	12,488.81	1,513.63	1,520.59	1,710.65	1,443.65	1,098.23	739.32	583.83	499.40	552.81	742.91	915.09	1,168.72
Rio Tocantins	10,274.21	1,869.59	1,452.21	1,448.96	637.62	274.69	213.56	208.20	217.02	304.67	659.62	1,197.56	1,790.51
Atlântico, Trecho N/NE	7,677.58	921.57	1,073.28	1,590.58	1,306.65	781.20	406.62	325.30	218.70	186.47	199.71	248.87	418.62
Rio São Francisco	7,446.74	1,551.66	866.27	898.19	247.44	96.30	66.00	62.51	56.45	109.03	395.97	1,238.19	1,858.74
Atlântico, Trecho E	7,873.74	1,229.99	723.84	877.17	520.56	325.79	229.88	249.53	201.85	308.63	604.45	1,139.07	1,462.98
Rio Paraná	7,924.72	1,497.66	1,080.59	916.44	409.67	312.05	192.23	143.55	152.70	324.08	630.47	891.61	1,373.67
Rio Uruguai	8,703.66	775.05	782.76	652.17	847.08	680.82	629.58	617.78	511.72	773.54	1,055.94	720.11	657.12
Atlântico, Trecho SE	6,528.70	872.59	802.20	634.79	431.21	393.87	397.27	428.47	382.44	517.82	573.64	476.53	617.87

5.3 Mapa de erosividade do Brasil

Os valores de erosividade obtidos foram inseridos no ArcGis, associando cada valor de erosividade à estação pluviométrica que forneceu os dados de chuvas para sua estimativa. Os índices de erosividade para regiões carentes de dados foram estimados por meio de krigagem ordinária. O método de interpolação foi ajustado de modo que, para obter os valores estimados ao redor de cada estação, foram consideradas no mínimo duas estações próximas e no máximo oito. O mapa de erosividade do Brasil foi elaborado a partir da superfície gerada utilizando o método geoestatístico e está apresentado em classes de erosividade para facilitar a visualização dos resultados (Figura 11).

Também foram incluídas no programa as médias de precipitação anual e mensal que compuseram o banco de dados, a fim de comparar uma possível relação entre a quantidade de chuvas e os índices de erosividade. O mapa da precipitação média anual do país (Figura 9) foi elaborado seguindo os mesmos métodos e condições estabelecidas para o mapa de erosividade. Se comparado ao mapa de precipitação elaborado pela ANA (Figura 10), é possível notar a semelhança entre os valores apresentados, indicando uma boa estimativa dos dados de precipitação para o país.

A análise da erosividade média anual permite identificar principalmente os locais que merecem atenção nas práticas conservacionistas do solo, onde os índices pluviométricos são altos praticamente todo o ano. De acordo com os resultados obtidos, a região norte apresenta os maiores índices de erosividade, que variam de 12.112 e 22.816 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. O estado do Amapá em especial apresentou os maiores índices de erosividade média anual, com valor mínimo de 18.535 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano. Por outro lado, os menores índices de erosividade se encontram na região nordeste do país e variam entre 1.409 e 3.549 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano.

É possível observar que, nas regiões próximas a linha do equador, os índices de erosividade, assim como a precipitação, aumentam conforme a longitude, na direção oeste. Desta forma, é possível notar com clareza como a Bacia 2, que abrange o estado do Amapá e se estende desde a Ilha do Marajó até o litoral nordestino, pode apresentar o maior e o menor valor de erosividade e de precipitação ao mesmo tempo.

De forma geral, o mapa de erosividade anual das chuvas apresentou os aspectos inicialmente esperados, em que os valores de erosividade estariam, de certa forma, relacionados aos índices pluviométricos, como pode ser facilmente observado nas regiões norte e nordeste do país, que apresentam os maiores e menores índices de erosividade, respectivamente.

A validação dos valores estimados realizada pelo método do *cross-validation* indica que a superfície gerada pela interpolação apresentou boa precisão, uma vez que a curva obtida por meio da regressão linear dos valores estimados e amostrados apresenta pequeno desvio em relação à reta que indica a situação ideal (Figura 8).

Como esperado para interpolações realizadas utilizando o método da krigagem, os menos valores de erosividade foram superestimados, enquanto os maiores foram subestimados.

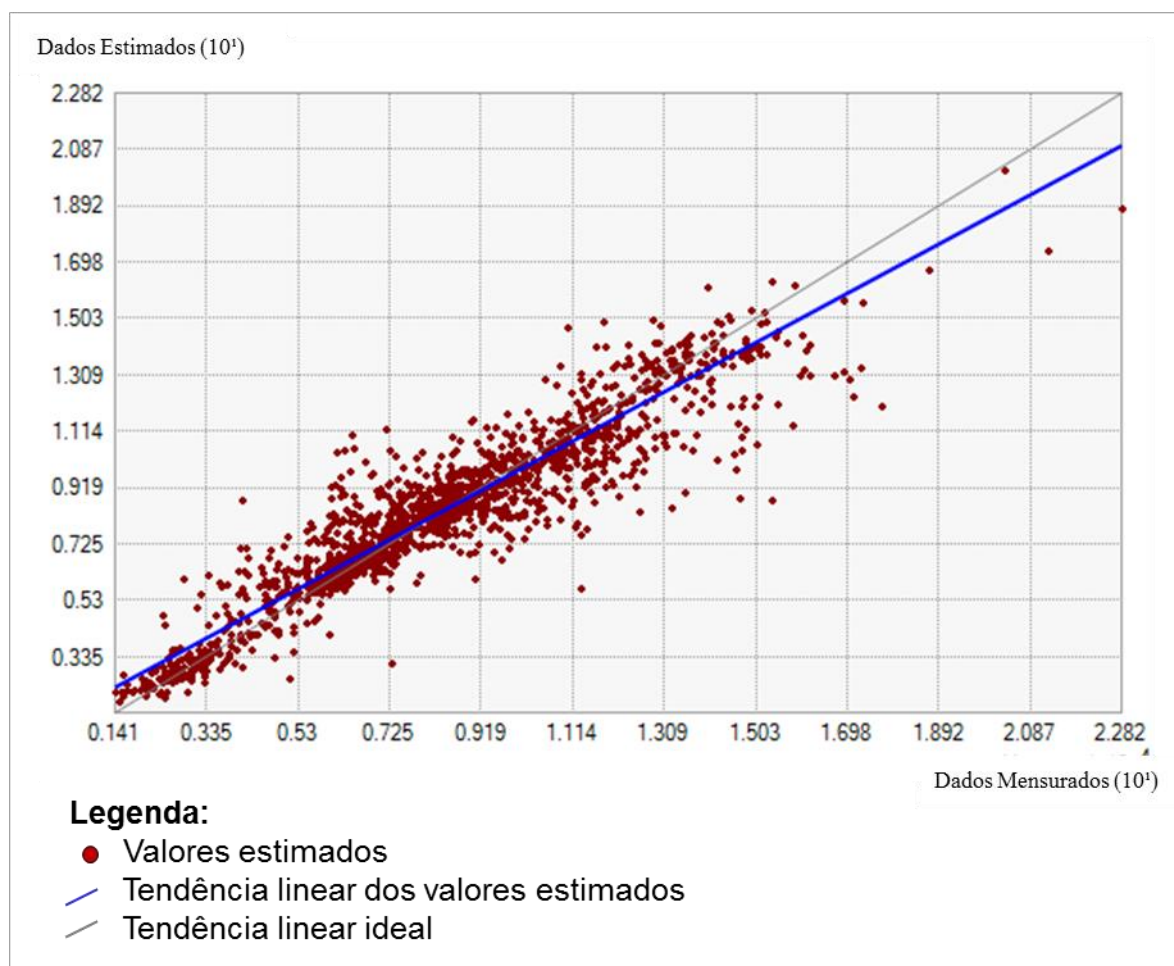


Figura 8 - Gráfico de dispersão dos valores estimados e valores amostrados, utilizando o método do "cross-validation", para o mapa de erosividade anual do Brasil.

No entanto, o mapa de erosividade anual apresentou estimativas inesperadas na área que abrange o norte do estado de Minas Gerais e o sul da Bahia. Trata-se de região classificada como semiárida, e que, embora tenha apresentado baixos valores de precipitação média anual (Tabela 4 e Figura 9), os valores de erosividade encontrados estão na faixa de 12.000 a 14.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano.

Tal incompatibilidade é atribuída à determinação das áreas de influência das equações de erosividade utilizando o método de Thiessen. A área em questão corresponde ao polígono determinado ao redor da equação determinada por Silva et al. (2010) para o município de Santo Antônio do Itambé-MG, cujo potencial erosivo das chuvas é de 15.280 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano. Desta forma, os valores obtidos pela interpolação nesta área de influência se aproximam do valor de erosividade da cidade de origem (Santo Antônio do Itambé - MG), apresentando valores acima do esperado para a região norte de Minas Gerais e sul da Bahia.

Estes resultados inesperados evidenciam a importância de estudos locais para a obtenção dos índices de erosividade, permitindo gerar relações entre erosividade e precipitação que represente as particularidades de cada região. Além disso, esta incompatibilidade deixa clara a limitação associada ao método de Thiessen para delimitação das áreas de influência das equações.

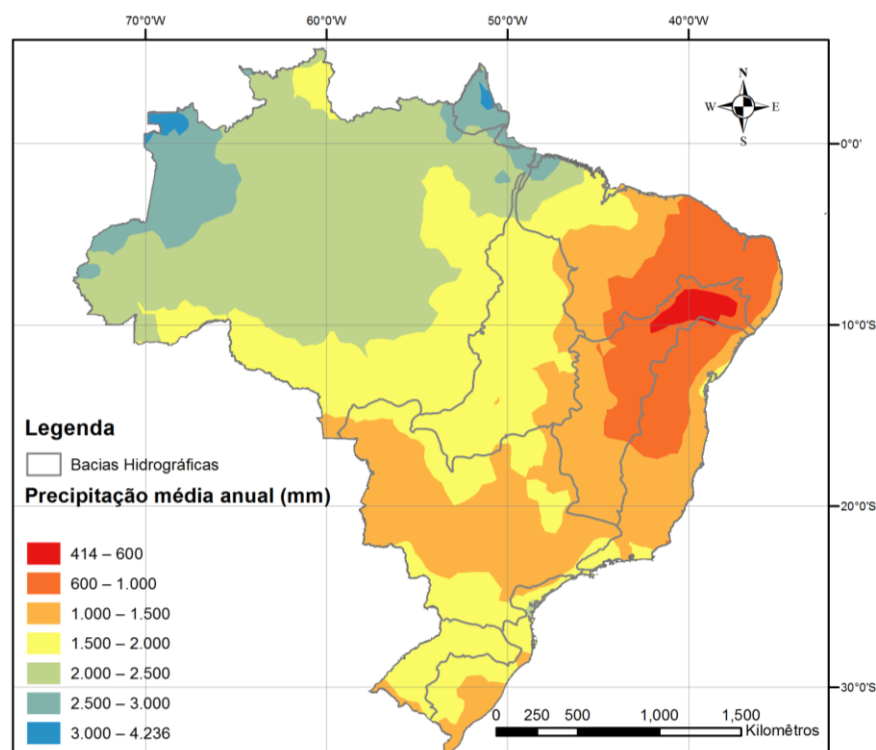


Figura 9 – Mapa da precipitação média anual (mm) do Brasil.

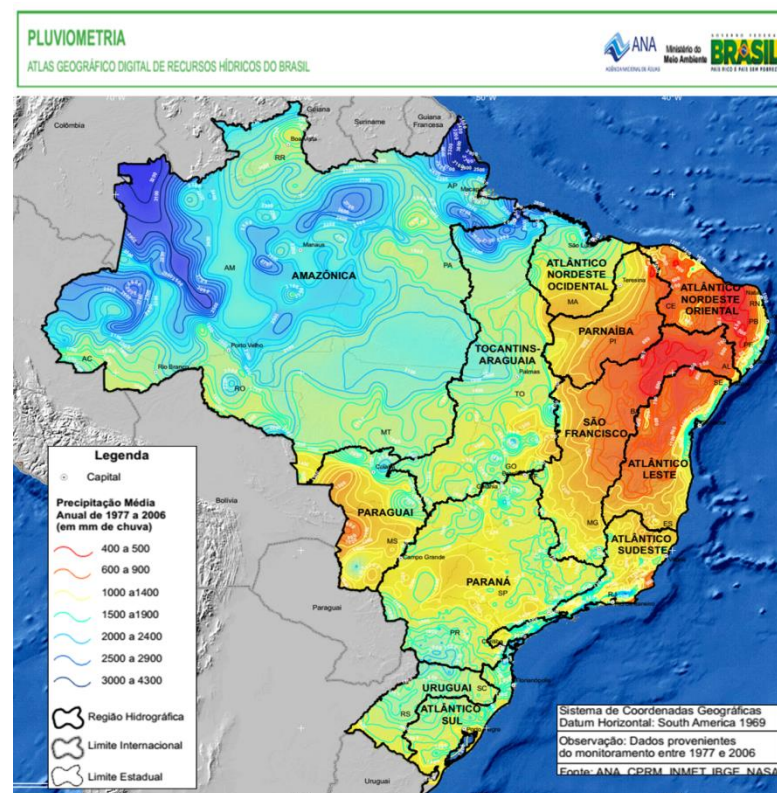


Figura 10 – Mapa da precipitação média anual de 1977 a 2006 – Atlas Geográfico de Recursos Hídricos do Brasil
Fonte: ANA (2014)

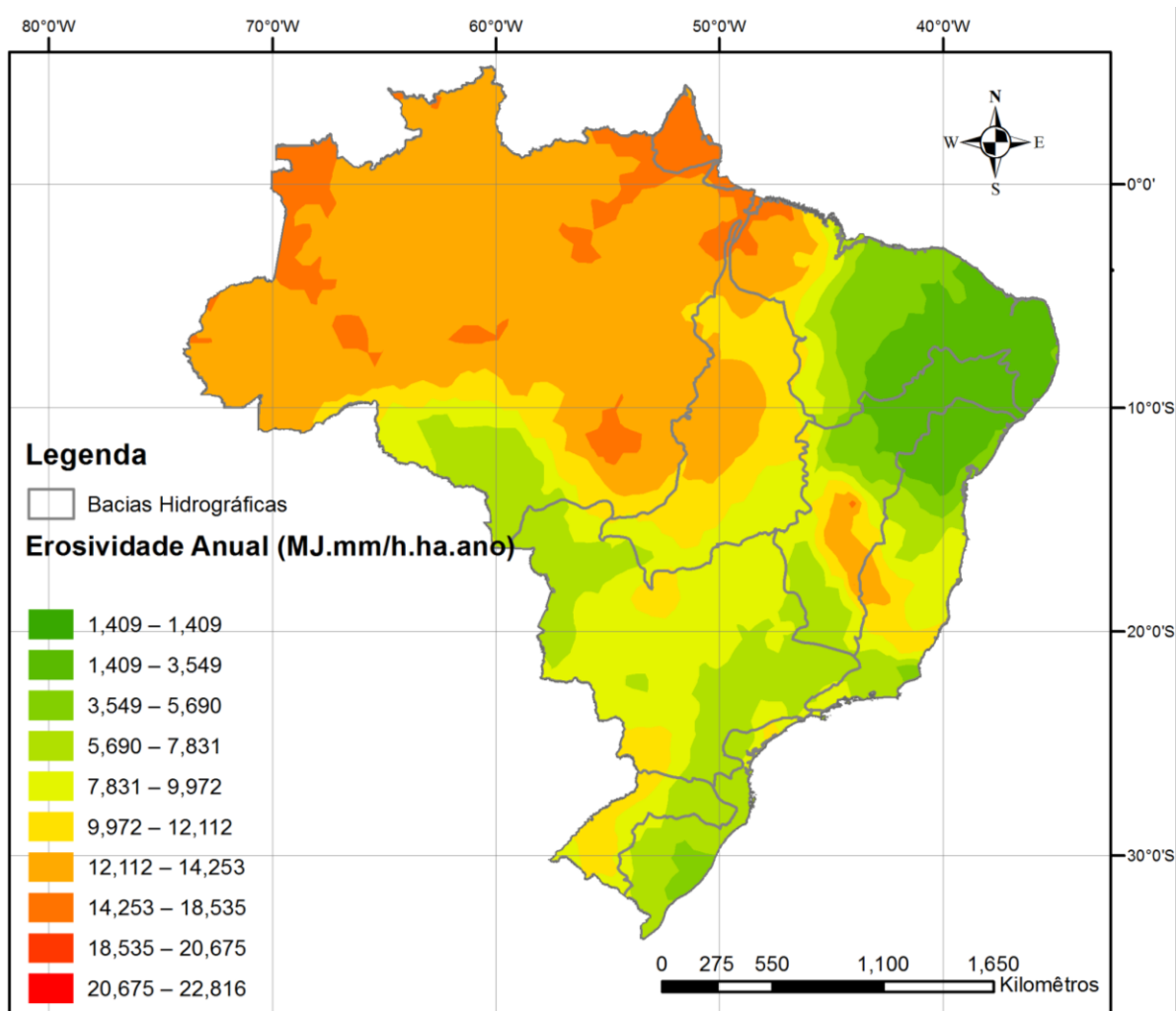


Figura 11 – Mapa do índice de erosividade das chuvas ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) do Brasil.

Outra importante análise dos índices de erosividade pode ser feita em relação à sua distribuição ao longo do ano. Considerando que o uso e manejo do solo são fatores que influenciam diretamente na intensidade dos processos erosivos, o estudo da variação do potencial erosivo das chuvas permite identificar as épocas do ano em que a exposição do solo ou ocupação inadequada podem contribuir para aumento da erosão em determinados locais.

O aspecto da evolução da erosividade mensal (Figura 12) assemelha-se à distribuição da precipitação ao longo do ano, quando é possível distinguir claramente as estações chuvosas e secas (Tabela 3). Nos meses mais chuvosos (entre novembro e março) é possível observar altos índices de erosividade em quase todo território brasileiro, com destaque à região norte do país, que apresenta os maiores índices de precipitação e erosividade praticamente o ano todo.

Excetuam-se desta análise a porção da região nordeste, também conhecida como polígono da seca, e boa parte da área da Bacia 8, inserida na região sul do Brasil. No caso da região nordestina, os índices pluviométricos não são expressivos durante o ano, mesmo na estação das chuvas, e por isso, os índices de erosividade estimados para esta região sempre apresentaram valores inferiores às demais regiões do país.

No caso da Bacia 8, localizada no litoral sul do país, embora a precipitação média anual seja uma das mais elevadas em relação às demais bacias hidrográficas, as precipitações mensais estão distribuídas de maneira mais uniforme no ano (Tabela 3). Este aspecto particular da região refletiu nos valores dos coeficientes de chuvas obtidos (Tabela 4), e consequentemente, na estimativa dos índices de erosividade (Figura 11 e Figura 12).

É importante destacar que, embora a análise do *cross-validation* aponte uma boa estimativa dos valores de erosividade, a confiabilidade dos resultados na Bacia Amazônica torna-se restrita uma vez que a região é representada por praticamente uma única equação de erosividade, como pode ser observado na Figura 4.

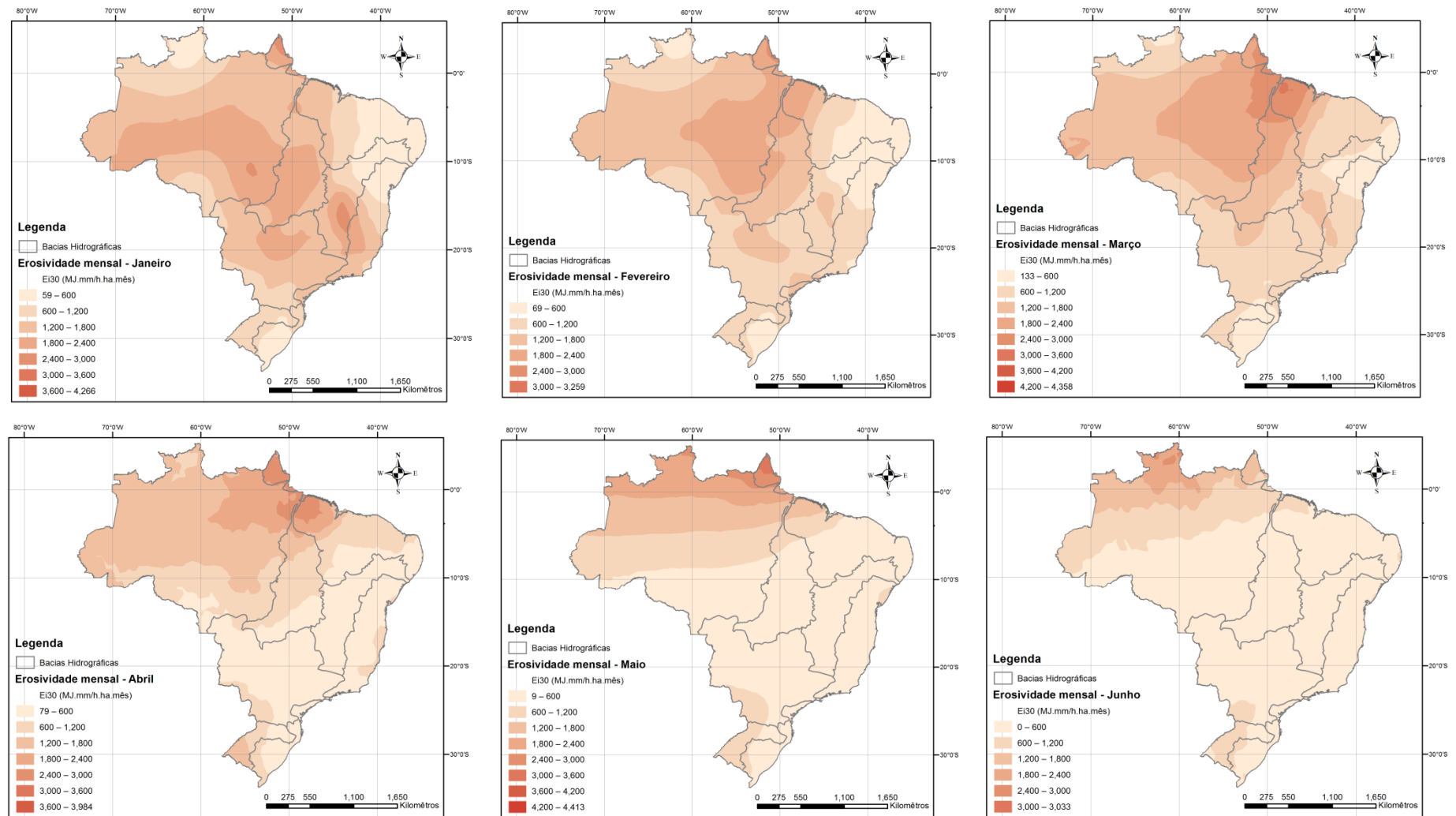


Figura 12–Variação da erosividade média mensal do Brasil ao longo do ano.

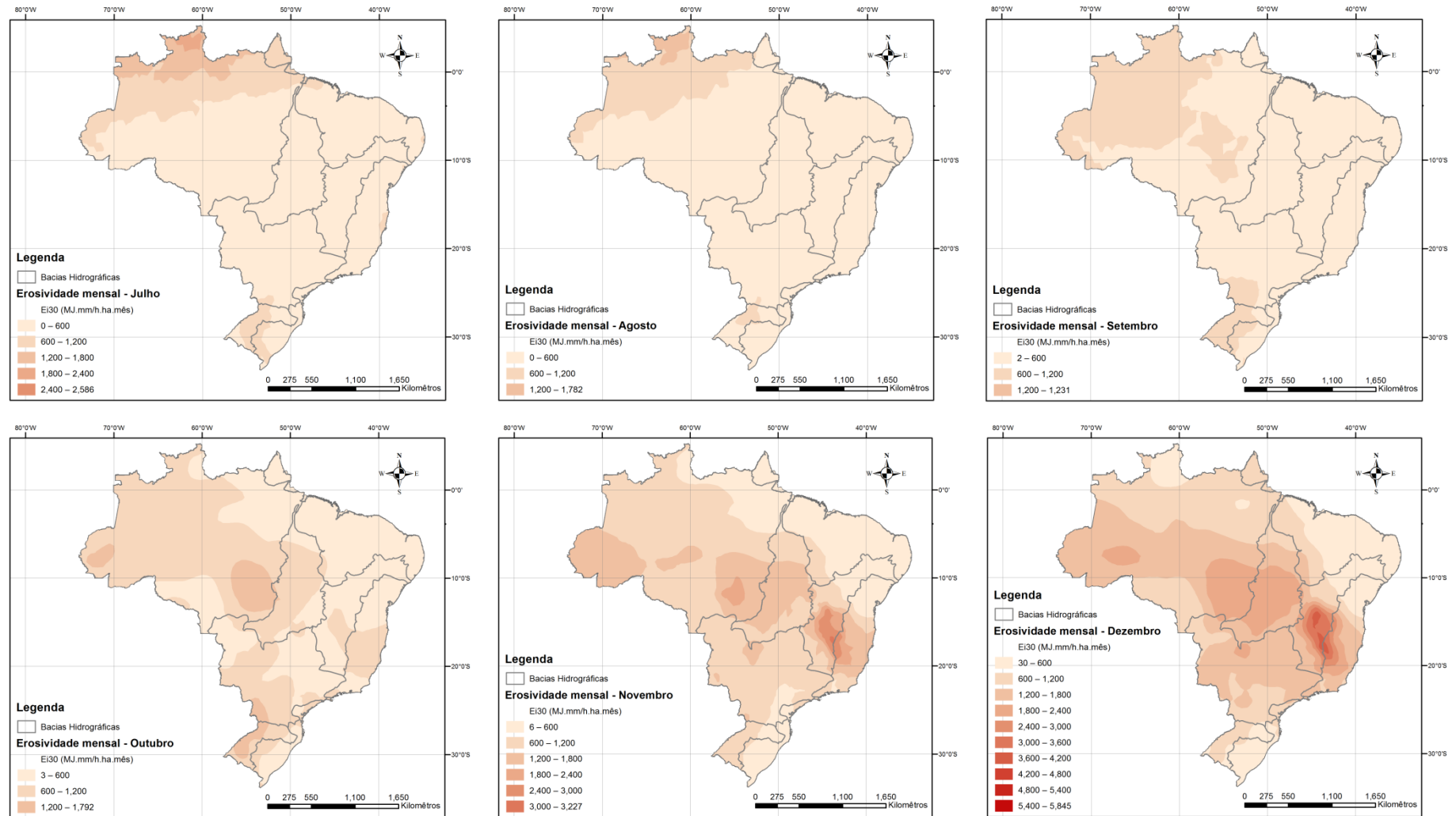


Figura 12–Variação da erosividade média mensal do Brasil ao longo do ano (*continuação*)

6. Conclusão

A escolha pela utilização de dados pluviométricos foi baseada na dificuldade em se obter dados pluviográficos. No entanto, mesmo a obtenção de dados mais simples de chuvas, como os pluviométricos, mostrou-se difícil. No Brasil existem apenas 1.521 estações pluviométricas com séries históricas de, no mínimo, 20 anos de dados consistidos. Muitas estações estão desativadas ou não fazem medições regularmente e grande parte dos dados ainda não foi consistida, dificultando sua utilização.

Uma boa cobertura espacial e temporal dos dados de chuvas pode auxiliar significativamente na precisão dos valores de erosividade estimados por interpolação. Destaca-se que a falta de estações pluviométricas que apresentassem as séries de dados requeridas fez com que alguns estudos de erosividade levantados por Oliveira et al. (2013) não fosse utilizados no presente trabalho.

Outro fator determinante na precisão dos valores estimados é a quantidade e distribuição dos estudos de erosividade, obtendo equações de regressão para o cálculo do potencial erosivo utilizando dados simples de chuvas. Como levanto por Oliveira et al. (2013), as regiões norte e nordeste apresentaram poucos estudos. Este fato pode fazer apresentar incompatibilidades nas estimativas de erosividade, como observado na região da divisa entre os estados de Minas Gerais e Bahia.

De forma geral, os mapas gerados de erosividade do Brasil apresentaram os aspectos esperados, em que os índices de erosividade acompanharam, de alguma forma, os índices de precipitação. A bacia do Amazonas apresentou o maior valor de precipitação média mensal (2.143,29mm), assim como a maior erosividade média anual (12.488,81 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹). O menor valor de erosividade anual foi observado na região sul do país, que apresentou Fator R igual a 6.528,70 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹.

Estes resultados podem ser importantes ferramentas para apontar as regiões do país onde são necessários maiores cuidados com o uso do solo, a fim de prevenir perda de solo por processos erosivos.

Dada a importância do agronegócio para o país e tendo em vista que, em menor ou maior escala, a atividade agrícola é praticada em todas as regiões do Brasil, os mapas da distribuição da erosividade ao longo do ano podem dar um indicativo das

épocas do ano em que o elevado potencial erosivo das chuvas poderia levar a maiores perdas de solo, especialmente se estiver descobertos. Os maiores valores do índice EI30 foram observados entre os meses de novembro a fevereiro, variando de 248,87 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.mês⁻¹, na região nordeste do país, até 1.869,59 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.mês⁻¹, na bacia do Rio Tocantins.

Por fim, os mapas de erosividade elaborados servem como bons indicativos dos locais onde boas práticas de uso e manejo do solo são essenciais para evitar a perda de solo por erosão pluvial. No entanto, estes resultados não substituem o levantamento de dados de precipitação e a elaboração de estudos sobre erosividade numa escala regional, levando em consideração as particularidades de cada localidade e subsidiando tomadas de decisões mais conscientes em relação à prevenção da erosão.

7. Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Água – ANA. *Atlas Geográfico Digital de Recursos Hídricos do Brasil – Pluviometria – Seção 3 – Tema II*. <<http://www2.snirh.gov.br/home/item.html?id=4f691dd983164b7a93afc7c5db4b94a>> Acessado em 05/11/2014.
- Angulo-Martinez, M., Beguería, S. *Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain)*. Journal of Hydrology 379, 111-121. 2009.
- Angulo-Martinez, M.; López-Vicente, M.; Vicente-Serrano, S. M.; Begueria, S. *Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro Basin (NE Spain)*. Hydrology and Earth Systems Sciences, v.13, p.1907-1920, 2009.
- Almeida, A. Q; Ribeiro, A.; Paiva, Y. G.; Rascon, N. J. L.; Lima, E. P. *Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.15, p.354-358, 2011.
- Bertol, I., Schick, J., Batistela, O., Leite, D., Visentin, D. Cogo, N. P. *Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages (SC)*. Revista Brasileira de Ciência do Solo 26, 455-464. 2002.
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. *ArcGis Professional GIS for the desktop*, version 9.2. Software. 2006.
- Capolongo, D.; Diodato, N.; Mannaer, C. M.; Piccarreta, M.; Strobl, R. O. *Analysing temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (southern Italy)*. Journal of Hydrology, v.356, p.119-130, 2008.

- Carvalho, J. R. P.; Sidney, R. V.; Grego, C.R.; *Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, p.443-448, 2009.
- Cogo, N. P., Levien, R., Schwarz, R. A. *Perdas de Solo e Água por Erosão Hídrica Influenciadas por Métodos de Preparo, Classes de Declive e Níveis de Fertilidade do Solo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo v.27, p.743-753. 2003.
- Davie, T. *Fundamentals of Hidrology*. Routledge. 2002.
- Gonçalves, F. A., Silva, D. D., Pruski, F.F., Carvalho, D.F., Cruz E.S. *Índices e espacialização das chuvas para o Estado do Rio de Janeiro*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.10, p.269-276, 2006.
- Hernani, L. C.; Freitas, P. L.; Pruski, F. F.; Maria, I. C. de; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. C. *A erosão e seu impacto*. p.47-60. In: Oliveira, J. R. de. *Perdas de solo, água e nutrientes em um argissolo vermelho-amarelo sob diferentes padrões de chuva simulada*. Dissertação (Mestre em Ciências) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2007.
- Hudson, N. W. *Soil Conservation*. Ithaca, Cornell University Press, 1977. 320p.
- Kinnell, P.I.A.. *Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: a review*. Journal of Hydrology, v.385, p.384–397, 2010.
- Krige, D. G. *A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand*. Chemistry, Metallurgy, Mining Society South Africa, v.52, p.151-163, 1951.
- Lombardi Neto, F; Moldenhauer, W.C. *Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP)*. Bragantia v.51, p.189-196, 1992.

Lee, J-H., Heo, J-H., *Evaluation of Estimation Methods for Rainfall Erosivity based on Annual Precipitation in Korea*, Journal of Hidrology (2011), doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.031

Mannaerts, C. M., Gabriels, D. *Rainfall erosivity in Cape Verde*. Soil & Tillage Research v.55, p.207-212, 2000.

Mello, C. R.; Lima, J. M.; Silva, A. M.; Mello, J. M.; Oliveira, M. S. *Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p. 925-933, 2003.

Mello, C. R.; Silva, A. M. da. *Modelagem estatística da precipitação mensal e anual e no período seco para o estado de Minas Gerais*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.68-74, 2009.

Melo Junior, J. C.; Sediyaama, G. C.; Ferreira, P. A.; Leal, B. G.; Minusi, R. B.; *Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, p.417-425, 2006.

Montebeller, C. A.; Ceddia, M. B.; Carvalho, D. F.; Vieira, S. R.; Franco, E. M. *Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Rio de Janeiro, Brazil*. Engenharia Agrícola, v.27, p.426-435, 2007.

Moreira, M. C., Cecílio, R. A., Pinto, F. A. C., Pruski, F.F. *Desenvolvimento e Análise de uma Rede Neural Artificial para Estimativa da Erosividade da Chuva para o Estado de São Paulo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo v.30, p.1069-1016. 2006.

Morgan, R. P. C. *Soil erosion and conservation*. Blackwell Publishing. 2005

- Neto, L. M.; Vaz, M. P.; Crestana, S. editores. *Instrumentação avançada em ciência do solo*. Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007.
- Oliveira, P. T. S.; Wendland, E.; Nearing, M. A; *Rainfall erosivity in Brazil: A review*. CATENA, v.100, p.139-147, 2012.
- Oliveira, P. T. S.; Rodrigues, D. B. B.; Sobrinho, T. A.; Carvalho, D. F.; Panachuki, E. *Spatial variability of the rainfall erosive potential in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil*. Eng. Agrícola, Jaboticabal, v.32, n.1, p.69-70. 2013.
- Renard, K. G.; Foster G. R.; Weesies, G. A.; Mccool, D. K.; Yoder, D. C.; *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Losses Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook, v.103. 1997.
- Santos, T. E. M., Montenegro, A. A. A. *Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, n.8, p.871-880. 2012.
- Shamshad, A.; Azhari, M. N.; Isa, M. H.; Wan Hussin, W. M. A.; Parida, B. P. *Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia*. CATENA, v.72, p.423-432, 2008.
- Silva, A.M. *Rainfall erosivity map for Brazil*. Catena, Amsterdam, v.57, n.3, p.251-259, 2004.
- Silva, A. M.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Avanzi, J. C.; Ferreira, M. M. *Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais*. Rev. Bras. Ciênc. Solo., Viçosa, v. 33, n.6, nov./dez. 2009

- Silveira, L. L. L. *Elaboração de carta de susceptibilidade à erosão das bacias dos rios Araraquara e Cubatão-SP, escala 1:50.000*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- Terrence, J. T.; George, R. F.; Kenneth, G. R. *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control*. John Wiley & Sons. 2002.
- Vieira, S. R., Lombardi Neto, F. *Spatial variability of rainfall erosivity for the State of São Paulo*. *Bragantia*, v.54, p.405-412, 1995.
- WEPP - Water Erosion Prediction Project. <http://farmprogress.com/story-how-reduce-soil-erosion-spring-9-59470>
- Wischmeier, W. H., and Smith D. D. 1978. *Predicting rain fall erosion losses – a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook Nº. 537.