



AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO POTENCIAL DE EROÇÃO LAMINAR EM GRANDES ÁREAS POR MEIO DA EUPS – EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLOS UTILIZANDO NOVAS METODOLOGIAS EM SIG PARA OS CÁLCULOS DOS SEUS FATORES NA REGIÃO DO ALTO PARNAÍBA – PI-MA

Miguel Farinasso

Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF)
SGAN Quadra 601 Lote I – Brasília, DF. CEP.: 70830-901
miguel@codevasf.gov.br

Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Universidade de Brasília (UnB) – Departamento de Geografia
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF. CEP.: 70910-900
osmarjr@unb.br

Renato Fontes Guimarães

Universidade de Brasília (UnB) – Departamento de Geografia
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF. CEP.: 70910-900
renatofg@unb.br

Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Universidade de Brasília (UnB) – Departamento de Geografia
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF. CEP.: 70910-900
robertogomes@unb.br

Verônica Moreira Ramos

Universidade de Brasília (UnB) – Departamento de Geografia
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF. CEP.: 70910-900
vmramos@unb.br

Resumo

A Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS) de Wischmeier & Smith (1978), inicialmente desenvolvida para estimativa quantitativa de perdas de solos para pequenas áreas, hoje é amplamente utilizada para avaliação qualitativa de predição de perdas de solos por erosão laminar em grandes áreas, com o objetivo de se avaliar e identificar áreas susceptíveis à erosão, de forma rápida e econômica, visando o planejamento ambiental. Neste trabalho foi aplicada a EUPS para identificar qualitativamente áreas susceptíveis a erosão laminar na região do Alto Parnaíba (PI-MA). Em termos específicos foram utilizadas diferentes metodologias para os cálculos dos fatores R (krigeagem e IDW) e LS (mapa de área de contribuição pelos métodos D8 e D⁺), com a utilização de SIG, visando identificar as que melhor se aplicam a grandes áreas, e somado a estes dois fatores, foi aplicado um fator de correção em áreas com grades com resolução espacial superiores à 100 m. Assim, mapas temáticos existentes, juntamente com informações de solos, uso da terra, relevo e clima, foram utilizados para a obtenção de mapas identificando áreas susceptíveis à erosão atual e potencial nesta região. Chegou-se à conclusão que a metodologia que melhor se aplica ao cálculo do fator R (erosividade) foi a que utiliza Krigeagem Ordinária, e para o fator LS, a metodologia que utiliza mapa de área de contribuição obtida pelo método D⁺. As áreas mais críticas, com relação a perdas de solos estão

associadas a elevadas declividades, NEOSSOLOS e uso e manejo inadequados. A metodologia se mostrou válida, uma vez que os pontos onde se encontram os maiores índices de perdas de solo foram comparados a pontos observados *in loco*, mostrando boa correlação com as estimativas obtidas.

Palavras-chave: EUPS, Fator Erosividade, Fator Topográfico

Abstract

The Universal Soil Loss Equation (USLE), Wischmeier & Smith (1978), was first developed for the quantitative evaluation of soil loss for small areas. Nowadays, this equation is largely used for the qualitative evaluation in large areas, aiming to identify and evaluate sheet erosion susceptibility. The process is done on a quick and economic way, for environmental planning studies. In this work the USLE was applied to identify in a qualitative way the susceptible areas in the Upper Parnaíba River Valley, in Piauí and Maranhão state. Different methods were used to calculate R, using kriging and IDW interpolate methods and LS, using contribution area map from D8 and D" methods. GIS was used to determine the most appropriated methodologies for the large areas. In this case, it was applied a correction factor in areas with grid size bigger than 100x100m. Thus, using the soil properties information and thematic maps as landuse, relief and climate, were made maps in order to identify areas susceptible to actual and potential soil erosion. The ordinary kriging method gave the best result for R factor and contribution map, obtained by the Dá method, gave the best result for the LS factor. The most critical areas, in relation to the soil loss, are associated to high slopes, NEOSSOLOS and inadequate landuse and management. The results obtained to the highest soil loss index in the study area were compared with local observation and showed a good correlation between then.

Keywords: USLE, Erosivity Factor, Topographic Factor

1. Introdução

O uso antrópico intensifica os processos erosivos pois altera as condições naturais da cobertura vegetal e das propriedades dos solos que se tornam compactados, impedindo a infiltração de água e, conseqüentemente, aumentando o escoamento da água e das partículas (Bertoni e Lombardi Neto, 1990; Primavesi, 1987; Zachar, 1982). Devido a essa preocupação ambiental, muitos modelos matemáticos estão sendo desenvolvidos para descrever e prever a ocorrência desses processos. Esses modelos usam expressões matemáticas que representam os diversos fatores presentes na paisagem: topografia, variáveis meteorológicas, propriedades dos solos e práticas conservacionistas. Pode-se dividir os modelos em dois tipos: (a) modelos empíricos e (b) modelos baseados em processos que consideram as leis físicas e buscam uma maior compreensão dos diferentes sub-processos presentes e suas inter-relações.

Os modelos empíricos são os mais usados no planejamento conservacionista, pela sua simplicidade e disponibilidades de dados. Dentre os modelos empíricos a Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS) é a que possui maior divulgação em estudos de predição de perdas de solos (Wischmeier & Smith, 1978), principalmente pela facilidade de manejo de dados e baixo custo (Molnar & Julián, 1998; Sánchez, 2002; Silva *et al.*, 2004).

Renard *et al.* (1997) citam que até 1954 várias equações de predição de perdas do solo em nível regional e local foram desenvolvidas nos EUA, e foi recomendado pelas autoridades que se fizesse um esforço para a confecção de uma equação

nacional. Assim, em 1954, a ARS (Serviço de Pesquisa da Agricultura) estabeleceu o Centro de dados Nacional de Perdas do Solo na Universidade de Purdue (Lafayette, Indiana). A este centro foi dada a responsabilidade de encontrar, montar e consolidar todos os dados disponíveis de água e erosão do solo em todo os Estados Unidos. Durante anos de pesquisa, vários dados básicos foram concentrados neste local. Os participantes buscaram conciliar as diferenças entre as equações existentes de perdas de solo e estendê-las a áreas onde nenhuma medida de erosão fora realizada. Neste sentido, após o esforço das agências de pesquisa e extensão norte-americanas, surgiu a USLE - Universal Soil Loss Equation (EUPS em português), cujo aperfeiçoamento foi resultado da compilação de dados de perdas do solo por Wischmeier & Smith (1962, 1978). A partir da concepção da EUPS vários modelos de predição de erosão foram desenvolvidos, entre eles: AGNPS (Young *et al.*, 1987), EPIC (Williams, 1990), SWAT (Arnold & Allen, 1996) e KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1980).

Embora a EUPS tenha sua utilização para pequenos talhões, compatível com o uso agrícola, ela pode ser empregada em grandes áreas ou em escalas regionais, permitindo avaliar qualitativamente e geograficamente as áreas de diferentes graus de susceptibilidade à erosão. Stein *et al.* (1987) concluíram que a EUPS, para grandes áreas, não deve ser utilizada como estimativa para quantificar perdas de solo por erosão, mas para uma avaliação qualitativa. Desta forma, nestes estudos regionais os valores de perdas de solo por erosão não podem ser tomados como dados reais, servindo tão somente para categorizar qualitativamente as áreas quanto a sua maior ou menor susceptibilidade à erosão

laminar. Nesta abordagem a EUPS é também um instrumento valioso permitindo auxiliar trabalhos de gestão ambiental.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar qualitativamente o potencial de erosão laminar no Alto Parnaíba por meio da aplicação da EUPS, classificando áreas susceptíveis à esse processo para auxiliar o planejamento ambiental.

Neste propósito foram utilizadas metodologias específicas para a determinação dos seus diferentes fatores. Além disso, esse estudo pretende: (a) identificar, geograficamente, áreas críticas relativas à erosão laminar atual (que considera a cobertura vegetal e as práticas de conservação e manejo do solo) e erosão laminar potencial (que analisa a situação com o solo exposto); (b) comparar duas metodologias para confecção de mapa de erosividade na região do Alto Parnaíba; (c) comparar duas metodologias para confecção de mapa de área de contribuição para cálculo do fator LS da EUPS com vistas ao cálculo da erosão atual e potencial do Alto Parnaíba; e (d) aplicar um fator de correção (Molnar & Julién, 1998) na EUPS visando ao ajuste para grade com células acima de 100 x 100 m. Desta forma, busca gerar informações básicas para orientar e auxiliar o planejamento do uso da terra e na definição de práticas agrícolas adequadas.

2. Área de Estudo

A região fisiográfica do Alto Parnaíba está situada na parte ocidental da região nordeste do Brasil, inserida na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, com área de 133.571 Km² (CODEVASF, 2001) (Figura 1). Desse total, 34,5 % localiza-se dentro do estado do Maranhão e 65,5%, do estado do Piauí. Localiza-se entre os paralelos 6°00' e 11°00' de latitude sul e entre os meridianos 43°00' e 47°30' de longitude oeste. Ao sul, faz divisa com a bacia hidrográfica do rio São Francisco, a oeste, com a bacia do rio Tocantins, a leste, com as bacias dos rios Canindé e Corrente-Itaueira, e, a norte, com a bacia do rio Itapecuruca. Nesta região, ao sul, encontram-se as nascentes do rio Parnaíba, na Chapada das Mangabeiras, entre as divisas dos estados do Piauí, Maranhão e Tocantins, e deságua ao norte desta região. Dentre seus afluentes, destacam-se: Balsas, Gurguéia e Uruçuí-Preto.

De acordo com o Censo Demográfico do IBGE de 2001, a população desta região é de 562.292 habitantes. A maioria da população é urbana, e seus principais centros são: Floriano e Uruçuí, no estado do Piauí, e Balsas, no estado do Maranhão. Sob o aspecto econômico, as principais atividades estão ligadas à agropecuária e mineração, destacando-se a agricultura de sequeiro. Devido ao incremento da fronteira agrícola nesta região nos últimos anos observa-se um aumento dos processos erosivos e assoreamento de rios.

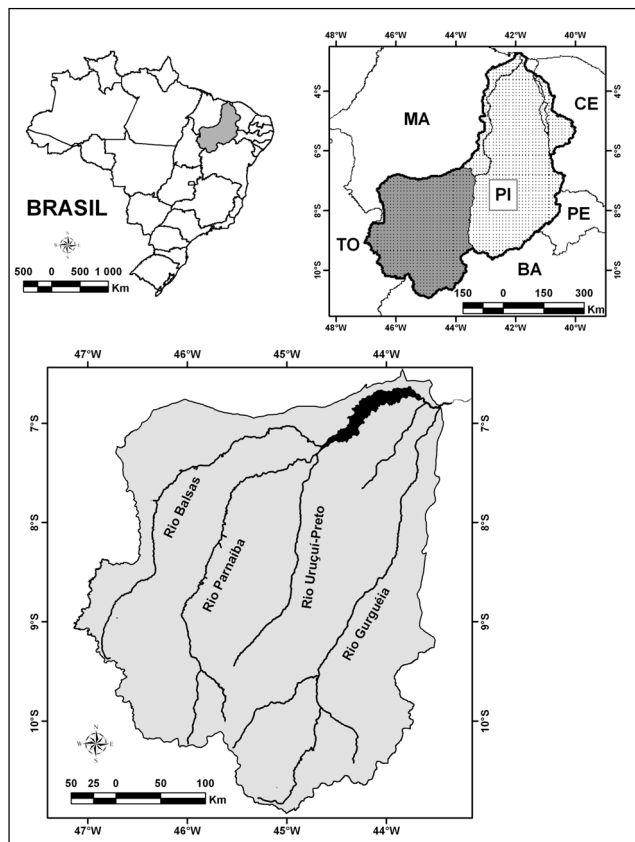


Figura 1 - Localização da região do Alto Parnaíba no Brasil.

3. Metodologia

A formulação da EUPS é uma das mais aceitas e utilizadas para predição de perdas do solo por erosão laminar sendo definida pela seguinte equação (Wischmeier & Smith, 1978):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

Onde “A” é a perda de solo, em ton/ha.ano; “R” é o fator erosividade da chuva, em MJ.mm/(ha.h); “K” é o fator erodibilidade do solo, em ton. ha.h. / ha.(MJ.mm); “L” é o fator comprimento de rampa (adimensional); “S” é o fator declividade, baseado em % de declividade; “C” é o fator uso e manejo do solo (adimensional) e “P” é o fator prática conservacionista. Os próximos tópicos descrevem a metodologia e o material adotado para confeccionar cada um desses atributos no SIG.

3.1. Fator Erosividade da Chuva – Fator R

O fator R é um valor numérico que expressa a capacidade da chuva em uma dada localidade de causar erosão em uma área sem proteção (Wischmeier & Smith, 1962). Estudos realizados em Campinas (SP) demonstram relações do fator R com a média mensal e a média anual de

precipitação, conforme a seguinte equação (Lombardi Neto & Moldenhauer, 1980):

$$EI_{30} = 67,355(r^2 / P)^{0,85} \quad (2)$$

Onde “EI₃₀” é a média mensal do índice de erosividade (MJ.mm/ha.h); “r” é a média do total mensal (mm) e “P” é a média do total anual de precipitação (mm). A erosividade da chuva é obtido pela soma dos valores mensais do índice de erosividade em cada estação pluviométrica:

$$R = \sum EI_{30} \quad (3)$$

Na área de estudo foram utilizados os dados diários de precipitação pluviométrica de 52 (cinquenta e duas) estações com séries históricas que variam de 20 a 30 anos, localizadas no Alto Parnaíba e em regiões limítrofes, pertencentes a rede da Agência Nacional de Águas – ANA. As informações pluviométricas foram convertidos em valores do fator R e interpolados por dois métodos: (a) *Krigeagem* Ordinária utilizando o módulo *Geoestatistical Analyst System*, do software ARCGIS da ESRI e (b) Inverso do Quadrado da Distância (IDW) utilizando o programa ARCINFO. A resolução espacial adotada para a grade regular foi de 200 m.

3.2. Fator Erodibilidade do Solo – Fator K

Wischmeier & Smith (1978) concluíram que alguns solos são mais facilmente erodidos que outros, mesmo que todos os fatores do processo permaneçam constantes. Essa diferença é devido às propriedades inerentes do solo, e é referida como a erodibilidade do solo, expressa pelo fator K da EUPS. As propriedades do solo que influenciam a erodibilidade são aquelas que afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água, e aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento.

Para a confecção do mapa de erodibilidade foi necessário a digitalização e concatenação dos seguintes mapas de solos: (a) mapa de reconhecimento de solos do Estado do Piauí na escala 1:1.000.000 (EMBRAPA,1983); (b) mapa de reconhecimento de solos do Estado do Maranhão na escala 1:1.000.000 (EMBRAPA, 1986) e (c) Levantamento de Recursos Naturais do MME/Radambrasil (1981). No cálculo da erodibilidade foram utilizadas as informações dos parâmetros físico-químicos das classes de solos descritos em 144 perfis e o nomograma de Wischmeier et al. (1971) (Figura 2).

O nomograma utiliza os seguintes parâmetros do solo: porcentagem de silte, areia muito fina (0,002 - 0,10 mm); areia; matéria orgânica; estrutura e permeabilidade (Wischmeier et

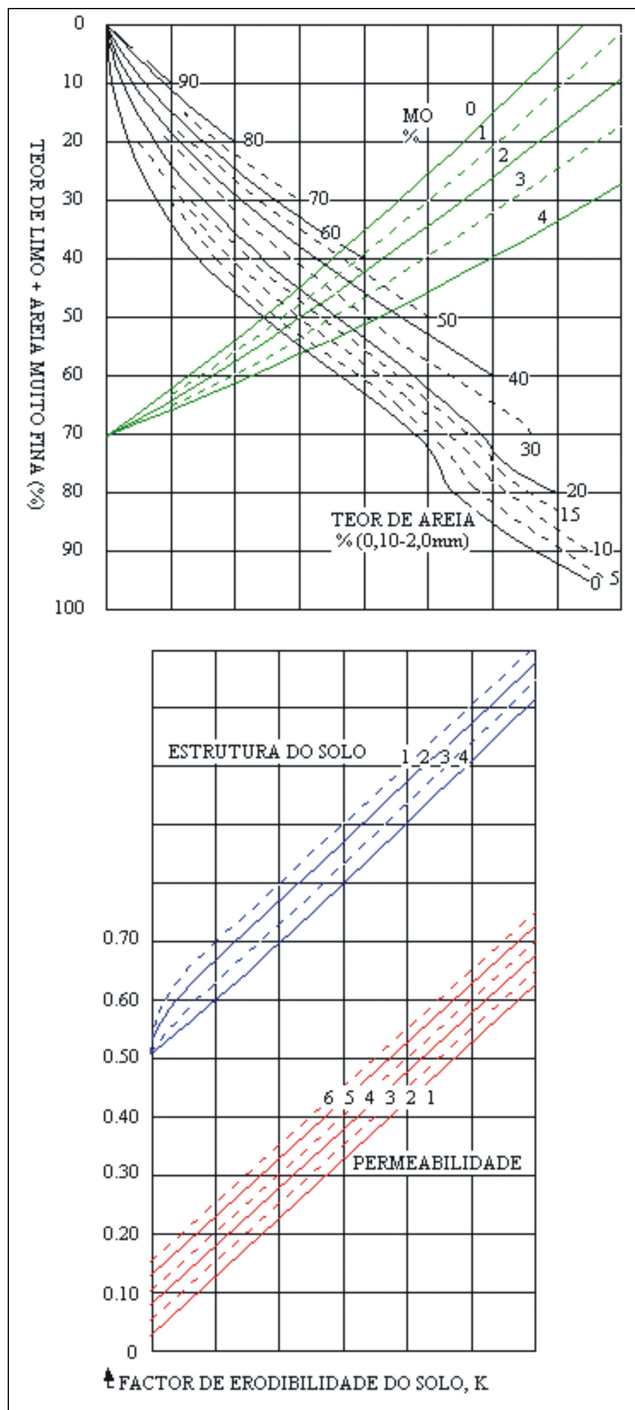


Figura 2 - Nomograma de Wischmeier et al. (1971).

al., 1971). Os atributos utilizados referem-se ao horizonte superficial, uma vez que a EUPS trabalha com erosão laminar. A obtenção da matéria orgânica é obtido pela multiplicação do valor de C orgânico por 1,724. Com propósito de transformar os valores de K do sistema inglês para o sistema internacional foi utilizado o fator de conversão 0,1317.

3.3. Fator Topográfico - Fator LS

De acordo com Wischmeier & Smith (1978), o comprimento de rampa é caracterizado como sendo a distância do ponto de origem do caimento da água até o ponto em que ela decresce, propiciando o início de uma sedimentação em rupturas de uma vertente junto a vales, ou quando vai de encontro a um canal definido. O mesmo pode fazer parte de rede de drenagem ou terraço.

A EUPS utiliza o fator comprimento de rampa (L), que é adimensional, adotando o comprimento de rampa medido em metros, sem a unidade. O fator declividade (S) da EUPS é caracterizado como o ângulo ou o índice da inclinação do terreno. Dentre as variáveis utilizadas no modelo da EUPS, a que possui maior dificuldade para ser estimada em ambiente computacional é o comprimento de rampa. Visando automatizar o processo, várias metodologias vêm sendo propostas. Um conceito que trouxe uma nova abordagem para a estimativa do comprimento de rampa é a área de contribuição obtido a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT). Em decorrência das limitações existentes na concepção original do comprimento de rampa, Moore & Bruch (1986) propuseram uma adequação da variável área de contribuição, a qual permite determinar, com maior precisão, os processos erosivos advindos do fluxo laminar sobre declives. Posteriormente, Desmet & Govers (1996) propuseram um cálculo do fator L, baseado nas equações de Foster & Wischmeier (1974) que é expressa na seguinte equação:

$$L_{ij} = \frac{\left[(A_{ij-in} + D^2)^{m+1} - (A_{ij-in})^{m+1} \right]}{\left[D^{m+2} \cdot x_{ij}^m (22,13)^m \right]} \quad (4)$$

Onde “ L_{ij} ” é o fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i,j); “ A_{ij-in} ” é a área de contribuição da célula em coordenadas (i,j) (m^2); “D” é o tamanho da célula; “x” é o coeficiente função do aspecto para grade de célula em coordenadas (i,j) e “m” é o coeficiente função da declividade para grade de célula com coordenada (i,j).

O coeficiente “m” é obtido a partir de determinadas classes de declividade: (a) $m = 0,5$ se declividade for $> 5\%$; (b) $m = 0,4$ para intervalo de 3 a 5%; (c) $m = 0,3$ para intervalo de 1 a 3 % e (d) $m = 0,2$ para declividade $< 1\%$.

Uma importante discussão metodológica no Fator L é o método utilizado para o cálculo da área de contribuição. No presente trabalho são comparados dois métodos: (a) método D8 que distribui o fluxo de forma direcional e caracteriza-se por ser o modelo mais simples na determinação da direção do fluxo (O’Callaghan & Mark, 1984); e o (b) método D ∞ que calcula a direção de fluxo d’água de acordo com a declividade do terreno, distribuindo o fluxo

proporcionalmente entre as células vizinhas (Tarboton, 1997).

O fator declividade (S) da EUPS é caracterizado como o ângulo ou índice da inclinação do terreno. O Fator LS (Fator Topográfico) é calculado em sistema computacional multiplicando-se o fator L pelo fator S.

Com o objetivo de se automatizar os procedimentos de cálculos definidos por Desmet & Govers (1996), foi desenvolvido por Carvalho Júnior & Guimarães (2001) um programa em linguagem IDL compatível com os programas RIVER TOOLS e ENVI (ENVI, 1997). Posteriormente, Carvalho Júnior & Guimarães (2003) desenvolveram o mesmo programa em AML (ARCINFO Macro Language) utilizando apenas como dado de entrada o Modelo Digital de Terreno (MDT).

Os dados utilizados para a confecção do MDT foi da Base Cartográfica Integrada ao Milionésimo do IBGE (2001) (Escala 1:1.000.000). Esta base considera todo o território nacional, porém, para a área de estudo, foram utilizadas 3 folhas (SB23, SC23 e SC24). No processo de interpolação foi considerado a hidrografia, pontos cotados e curvas de nível. O MDT foi gerado pelo interpolador TOPOGRID (Hutchinson, 1989), projetado para estudos hidrológicos e contido no programa ARCINFO (ESRI, 1993). Este algoritmo é fundamentado na interação de diferenças finitas, que concilia a eficiência de um interpolador local (IDW) com métodos de Interpolação Global, que utilizam um interpolador como o Kriging (ESRI, 1993). Neste método, a rede de drenagem, lagos, depressões e cumes são levados em consideração, além das curvas de nível e pontos cotados (Silva, 2001).

3.4. Fator Manejo dos Solos - Fator C

O fator de uso e manejo dos solos (Fator C) da EUPS é a relação esperada entre as perdas do solo de uma área cultivada, segundo um manejo qualquer, e as perdas correspondentes de um solo na mesma área, mantendo o solo descoberto e cultivado (Bertoni & Lombardi Neto, 1990). O quantitativo de perdas do solo de uma determinada área, mantida em descoberto, pode ser estimado pelos produtos dos termos R, K, L e S da Equação Universal de Perdas do Solos (EUPS). Entretanto, esta perda pode ser maior ou menor, dependendo dos diversos tipos de cultura que estiverem sobre o solo, seqüência de culturas e práticas conservacionistas.

Assim, o valor de C não pode ser obtido de forma independente, devido a inúmeras interações que ocorrem, como por exemplo: uma cultura pode ser plantada sempre no mesmo local ou por meio de rotação de culturas; os restos vegetais podem ser removidos, incorporados ao solo, ou mesmo queimados; o preparo do solo pode ser irregular, deixando o solo ora liso, ora de forma irregular, entre outros fatores. Portanto, a combinação destas variáveis pode apresentar diversos efeitos nas perdas do solo.

O uso do solo no Alto Parnaíba foi obtido a partir da classificação de imagens do sensor TM-Landsat5 referentes ao ano de 2003. Foram utilizadas seis cenas com as seguintes órbita-ponto e data: (a) 220-65 de 12/8/2003; (b) 220-66 de 12/8/2003; (c) 220-67 de 13/9/2003; (d) 221-65 de 3/8/2003; (e) 221-65, de 6/10/2003; e (f) 221-67 de 6/10/2003.

A classificação utilizou o método supervisionado Máxima Verossimilhança do programa Erdas Imagine. A classificação foi checada em campo com auxílio de GPS e mapas de apoio. Diante da extensão da área, pequenas áreas de agricultura e pecuária foram agrupados em uma única classe denominada agropecuária, onde não é definido o uso predominante, ou seja, se a agricultura ou se a pecuária. Diante disso, e com o auxílio do Censo Agropecuário do IBGE (1996), onde encontra-se o levantamento do tipo de uso da terra em cada município da área, foi utilizada uma média ponderada do valor de C, em função de cada tipo de uso de solo para cada município integrante do Alto Parnaíba. No cálculo deste valor ponderado, foram utilizados os seguintes valores de C segundo o uso: (a) cultura permanente - 0,012; (b) pastagens - 0,025; (c) lavouras anuais e em pousio - 0,018 (Tabela 1). O cálculo do fator C ponderado é expresso pela seguinte formulação (Chaves, 1994):

$$C = \frac{C_1A_1 + C_2A_2 + \dots + C_nA_n}{A_t} \quad (5)$$

Onde “C” é o valor de C ponderado (adimensional); “Ci” é o valor de C para cada tipo de cultura/pastagem (adimensional); “Ai” é a área de cada cultura/pastagem (km²) e “At” é a área total do município com agricultura e pastagem.

Tabela 1 - Valores calculados de C para as classes de uso do Alto Parnaíba.

Classe de uso e ocupação	Fator C
Água	0,000
Urbano	0,001
Solo exposto	1,000
Mata ciliar	0,012
Agricultura Irrigada	0,018
Agricultura Sequeiro	0,018
Agropecuária	Valores Ponderados
Cerrado	0,042
Transição	0,087
Caatinga	0,013

Em função do tipo de cultura e sua abrangência, bem como da área de pastagens do município, os valores de C para a agropecuária variam de 0,019 à 0,024, com média de 0,0215. Desta maneira, para cada área da classe agropecuária presente no mapa de uso do solo, foram associados os valores de C correspondentes a seu respectivo município. Entretanto, para os municípios que não constavam no censo, foi utilizado o valor de C mais condizente com a interpretação visual de cada polígono.

3.5. Fator Prática Conservacionista – Fator P

O fator prática conservacionista, fator P da EUPS, é caracterizado como a relação entre a intensidade esperada de perdas com determinada prática conservacionista e aquelas quando a cultura está plantada no sentido do declive (morro abaixo) (Bertoni & Lombardi Neto, 1990). As práticas conservacionistas mais comuns para as culturas anuais são: plantio em contorno, terraceamento e alternância de capinas.

Chaves (1994), para o vale do rio São Francisco, na região nordeste, estimou P = 0,5 para plantio em contorno, e P = 1,0 para plantio em desnível. O valor de P é adicionada em cada classe de uso de solo.

3.6. Tamanho da Célula da Grade (Grid)

Os resultados de modelos matemáticos de predição de erosão são dependentes da resolução espacial do MDT (Molnár & Julián, 1998; Sánchez, 2002; Straus & Klaghofer, 2003). Julián & Frenette (1987) realizaram estudos para aplicação da EUPS em uma bacia hidrográfica de grande porte no Canadá com células de baixa resolução e concluíram que a EUPS poderia ser aplicada, desde que contivesse um fator de correção. Molnar & Julián (1998) utilizando a EUPS em duas bacias hidrográficas de pequeno e grande porte, concluíram que quando o tamanho da célula excede a resolução espacial de 100 metros, um fator de correção deve ser incluído nos cálculos. Os autores demonstram que o fator de correção é praticamente o mesmo e independe do tamanho da bacia hidrográfica, como é constatado pela similaridade das equações da bacia de pequeno porte (de 21,60 km²) (Equação 6) e da bacia de grande porte (de 304,5 km²) (Equação 7).

$$Q = 0,655A^{-0,135} \quad (6)$$

$$Q = 0,577A^{-0,174} \quad (7)$$

Onde “Q” é o Fator de correção (adimensional) e “A” é a área da célula (km²).

3.7. Estimativa da Erosão Atual e Potencial

O cálculo da estimativa de Erosão Atual foi obtido por meio do cruzamento de todos os planos de informações relativos aos fatores da EUPS, utilizando a Equação 1. A esta equação foi adicionado o fator de correção.

A obtenção da estimativa de Erosão Potencial (Ep) utilizou a mesma fórmula utilizada para Erosão Atual (Ea), considerando os valores de C e P iguais a 1. Isto significa estimar a Erosão Potencial da área de estudo sob a ótica do pior cenário possível, ou seja, o solo cultivado sem qualquer cobertura e também sem qualquer prática conservacionista. Com este estudo, é possível avaliar o impacto causado pela abertura desordenada de novas fronteiras agrícolas, bem como identificar áreas de alto risco, fortemente propensa a erosão (Chaves, 1994).

4. Resultados

4.1. Resultados do Fator R

Os valores de R para as 52 estações pluviométricas variam de 2573 à 5980 MJ.mm/ha.h, com valor médio de

4250,23 MJ.mm/ha.h, desvio padrão de 891,89 MJ.mm/ha.h. Os maiores índices de erosividade encontram-se na área do Alto Parnaíba, em suas nascentes, e as menores na região do Gurgueia, onde predomina áreas de caatinga.

Os resultados da interpolação do fator R das estações pelo métodos de *Krigeagem* Ordinária é demonstrado na Figura 3A e do método IDW na Figura 3B. Com o propósito de validar o melhor interpolador foram retirados, aleatoriamente, 5 estações pluviométricas e a partir das 47 estações restante realizou-se a interpolação pelos dois métodos de forma avaliar o que obteve valores mais próximos do real (Tabela 2). Desta forma, constata-se que a *Krigeagem* Ordinária obteve valores, consideravelmente, mais próximos em comparação ao IDW. Além disso, a *Krigeagem* Ordinária apresenta uma distribuição uniforme, diferentemente do IDW, que apresenta formas arredondadas e concêntricas em torno de algumas estações pluviométricas.

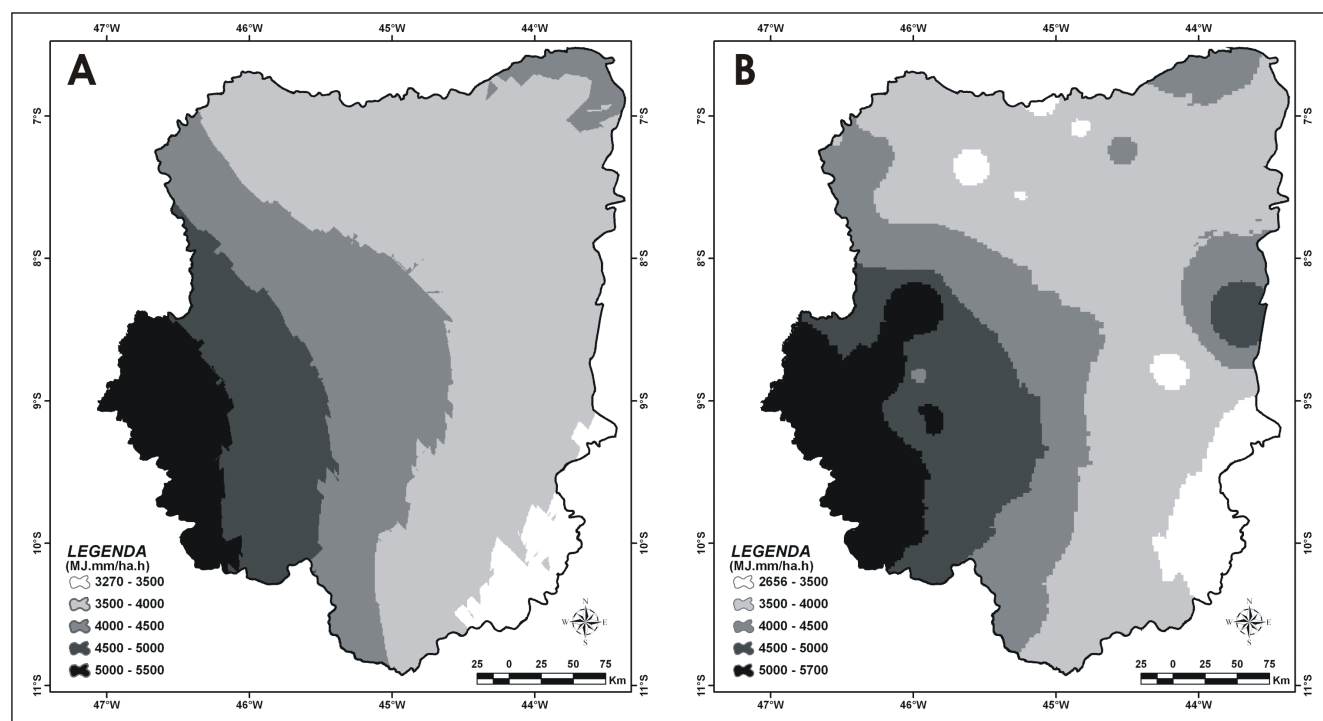


Figura 3 - Mapa do Fator R do Alto Parnaíba: (A) *Krigeagem* Ordinária; (B) Interpolador IDW

Tabela 2 - Estações Pluviométricas com respectivos valores de R na Região do Alto Parnaíba.

Estação	Localização	Valor de R equação 4 (A)	Valor de R IDW	Varição em relação a A	Valor de R <i>Krigeagem</i>	Varição em relação a A
1	Cristino Castro	3382	3926	16,08	3838	13,48
2	Ribeiro Gonçalves	3494	3902	11,67	3860	10,47
3	Uruçuí	4084	3595	13,60	3731	9,46
4	Recursos	4245	3950	7,47	4177	1,63
5	Alto Parnaíba	5601	4448	25,92	4851	15,46

4.2. Resultados do Fator K

A Tabela 3 apresenta os valores do fator K para as classes de solo presente na área de estudo conforme a

nomenclatura antiga adotada no levantamento da EMBRAPA (1983 e 1986), como também pelo novo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos proposto pela EMBRAPA (1999).

Tabela 3 - Classes de solos presente no Alto Parnaíba com seus respectivos valores do fator K obtidos pelo nomograma de Wischmeier *et al.* (1971).

Classes de solo conforme o levantamento realizado pela EMBRAPA (1983 e 1986)	Reclassificação conforme EMBRAPA (1999)	Fator K
LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO	LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO	0,028
LATOSSOLO VERMELHO ESCURO DISTRÓFICO	LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO	0,018
LATOSSOLO ROXO DISTRÓFICO	LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO	0,014
TERRA ROXA ESTRUTURADA EUTRÓFICA	NITOSSOLO VERMELHO EUTRÓFICO	0,011
PODZÓLICO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO	0,047
PODZOLICO VERMELHO AMARELO EUTRÓFICO	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO EUTRÓFICO	0,051
PODZÓLICO VERMELHO AMARELO CONCRECIONARIO DISTRÓFICO	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO	0,044
PLINTOSSOLO DISTRÓFICO	PLINTOSSOLO DISTRÓFICO	0,055
SOLONETZ SOLODIZADO	PLANOSSOLO	0,057
CAMBISSOLO EUTRÓFICO	CAMBISSOLO HÁPLICO EUTRÓFICO	0,039
SOLO ALUVIAL EUTRÓFICO	NEOSSOLO FLÚVICO TB EUTRÓFICO	0,046
AREIA QUARTZOSA DISTRÓFICA	NEOSSOLO QUARTZARENICO ÓRTICO	0,041
LITÓLICO DISTRÓFICO	NEOSSOLO DISTRÓFICO	0,052
LITÓLICO EUTRÓFICO	NEOSSOLO LITÓLICO EUTRÓFICO	0,036

O mapa de erodibilidade do solo é obtido pela substituição das classes de solo pelo seu respectivo fator K (Figura 4). Conseqüentemente, pode-se inferir que a espacialização de K está diretamente relacionada com o mapa de solos.

Os solos com maior capacidade de sofrer erosão laminar encontram-se na parte sul da área de estudo e correspondem principalmente as areias quartzosas (NEOSSOLOS). Em contraposição, as áreas com menor erodibilidade encontram-se em sua maioria nos planaltos e platôs e correspondem aos NITOSSOLO VERMELHO EUTRÓFICO e aos LATOSSOLOS.

4.3. Resultados do Fator LS

Conforme mencionado anteriormente, um dos objetivos do presente trabalho é analisar o cálculo do fator comprimento de rampa (L) a partir de dois métodos para a confecção do

mapa de área de contribuição: D_{∞} (Figura 5A) e D_8 (Figura 5B).

O método D_{∞} , onde o fluxo tem distribuição proporcional, permite uma melhor descrição dos divisores de água e do canal de drenagem, o que não acontece com o mapa gerado pelo método D_8 , onde pode ser observado problemas de ajustes.

No método D'' a linha de fluxo não segue traçados angulares como também não se desvia da linha de drenagem. Portanto o método D_{∞} em comparação ao método D_8 obtém uma melhor performance que propicia uma maior eficiência do posicionamento espacial do processos erosivos.

Com relação ao fator declividade, a região do Alto Parnaíba apresenta relevo plano, com desnivelamentos muito pequenos e declividades menores que 3% que corresponde 76,5 % da área total. O restante da área apresenta 16% com relevo suave ondulado (3%-8%) e 7,5 % com relevo ondulado com declive acentuado (8 – 27,5%).

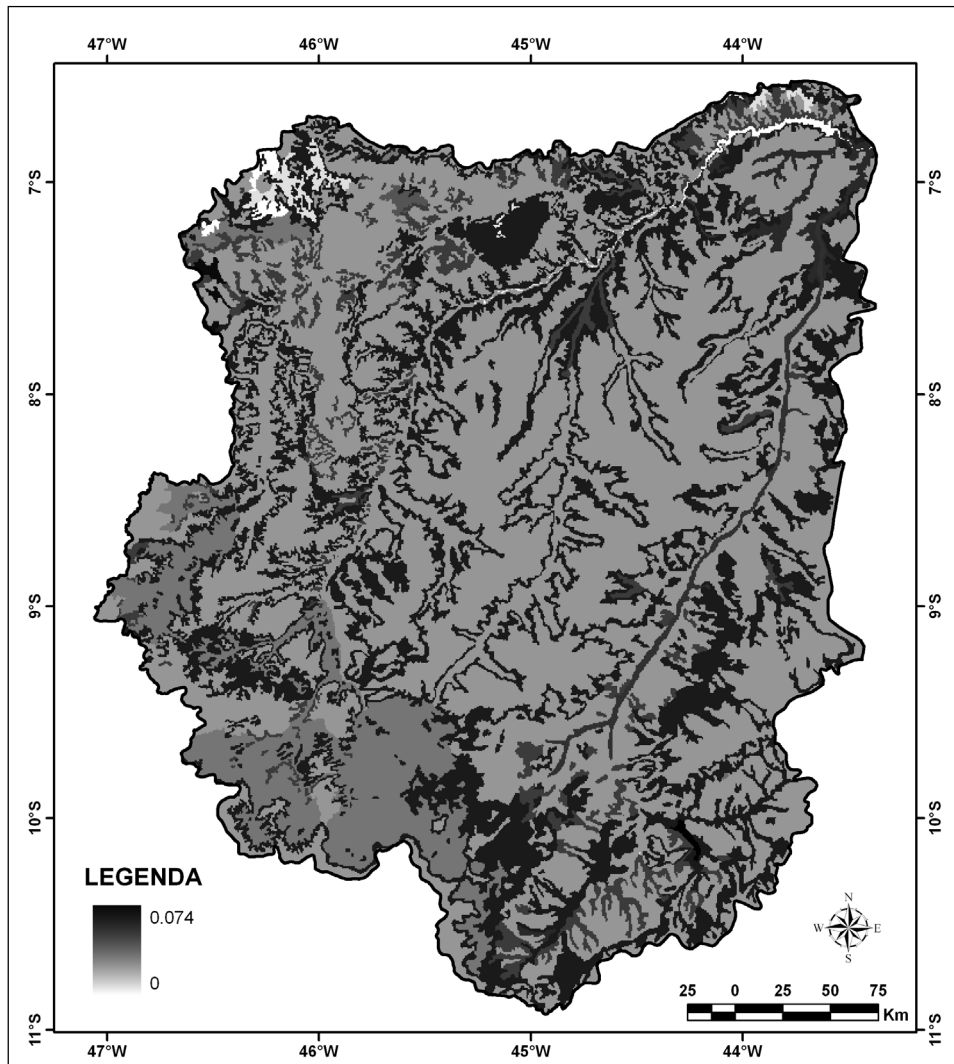


Figura 4 – Mapa de erodibilidade dos solos (Fator K).



Figura 5 – Detalhe comparativo dos mapas de área de contribuição: (A) método D'' e (B) método D8.

4.4. Resultados dos Fatores “C” e “P”

A atividade predominante da área de estudo é a agricultura de sequeiro/irrigada (4,29%), sendo a maior parte de sequeiro, predominantemente, lavouras de soja. Outra atividade bastante significativa é a área de agropecuária, que ocupa 4,09%, desenvolvidas principalmente em pequenas propriedades, onde se misturam áreas de pequenas lavouras e pastagens. Desta forma, o uso da área de estudo pode ser subdividido em duas porções: (a) região do cerrado, que ocupa um total de 70,81%, onde estão localizadas a maioria das áreas de lavoura de sequeiro e irrigada e (b) região da caatinga ocupada predominantemente pela agropecuária.

Considerando-se que para a maioria da agricultura intensiva da área de estudo ocorre o emprego de práticas conservacionistas, tais como: plantio em contorno, com terraceamento ou não, foi utilizado valor de $P = 0,5$, estimado por Bertoni & Lombardi Neto (1990). Para o restante da área o valor de P foi igual a 1,0.

4.5. Resultados da Erosão Atual (Ea) e da Erosão Potencial (Ep)

A estimativa de Erosão Atual (Ea) na região do Alto Parnaíba foi calculada aplicando os melhores resultados

obtidos para os fatores R (utilizando a interpolação por Krigeagem Ordinária) e LS (utilizando o mapa de área de contribuição pelo método D’’).

A distribuição espacial de susceptibilidade à erosão está fortemente associada à geomorfologia da região (Figura 6). As áreas com estimativa superiores a 10 ton/ha.ano estão localizadas: (a) nos divisores das bacias hidrográficas que compõem a região do Alto Parnaíba; (b) nas encostas entre os grandes planaltos da região do Alto Parnaíba; e (c) na região de Gilbuéis onde existem extensas áreas de solo exposto. Em contraposição, as áreas com menores perdas de solos estão localizadas nos Planaltos da bacia sedimentar do Piauí-Maranhão, onde estão, predominantemente, os Latossolos. São encontrados valores altos de erosão nas regiões onde ocorrem solos litólicos e areias quartzosas. A Tabela 4 descreve as classes relativas ao potencial de perdas de solo.

As áreas com menores taxas de Erosão Potencial ocorrem em áreas com menores declividades e em áreas de planaltos. Infere-se, ainda, que a estimativa de Erosão Potencial (Ep) apresentou valores altos em 41,82% da região do Alto Parnaíba, principalmente em áreas de encostas e regiões de solos expostos. Desta maneira, considerando a sustentabilidade dos solos na referida área, sofreria degradação por erosão, sem a existência de vegetação e nenhuma prática conservacionista.

Tabela 4 – Descrição das classes de Erosão Atual (Ea).

Classes de potencial de perdas de solos	Perdas de solo Ton/ha/ano	Área em km ²	Frequência Relativa	Frequência acumulada
MUITO BAIXA	0 - 1	57018,59	42,69	42,69
BAIXA	2 - 5	37777,15	28,28	70,97
MÉDIA	6 - 10	13304,00	9,96	80,93
ALTA	11 - 20	9596,10	7,18	88,11
MUITO ALTA	>= 21	15279,47	11,44	99,55
ÁGUA	0	595,69	0,45	100
TOTAL		133571,00	100,00	

6. Conclusão

O presente trabalho mostra a viabilidade de utilizar a EUPS, com o apoio de um SIG, para o cálculo de estimativa de Erosão Atual (Ea) e Potencial (Ep) na região do Alto Parnaíba. Este modelo permite estimar e avaliar a erosão laminar sob vários cenários possíveis, auxiliando no planejamento do uso dos solos e práticas conservacionistas, mesmo em grandes áreas (escalas regionais) e mapas de baixa resolução.

No intuito de estimar a erosão atual e potencial do solo, foram utilizadas diferentes metodologias para obtenção dos fatores R (erosividade) e LS (Topográfico). Na estimativa do fator R, foram comparados dois interpoladores (Krigeagem Ordinária e o IDW), sendo o calculado pela Krigeagem Ordinária o que apresentou os melhores resultados quanto aos valores e espacialização. Quanto ao fator topográfico (LS), este foi obtido com a utilização do mapa de área de contribuição, pelo método denominado de D’’ e pelo método D8. Ficou constatado que a metodologia do D’’ foi a que

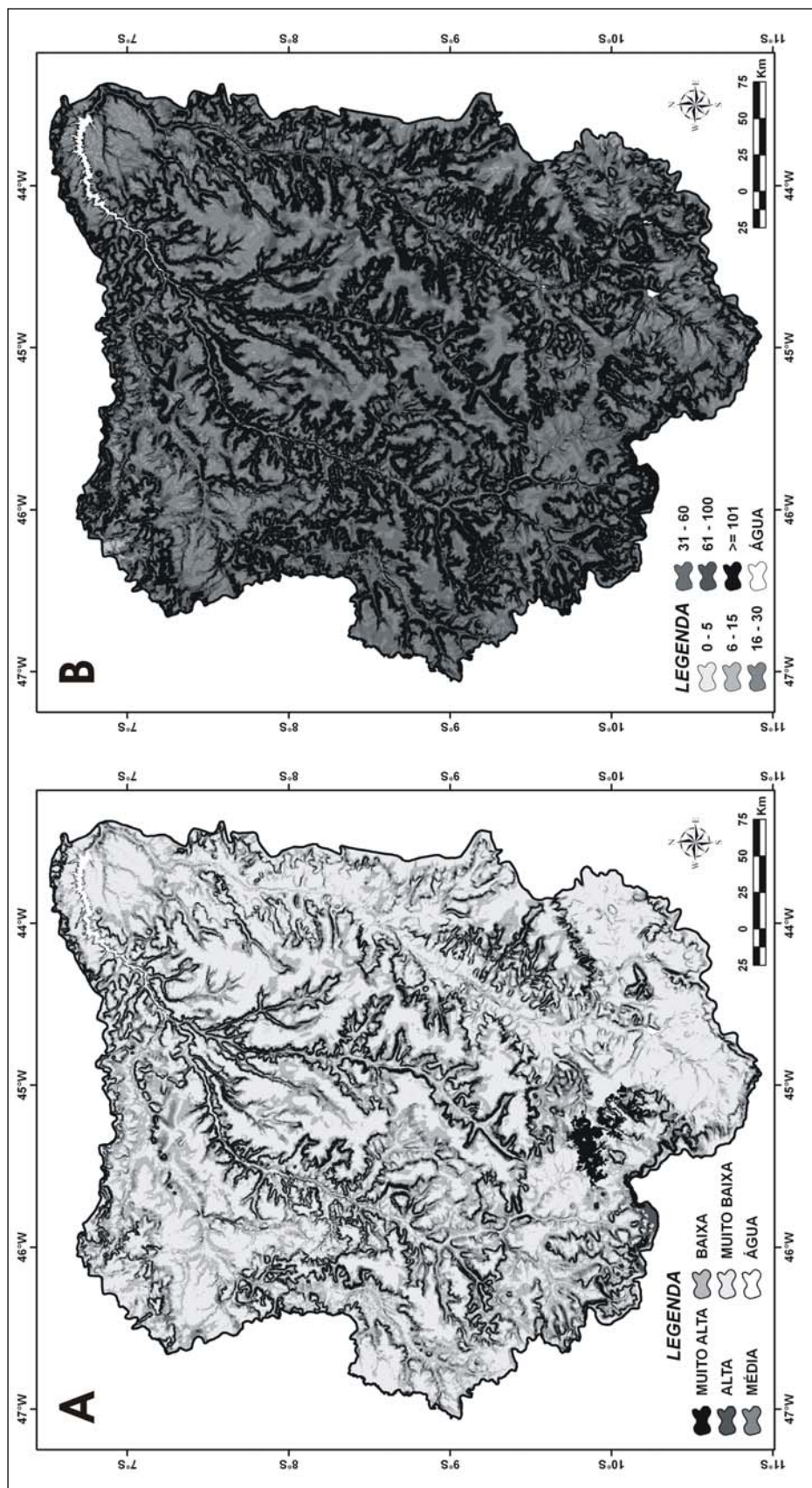


Figura 6 – Mapa de erosão laminar do Alto Parnaíba: (A) Erosão Atual; (B) Erosão Potencial.

apresentou melhores resultados, principalmente no que se refere à interpolação dos dados. Entretanto, é necessário que se tenha um Modelo Digital de terreno preciso. Outro ponto considerado foi o fator de correção, que pode ser aplicado diretamente na EUPS para grades que apresentam células acima de 100 x 100 metros, corrigindo assim, problemas de subestimativa de predição de perdas de solos.

A EUPS, apesar de suas limitações, como a de não permitir a quantificação da deposição, mostrou ser de grande valia como modelo de predição de perdas de solos pela sua simplicidade, cálculos rápidos e baixos custos. A metodologia utilizada para a estimativa de Erosão Atual e Potencial mostrou ser válida para os estudos iniciais de planejamento ambiental, pois conhecendo-se as causas da erosão, bem como seus possíveis impactos sobre o meio ambiente e as atividades antrópicas, constitui um dos objetos de estudo da planificação do solo. Somado a isto, o Alto Parnaíba carece de informações mais detalhadas que permitam avaliar melhor os processos de perdas de solo. Neste propósito a EUPS é útil para definir quais áreas necessitam, com maior urgência, maiores estudos e cuidados. Em função do exposto, é necessário que se tomem medidas de caráter urgente nas áreas onde é crítica a situação de perda laminar de solo, além da adoção de políticas de manejo e conservação de solos, que disseminem uma cultura conservacionista e planejadora do meio ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) por auxiliar a realização dos trabalhos de campo, ao relator da Revista Brasileira de Geomorfologia pelas sugestões ao manuscrito e ao CNPq pela concessão das bolsas de produtividade em pesquisa dos autores Osmar Abílio de Carvalho Júnior e Renato Fontes Guimarães.

Referência Bibliográfica

Arnold, J.G.; Allen, P.M. (1996) Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, 176(1): 57-77.

Bertoni J. e Lombardi Neto, F. (1990) *Conservação do Solo*. Ícone Editora, São Paulo, 355p.

Carvalho Junior, O.A.; Guimarães, R.F. (2001) Implementação em ambiente computacional e análise de emprego da área de contribuição no cálculo do fator topográfico (LS) da USLE. In: *Simpósio Nacional de Controle da Erosão, 7. Anais...Goiânia (CD-ROM)*.

Carvalho Júnior, O.A.; Guimarães, R.F. (2003) Confeção de cartas morfométricas da bacia do São Francisco como subsídio ao estudo de vulnerabilidade ambiental. In: CODEVASF (org.) *Zoneamento Ecológico-Econômico do Vale do São Francisco. Estudos básicos*. p. 221-224.

Chaves, H.M.L. (1994) Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco. *Relatório Final de Consultoria*. CODEVASF/ FAO, Brasília, 35p.

CODEVASF (2001) Mapa fisiográfico da bacia do rio Parnaíba. Disponível em: www.codevasf.gov.br

Desmet, P.J.J.; Govers, G.A. (1996) GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5): 427-433.

EMBRAPA (1983) Levantamento exploratório de solos do Estado do Piauí. Embrapa, SNLCS, Sudene, DRN.

EMBRAPA (1986) Levantamento exploratório de solos do Estado do Maranhão. Embrapa, SNLCS, Sudene, DRN.

EMBRAPA (1999) Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 412p.

ENVI (1997) *Tutorials better solutions consulting limited liability company*. Lafayete, Colorado, 370p.

ESRI (1993) *Understanding GIS – The ARC/INFO Method*. Environmental Systems Research Institute. ESRI, New York, 535p.

Foster, G.R.; Wischmeier, W.H. (1974) Evaluating irregular slopes for soils loss prediction. *Transactions of the ASAE*, 17: 305-309.

Hutchinson, M.F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211-232.

IBGE (1996) Macrozoneamento geoambiental da Bacia Hidrográfica do rio Parnaíba. IBGE, Rio de Janeiro.

IBGE (1997) Censo agropecuário 1995-1996, número 7 – Maranhão. IBGE, Rio de Janeiro, 217p.

IBGE (1997) Censo agropecuário 1995-1996, número 8 – Piauí. IBGE, Rio de Janeiro, 205p.

IBGE (2001) Censo demográfico, 2000. IBGE, Rio de Janeiro. Disponível em: www.ibge.gov.br

IBGE (2003) Base Cartográfica Digital do Brasil ao Milionésimo. IBGE, Rio de Janeiro, (CD-ROM)

Julién, P.Y.; Frenette, M. (1987) Macroscale Analysis of Upland Erosion. *Hidrological Sciences Journal*, 3(3): 347-357.

- Lombardi Neto, F.; MOLDENHAUER, W.C. (1980) Erosividade da chuva, sua distribuição e relação com perdas de solos em Campinas, SP. In: Encontro Nacional de Pesquisa de Conservação de Solo, 3. Anais..., Recife.
- MME/Projeto RADAMBRASIL (1973) Folha SB 23 Teresina e parte da Folha SB 24 Jaguaribe: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso potencial da terra. 513p.
- MME/Projeto RADAMBRASIL (1981) Folha SA 24 Fortaleza: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. 483p.
- MME/Projeto RADAMBRASIL (1981) Folha SB 24/25 Jaguaribe/Natal: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. 744p.
- MME/Projeto RADAMBRASIL (1981) Folha SC23 Rio São Francisco e SC. 24 Aracaju: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. 220p.
- Molnar, D.K.; Julián, P.Y. (1998) Estimation of Upland Erosion Using GIS. *Computers & Geosciences*, 24(2): 183-192.
- Moore, I.D.; Bruch, G.J. (1986) Physical Basis of the length - slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5): 1294-1298.
- O'calaghan, J.F.; Mark, D.M. (1984) The extraction of drainage network from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28: 328-344.
- Primavesi, A. (1987) Manejo ecológico do solo. Ed. Nobel, São Paulo, 549p.
- Renard, K.G.; Meyer, L.D.; Foster, G.R. (1997) Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Department of Agriculture, Washington University, 384p.
- Sánchez, R.R. (2002) GIS - Based Upland Erosion Modeling, Geovisualization and Grid Size effects on Erosion Simulations with CASC2D-SED. Msc. Thesis, Civil Engineering Department, Colorado State University, 29p.
- Silva, A.M.; Schulz, H.E.; Camargo, P.B. (2004) Erosão e hidrossedimentologia em bacia hidrográfica. RIMA Editora, São Carlos, 138p.
- Silva, V.C. (2001) Erosão atual, erosão potencial e aporte de sedimento na bacia do rio Paracatu (MG/GO/DF). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UnB, 108p.
- Stein, D.P.; Donzelli, P.; Gimenez, A.F.; Ponçano, W.L.; Lombardi Neto, F. (1987) Potencial de erosão laminar natural e antrópica na bacia do Peixe-Parapanema. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 4. Anais..., Marília. p. 105-135
- Strauss, P.; Klaghofer, E. (2003) Scale considerations for the estimation of soil erosion by water in Austria. Disponível em: www.oecd.com
- Tarboton, D.G.A. (1997) New method for the determination of flow directions and up slope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33: 309-319.
- Williams, J.R. (1990) The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model - A case-history. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 329(1255): 421-428.
- Wischmeier, W.H.; Johnson, C.B.; Cross, B.V.A. (1971) Soil erodibility norm graph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26: 189-193.
- Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. (1962) Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. *Inst. Ass. Sci. Hidrology Common Land Erosion*. Pub. p. 148-159.
- Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 58p.
- Woolhiser, D.A.; Smith, R.E.; Goodrich, D.C. (1980) KINEROS-a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130p.
- Young, R.A.; Onstad, C.A.; Bosch, D.D.; Anderson, W.P. (1987) AGNPS, Agricultural non-point source pollution model: a watershed analysis tool. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Conservation Research Report 35, 65p.
- Zachar, D. (1982) Soil erosion development in soil science. Ed. Elsevier Scientific, New York, 547p.