

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À PERDA DE SOLO PELA  
APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE RUSLE**

Mariana Tomoe Yamashita Tawata

Orientador: Prof.Dr. Jorge Kazuo Yamamoto  
Co-orientador: Prof.Dr. Fabrício Bau Dalmas

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2015 / 38)

SÃO PAULO

2015

TF  
T235  
MTY.d

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À PERDA DE SOLO PELA  
APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE RUSLE**

Mariana Tomoe Yamashita Tawata

Orientador: Prof.Dr. Jorge Kazuo Yamamoto  
Co-orientador: Prof.Dr. Fabrício Bau Dalmas

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2015 / 38)

IGc-Instituto de Geociências



2 7 8 7 4 0 3 - 1 0

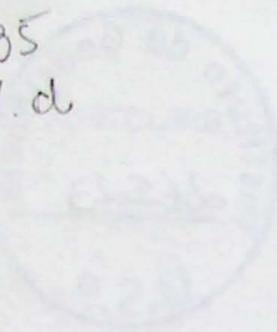
Determinação da incerteza associada à perda de solo pel.  
aplicação da Equação de Rusle.

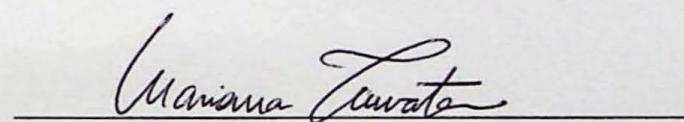
M26523

SÃO PAULO

2015

TF  
T235  
MT Y.d

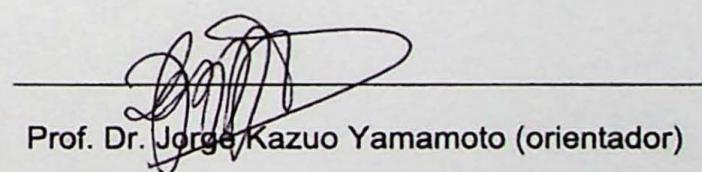




---

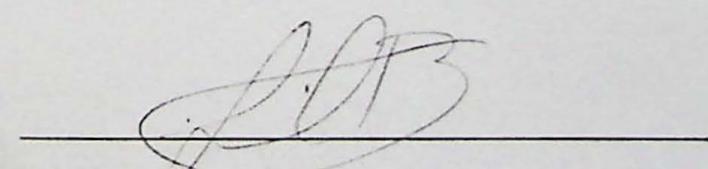
Mariana Tomoe Yamashita Tawata

De acordo:



---

Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto (orientador)



---

Prof. Dr. Fabrício Bau Dalmas (coorientador)

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento e a conclusão desta monografia foram possíveis graças ao auxílio de várias pessoas às quais expresso meu profundo agradecimento. Primeiramente, à minha família por sempre me incentivar aos estudos, apoiar minhas decisões e dar todo suporte e estrutura possível que me possibilitou focar nos estudos com conforto e tranquilidade desde sempre. Agradeço em especial ao meu avô que me deixa saudades. Ao Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto e Prof. Dr Fabrício Bau Dalmas, pois através de seu esforço e dedicação às Geociências é que este Trabalho de Formatura pôde ser realizado. Ao Antônio do LIG que sempre me ajudou e me recebeu com muita boa vontade em sua sala. Ao Sidney da 105 por todo suporte em Geotecnologias durante o ano todo. Ao aluno de doutorado Santiago pela boa vontade de me ajudar até em domingo. Às pessoas da 105 que sempre me receberam bem na sala. Agradeço ao Métt, amigo e companheiro de vida, pelas altas risadas e pelo apoio a todo o momento. E aos amigos da Geologia dos mais variados anos pelo entretenimento e carinho durante todos esses anos. Sou realmente muito grata a todos.

## RESUMO

Este trabalho de formatura aborda a questão da quantificação de incerteza em mapas de susceptibilidade à erosão de solos obtidas pela equação RUSLE. Esta equação leva em consideração cinco fatores (pluviosidade, tipo de solo, declividade, uso do solo e práticas de conservação de solo) e se obtém o mapa da perda de solo a partir da multiplicação dos mapas dos fatores em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). No entanto, este processamento produz propagação de incerteza, e precisa ser avaliada e mensurada com o propósito de melhorar a precisão dos mapas gerados. O método utilizado para determinar incerteza é baseado na variância de interpolação, a qual leva em conta tanto a configuração dos dados como os valores dos pontos amostrais. Os procedimentos para determinar a incerteza neste trabalho, de modo geral, consistem em reamostragem dos pontos de dados, interpolação por equações multiquádricas e obtenção da variância de interpolação. Os métodos de RUSLE e variância de interpolação são aplicados no município de Itaoca (SP). Ao final, para esta área de estudo, são apresentados: mapa de perda média anual de solo em toneladas por hectare processado em SIG; mapa interpolado por equações multiquádricas, e o terceiro mapa mostra o valor de incerteza em toneladas por hectare para cada célula raster.

## ABSTRACT

This final course assignment concerns about the topic of quantification of uncertainty on susceptibility soil erosion maps obtained from RUSLE equation. This equation takes into account five factors (rain data, soil type, slope, use and management of soil and soil conservation practices), and the map of soil loss is obtained from the multiplication of the factors maps in GIS (Geographic Information System). However, this procedure produces uncertainty and must be evaluated and measured with the purpose to improve the precision of the generated maps. The method used to determine uncertainty is based on variance interpolation, it takes into account both configuration and data values of sampling points. Procedures to determine the uncertainty in this research, in general mode, consist of re-sampling of data points, interpolating using multiquadric equations and obtaining the interpolation variance. The RUSLE methods and interpolation variance are applied on the municipality of Itaoca (SP). At the end, for the study area, these results are presented: loss annual average soil map in tons per hectare processed in GIS; map interpolated by multiquadric equations, and a third map showing the uncertainty value in tons per hectare in each raster cell.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa rodoviário com principais vias de acesso à área de estudo (município de Itaoca).....	3
Figura 2. Mapa geotectônico simplificado da América do Sul (a), e mapa geológico simplificado da porção sul do Cinturão Ribeira (b). Unidades geológicas: Grupo Itaiacoca (Ic), Formação Água Clara (Ac), Grupo Lajeado (L), Grupo Votuverava (V), Grupo São Roque (Sr), Grupo Serra do Itaberaba (It), Gnaiss Tigre (T), Formação Capirú (C), Formação Turvo – Cajati (Tc), Formação Rio das Cobras (Rc), Complexo Atuba (At). Fonte: Campanha et al. (2015). Editado. ....	4
Figura 3. Grupo Lajeado, coluna estratigráfica. Fonte: Campanha et al. (2015). ....	6
Figura 4. Mapa litológico simplificado da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB. Editado.....	7
Figura 5. Mapa Uso de Solo da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB (2010). Editado.....	8
Figura 6. Mapa pedológico da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB (2010). Editado. ....	9
Figura 7. Mapa geomorfológico da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB. Editado. ....	10
Figura 8. Mapa de média anual de chuva da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB (2010). Editado. ....	10
Figura 9. Mapa do fator R de Itaoca. Fonte: Dalmas (2013). Editado. ....	19
Figura 10. Mapa do fator K de Itaoca. Fonte: Dalmas (2013). Editado. ....	20
Figura 11. Mapa do fator LS de Itaoca. Fonte: Dalmas (2013). Editado. ....	20
Figura 12. Mapa do Fator C de Itaoca. ....	21
Figura 13. Mapa do fator P de Itaoca.....	22
Figura 14. Interface da ferramenta 'Calculadora Raster' do programa ArcMap 10.3. Ferramenta que possibilita a multiplicação dos mapas para gerar mapa RUSLE.....	22

Figura 15. Tabela dos dados de Itaoca no formato GeoEAS, requerido pelo programa Geovisual.....	23
Figura 16. Interface geral do programa Geovisual.....	24
Figura 17. Mapa de perda média anual de solo do município de Itaoca, desenvolvido através da equação de RUSLE.....	25
Figura 18. Mapa de localização dos pontos obtidos por amostragem aleatória estratificada.....	26
Figura 19. Distribuição da variável R obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas.....	26
Figura 20. Distribuição da variável K obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas.....	27
Figura 21. Distribuição da variável LS obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas.....	27
Figura 22. Distribuição da variável C obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas .....	27
Figura 23. Distribuição da variável P obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas .....	28
Figura 24. Distribuição da variável RUSLE.....	28
Figura 25. Mapa de incerteza em torno da interpolação multiquádrifica.....	29
Figura 26. Interpolação multiquádrifica da variável obtida pela multiplicação das variáveis VP e VS2 (média do produto – esq. e variância de interpolação – dir.) .....	30
Figura 27. Interpolação multiquádrifica da variável VS2 (esq.) e da variância de interpolação (dir.).....	30

Figura 28. Interpolação multiquádrica da variável obtida pela multiplicação das variáveis VP e VS2 (média do produto – esq. e variância de interpolação – dir.). ..... 30

Figura 29. Diagramas de dispersão para a média (esq.) e para a variância (dir.), comparando as estatísticas diretas (variável produto) e as estatísticas derivadas por meio das equações de Taylor. ..... 31

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Valores de erodibilidade atribuídos às classes de solos.....	14
Tabela 2. Valores de LS atribuídos às classes de declividade.....	14
Tabela 3. Valores de CP atribuídos às classes de uso do solo.....	15
Tabela 4. Valores de C atribuídos aos tipos de uso do solo.....	20

**SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. JUSTIFICATIVA.....	2
4. ÁREA DE ESTUDO .....	2
4.1 Contexto Geológico .....	3
4.1.1 <i>Geologia Regional</i> .....	3
4.1.2 <i>Geologia do Grupo Lajeado</i> .....	6
4.2 Características fisiográficas .....	7
4.2.1 <i>Cobertura vegetal</i> .....	7
4.2.2 <i>Pedologia</i> .....	8
4.2.3 <i>Geomorfologia e declividade</i> .....	9
4.2.4 <i>Clima</i> .....	10
5. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
5.1 Equação Universal de Perdas de solo (EUPS ou USLE).....	11
5.2 Aplicação da RUSLE no Vale do Ribeira.....	13
5.3 Incerteza associada a operações aritméticas de mapas em SIG .....	15
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	24
7.1 Mapa RUSLE de Itaoca .....	24
7.2 Mapas de incerteza associada à equação RUSLE .....	26
8. CONCLUSÕES .....	32
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

## 1. INTRODUÇÃO

Os solos compreendem os materiais resultantes da decomposição das rochas por ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica. Além de constituírem substratos para a agricultura, fornecem materiais para a construção civil, são suportes para estradas, e também são utilizados como depósito de lixo. É nos solos que se efetua a maior parte da ciclagem de nutrientes da qual o planeta Terra depende para se manter vivo.

A erosão dos solos é um processo natural que ocorre na maior parte da superfície da Terra. No entanto, a partir de intervenções antrópicas como má gestão do uso dos solos e intenso desmatamento, proporciona-se a aceleração dos processos erosivos ocasionando perda de grande quantidade de solo.

A estimativa da perda média anual de solo por erosão laminar se torna importante, pois o conhecimento prévio do potencial de erosão de um solo de uma área preestabelecida pode orientar a atividade humana no sentido de um uso e manejo sustentável dos recursos naturais ali contidos (Aquino *et al.*, 2007). Essa estimativa pode ser solucionada pela Equação Universal de Perdas de Solo (EUPs ou USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), a qual se trata de um modelo empírico e considera seis fatores (naturais e antrópicos):  $A=R.K.L.S.C.P$ , onde "A" = perda média anual de solo por unidade de área; "R" = erosividade da chuva; "K" = erodibilidade do solo; "L" = comprimento da rampa; "S" = declividade; "C" = uso e manejo do solo e "P" = práticas conservacionistas.

A partir da USLE e RUSLE (versão computadorizada da USLE), mapas de susceptibilidade à erosão podem ser processados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), pois ele permite a completa integração entre os dados heterogêneos para os parâmetros da equação. Este processamento consiste em combinações de mapas digitalizados (raster) de diferentes naturezas e escalas (dados meteorológicos, cartas topográficas, cartas de solo, mapas de uso e manejo do solo) gerando outro mapa raster. Entretanto, quando estes mapas raster são combinados, há a propagação da incerteza. Estes procedimentos necessitam da avaliação de incerteza, uma vez que toda operação aritmética de mapas em SIG tem uma incerteza associada (Yamamoto *et al.*, 2015).

Este trabalho de formatura aborda a questão da quantificação da incerteza associada à equação de perda de solo RUSLE, por meio da variância de interpolação com aplicação realizada no interior do município de Itaoca (SP) utilizando banco de dados da tese de doutoramento de Dalmas (2013). O procedimento contribui para o desenvolvimento de um melhor planejamento estratégico tanto para fins ambientais (preservação e recuperação de áreas degradadas), quanto para atividades como agricultura, pecuária e do ramo da engenharia civil.

## 2. OBJETIVOS

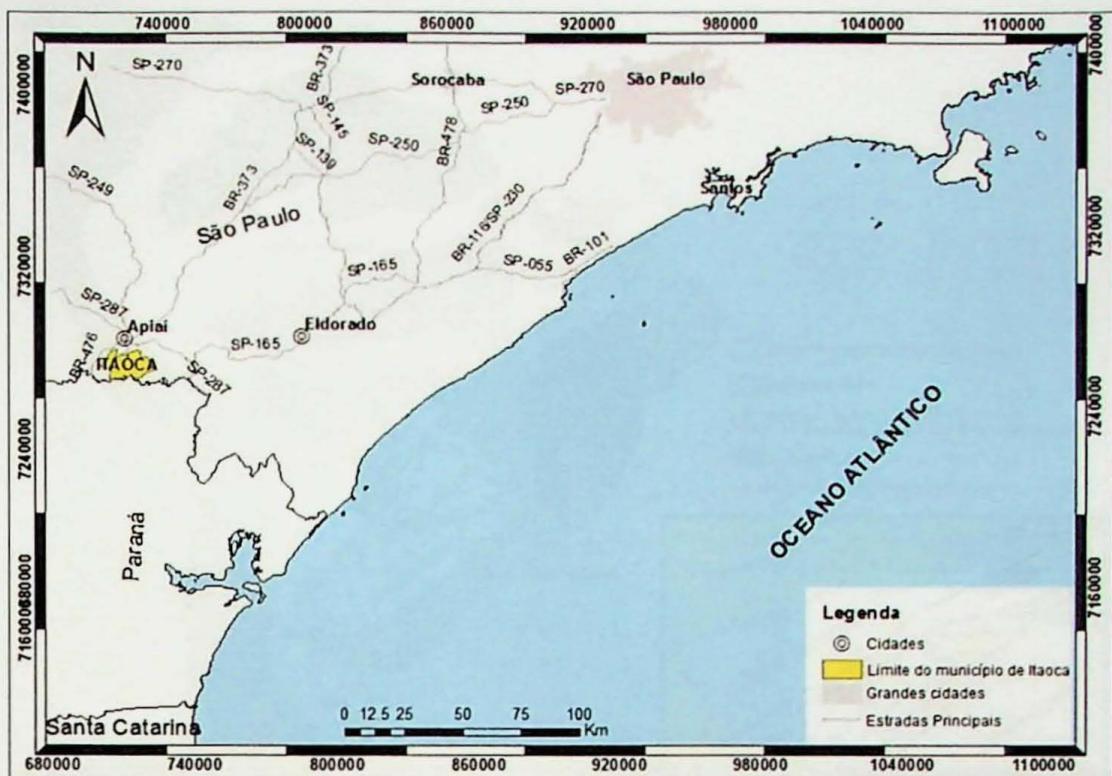
Este Trabalho de Formatura visa primeiramente familiarizar a aluna com a prática do uso de geotecnologias e questão que aborda incerteza existente em operações aritméticas realizadas em SIG. Deste modo, a partir do banco de dados de Dalmas (2013), esta monografia tem como metas: gerar mapa de susceptibilidade à erosão laminar de solos do município de Itaoca (SP); determinar a incerteza resultante na predição da perda de solo da equação de RUSLE utilizando variância de interpolação como medida direta da incerteza e apresentar o mapa com quantificação dessa incerteza da área de estudo.

## 3. JUSTIFICATIVA

A relevância do tema é evidente visto que a determinação de incerteza permite que a variabilidade seja mapeada. Entretanto, não existe uma aproximação viável para determinação da incerteza associada à perda de solo. A quantificação da incerteza com relação aos mapas de susceptibilidade à erosão reforça e aprimora os mapas gerados através da equação de RUSLE. Da mesma forma, o método tem sua contribuição no desenvolvimento de um melhor planejamento estratégico para todas as atividades que envolvam solos.

## 4. ÁREA DE ESTUDO

O município de Itaoca localiza-se no sudeste do Estado de São Paulo, no Vale do Ribeira. O Vale do Ribeira recebe este nome em função da bacia hidrográfica Ribeira do Iguape, da qual Alto Ribeira abrange Itaoca. De acordo com dados do IBGE (2015), o município possui uma área de 183,015 km<sup>2</sup>, uma população estimada de 3.337 habitantes e densidade demográfica de 17,64 habitantes/km<sup>2</sup>. A Figura 1 mostra os principais acessos rodoviários à área de estudo, que fica próximo aos municípios de Apiaí e Eldorado.



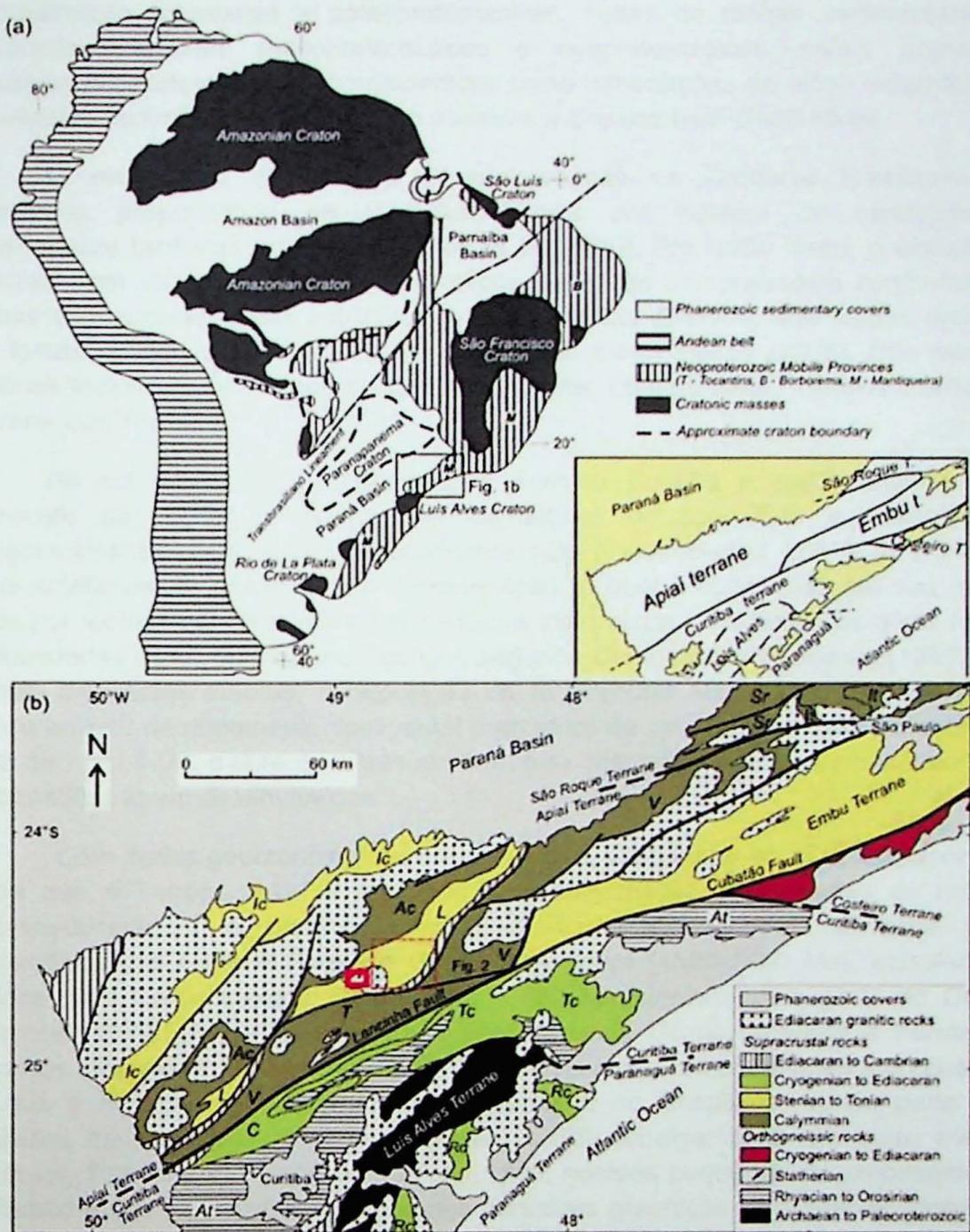
**Figura 1.** Mapa rodoviário com principais vias de acesso à área de estudo (município de Itaoca).

#### 4.1 Contexto Geológico

##### 4.1.1 Geologia Regional

A área de estudo (interior do município de Itaoca, SP), situada no Vale do Ribeira, é composta em sua maior parte por granitoide e rochas metassedimentares de baixo grau de idade proterozóica do Grupo Lajeado. O Grupo Lajeado pertence ao Terreno Apiaí do Cinturão Ribeira, situado na Província Mantiqueira (Figura 2).

A Província Mantiqueira (Almeida et al., 1977) corresponde a uma entidade geotectônica localizada a leste dos cráticos São Francisco e Rio de La Plata/ Paraná, exibindo região montanhosa em sua maior parte, cuja extensão alcança aproximadamente 3.000 quilômetros ao longo da costa atlântica, desde Montevidéu (Uruguai) até ao Sul da Bahia (Bizi et al., 2003)



**Figura 2.** Mapa geotectônico simplificado da América do Sul (a), e mapa geológico simplificado da porção sul do Cinturão Ribeira (b). Unidades geológicas: Grupo Itaiacoca (Ic), Formação Água Clara (Ac), Grupo Lajeado (L), Grupo Votuverava (V), Grupo São Roque (Sr), Grupo Serra do Itaberaba (It), Gnaisse Tigre (T), Formação Capirú (C), Formação Turvo – Cajati (Tc), Formação Rio das Cobras (Rc), Complexo Atuba (At). Fonte: Campanha et al. (2015). Editado.

A região do município de Itaoca está inserida no contexto do Cinturão Ribeira, o qual, segundo Faleiros et al. (2011), trata-se de uma vasta porção crustal alinhada paralelamente à costa do sudeste brasileiro, que sofreu amalgamação, deformação e metamorfismo durante a Orogenia Brasiliiano-Pan Americana (Neoproterozóico ao início do Paleozoico), em virtude das colisões oblíquas entre os crátons Paranapanema, São Francisco e Congo e da consolidação do continente Gondwana Ocidental. Segundo Campanha e Sadowski (1999), o cinturão compreende rochas de

embasamento arqueanas a paleoproterozoicas, suítes de rochas sedimentares e vulcanossedimentares mesoproterozoicas e neoproterozoicas, suítes graníticas intrusivas neoproterozoicas, compreendidas como associações de arcos magmáticos, sequências sedimentares de margens passivas e granitos tardi-cinemáticos.

O evento de deformação e amalgamação na Orogenia Brasiliano-Pan Americana proporcionou ao Cinturão Ribeira um sistema de cisalhamento transcorrente tardio ao orógeno (Faleiros *et al.*, 2010). Em razão disso, o cinturão é separado em terrenos tectono-metamórficos, os quais compreendem conjuntos de rochas com características estruturais e metamórficas diversos, delimitados entre si por falhas ou zonas de cisalhamento, de acordo com Faleiros (2008). São três os terrenos tectono-metamórficos do Cinturão Ribeira: Terreno Apiaí, Terreno Curitiba e Terreno Luís Alves.

Ao sul da Falha da Lanchinha, o Terreno Curitiba é predominantemente composto por suíte de ortognaisse migmatítico do tipo TTG e assembleias metassedimentares de plataforma continental rasa (Faleiros *et al.* 2011). Ao norte da falha anteriormente citada está o Terreno Apiaí, o qual é constituído em sua maior parte por rochas metassedimentares de fácies xisto verde a anfibolito, as quais foram denominadas como Supergrupo Açungui, segundo Campanha e Sadowski (1999). De acordo com estes autores, a deposição do Supergrupo Açungui no Terreno Apiaí iniciou a partir de rifteamento continental e abertura de um oceano possivelmente por volta de 1.7-1.5 Ga, e durante o Mesoproterozóico, margens passivas com plataformas carbonáticas foram desenvolvidas.

Com dados geocronológicos mais recentes, Campanha *et al.* (2009) apontam ainda que o Terreno Apiaí é resultado da amalgamação de unidades de rochas metassedimentares e metanovulcano-sedimentares de idades: calimiana para formações Água Clara e Betara e Grupo Votuverava (1500-1400 Ma), ectasiana a toniana para Grupo Lajeado (entre 1400 e 880 Ma), toniana para parte do Grupo Itaiacoca (1000-900 Ma) e ediacarana para parte do Grupo Itaiacoca e Formação Iporanga. No entanto, Faleiros *et al.* (2011) indicam incerteza em relação a proposição de que a amalgamação ocorreu majoritariamente no Brasiliano, ou se parte das unidades mais antigas (mesoproterozoicas) sofreu amalgamação em outro evento tectônico. Fazem parte ainda do Terreno Apiaí, núcleos pequenos de embasamento gnáissico em janelas estruturais e suítes intrusivas graníticas ediacaranas formadas em fases pré, sin e pós-colisionais.

#### 4.1.2 Geologia do Grupo Lajeado

O Grupo Lajeado, anteriormente denominado Subgrupo Lajeado (Campanha & Sadowski, 1999), corresponde a espessos pacotes carbonáticos e siliciclásticos depositados de forma alternada e compreendidos como uma sequência plataformal rasa de mar aberto (Campanha & Sadowski, 1999). Ele contém uma extensão aproximada de 130 quilômetros na direção NE-SW e apresenta intrusão do Gabbro Apiaí na porção superior (Campanha et al., 2015).

O Grupo Lajeado é composto por sete formações de acordo com Campanha et al. (2015), conforme pode ser visualizado na Figura 3. Basal e de origem terrígena, a Formação Betari é constituída por metarenitos e metaconglomerados oligomíticos gradando em direção ao topo para metarrítmitos mais finos, interpretados como níveis turbidíticos e associados à sequência transgressiva. Sobre ela, há duas formações de calcários calcíticos cinza escuros: Bairro da Serra e Mina de Furnas, as quais são intercaladas com camadas finas e esparsas de filito, sendo que a mais espessa delas compreende a Formação Água Suja. Os calcários apresentam estratificação *hummocky* submétrico, camadas em que a granulação varia e marcas de ondulação, os quais sugerem serem de ambiente de plataforma distante, porém ainda relacionados aos efeitos das tempestades. Sobre a Formação Mina de Furnas, a Formação Serra da Boa Vista é composta, de modo geral, por bancas métricas de arenito de granulação fina com coloração pálida, localmente com camadas finas de rochas de granulação mais fina e marcas de ondulação. Esses arenitos são cobertos pela Formação Passa Vinte, constituída por calcário com área de distribuição restrita, o qual representa a única fácie do Grupo Lajeado de águas rasas, localmente exibindo tapete de algas. Sobre ela está a Formação Gorotuba compreendida por ritmitos distais de granulação fina com intercalação de siltitos, lamitos, margas e localmente calcários. Seu contato abrupto com a camada inferior de calcário Passa-Vinte e a aparente incompatibilidade entre as fácies sedimentares sugerem que a Formação Gorotuba pode ser alóctone (Campanha et al. (2015)).

A região da área de estudo constitui a porção oeste do Grupo Lajeado. A maior parte do município estudado corresponde ao Granito Itaoca de idade Ediacarana e

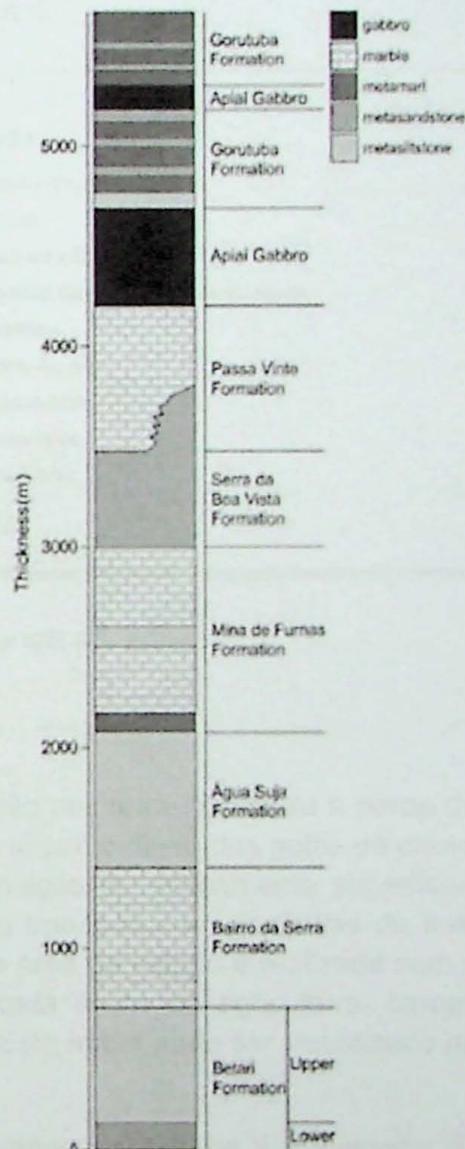
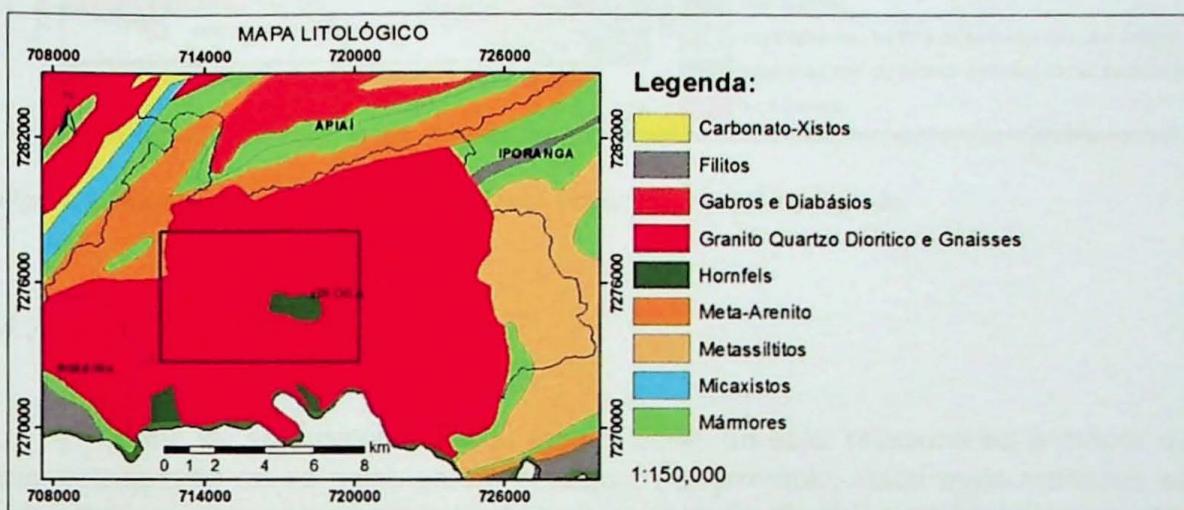


Figura 3. Grupo Lajeado, coluna estratigráfica. Fonte: Campanha et al. (2015).

possui área superior a 200 km<sup>2</sup>. Os monzogranitos e quartzo monzonitos cinzentos do maciço Itaoca, datados em 626 Ma (Faleiros, 2003), são produtos da intrusão sin a tardi-tectônica em relação ao episódio de deformação e metamorfismo do Supergrupo Açuungui no final do Neoproterozóico (Mello e Bettencourt, 1998). Eses granitos, ao alojarem-se, submeteram suas encaixantes a processos termometamórficos, gerando escarnitos e hornfels calciosilicáticos de filiação metassedimentar (Mineropar, 2010). Esse fenômeno também é constatado por Campanha et al. (2015), que aponta desenvolvimento de aureola metamórfica com quartzo+muscovita+biotita+andalusita+sillimanita. Mármores e hornfels podem ser constatados no mapa litológico simplificado da Figura 4.



**Figura 4.** Mapa litológico simplificado da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB. Editado.

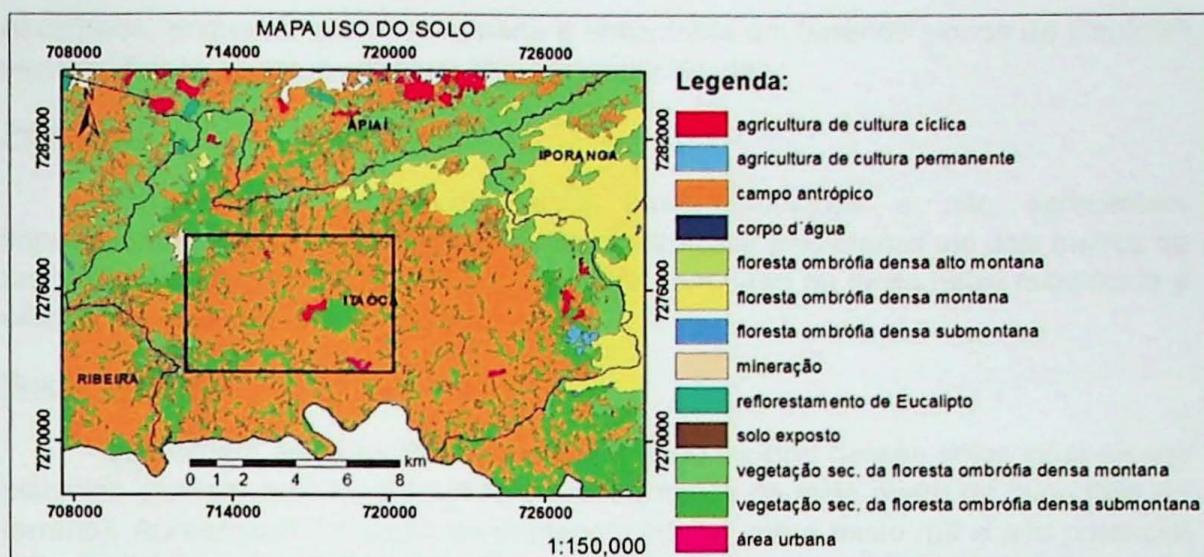
## 4.2 Características fisiográficas

### 4.2.1 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal proporciona certa proteção aos terrenos contra a perda de solos. Essa proteção está relacionada à redução do impacto direto das gotas de chuva no solo, interceptadas pela folhagem e pela diminuição do escoamento superficial, reduzindo a capacidade das águas removerem e transportarem partículas de solo (DAEE e IPT, 1989). A representação deste item na área de estudo é realizada com o mapa de Uso dos Solos (SIG-RB, 2010) que retrata áreas de agricultura, campo antrópico, florestas, reflorestamentos, entre outros. Este mapa pode ser visualizado na Figura 5.

De acordo com BRASIL (2010), campo antrópico refere-se à vegetação de campo formada em áreas originais de florestas, devido à intervenção humana e ações para uma maior produtividade de espécies forrageiras.

Na área de Itaoca, as áreas de floresta (floresta ombrófila densa montana e vegetação secundária da floresta ombrófila densa montana) localizam-se nos limites com municípios vizinhos (Apiaí, Iporanga, Ribeira). No entanto, a maior parte da área é constituída por campo antrópico.



**Figura 5.** Mapa Uso de Solo da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB (2010). Editado.

#### 4.2.2 Pedologia

O tipo de solo determina sua erodibilidade, ou seja, relaciona-se à menor ou maior facilidade de os solos serem erodidos. Por exemplo, solos mais arenosos se desagregam com maior facilidade do que os solos argilosos, ou seja, a textura dos solos é uma das características que condicionam a erosão. Além da textura, outras características do solo condicionam a sua erodibilidade: estrutura, composição, espessura, relação textural entre os horizontes ou camadas (DAEE e IPT, 1989). Com base neste conjunto de características, os solos são identificados e classificados em tipos através da Pedologia. A Figura 6 apresenta os tipos de solos da região do município de Itaoca. Os tipos de solo do município de Itaoca são: Brunizém Avermelhado, Cambissolo Álico, Cambissolo Eutrófico, Podzólico Vermelho Amarelo Álico e Solos Gleizados Distróficos. Em seguida, breves descrições de cada tipo de solo, de acordo com o que consta em Dalmas (2013).

##### Brunizém Avermelhado

Constituem solos muito férteis e a maioria desses solos situam-se em relevo escarpado associado à presença de rochas expostas e geograficamente associados a solos rasos. Sua relação textural é pouco acentuada, oferecendo menor erodibilidade do que os Podzólicos Vermelho - Amarelo, mantida igualdade de declive e cobertura vegetal.

##### Cambissolos

São solos em estágio intermediário de intemperismo, ou seja, não sofreram alterações físicas e químicas muito avançadas. Os cambissolos do estado de São Paulo ocorrem em duas situações bem distintas: a maior parte deles ocorre em terrenos situados em relevo bastante acidentado variando de forte ondulado a

escarpado, enquanto que a outra parte é encontrada em terrenos planos de planícies aluviais. Esses solos apresentam elevada erodibilidade.

### Podzólicos

Compreendem geralmente solos muito profundos e não apresentam impedimentos físicos à penetração do sistema radicular pelo menos até dois metros de profundidade. Os podzólicos são considerados com baixa ou muita baixa resistência à erosão, ou seja, alta erodibilidade.

### Solos Gleizados

Constituem solos hidromórficos e a grande maioria desses solos situa-se em planícies aluviais, com nível freático elevado (menos de meio metro da superfície do terreno). Apresentam condição de drenagem interna má a muito má e alto potencial erosivo.

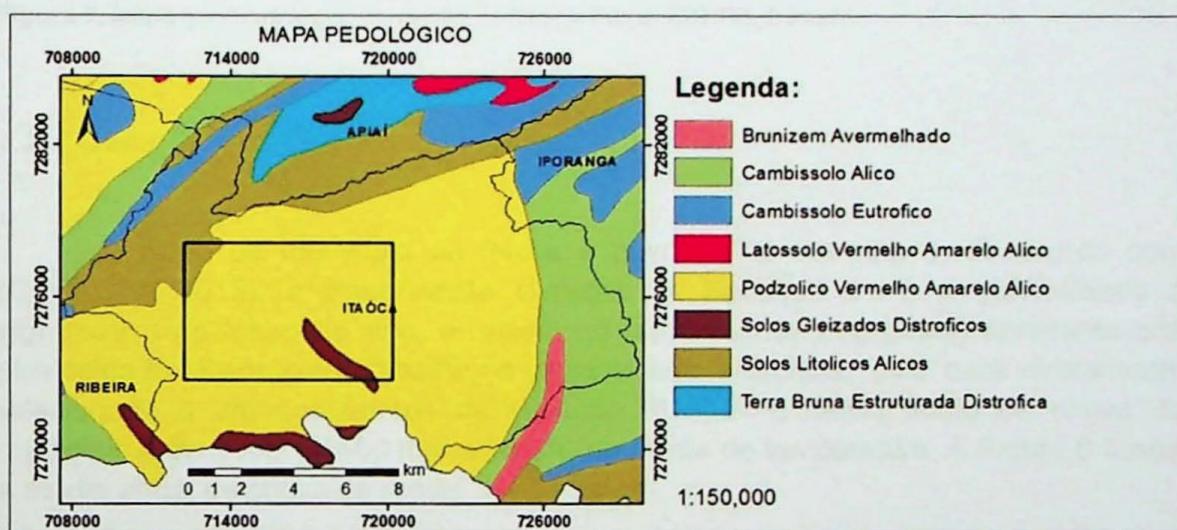
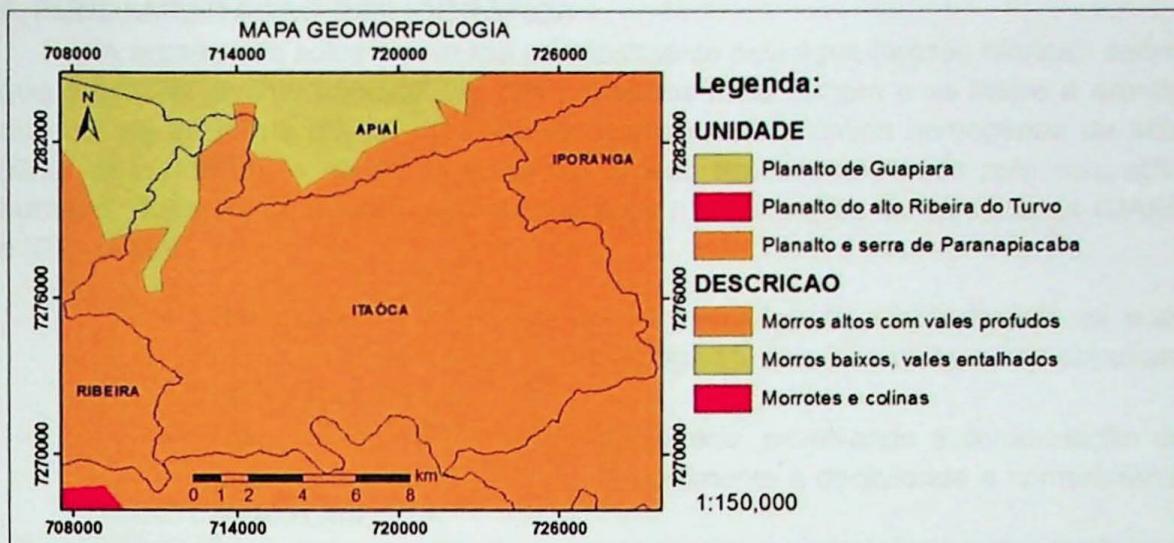


Figura 6. Mapa pedológico da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB (2010). Editado.

#### *4.2.3 Geomorfologia e declividade*

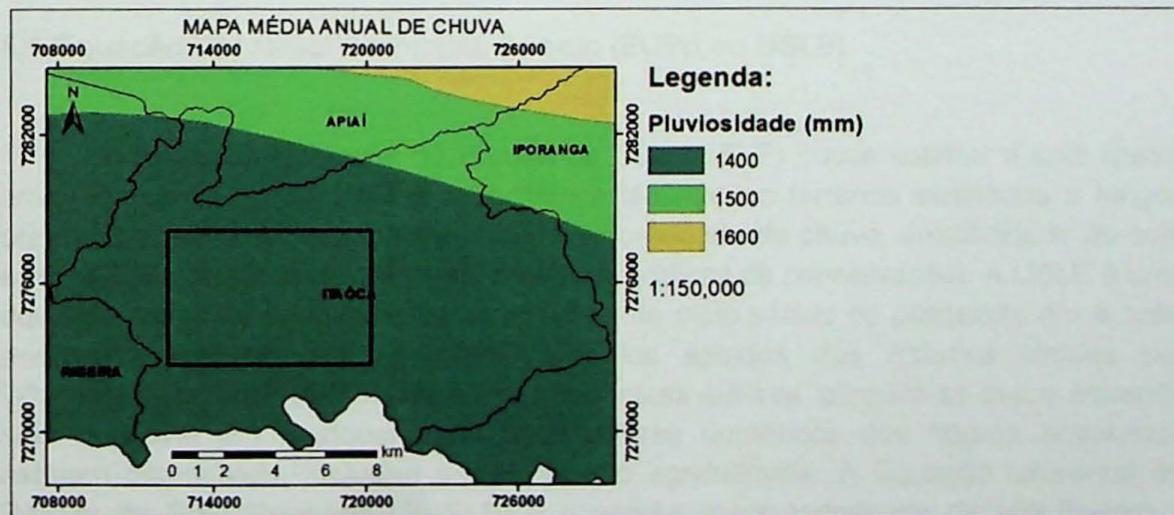
Na UGRHI-11, área de estudo de Dalmas (2013), há sete unidades ou macro compartimentos de relevo, sendo quatro em terras altas e três em terras baixas. A região de Itaoca, no entanto, apresenta apenas unidades de relevo em terras altas. Como consta em Dalmas (2013), elas pertencem à denominada Morfoestrutura da Faixa de Dobramentos do Atlântico. Os macro compartimentos de relevo da região da área de estudo são: Planalto de Guapiara, Planalto e serra de Paranapiacaba e Planalto do alto Ribeira do Turvo. Eles podem ser visualizados na Figura 7, assim como suas descrições. A declividade da área varia de 0° a 80° e relevos atingem 1320 metros.



**Figura 7.** Mapa geomorfológico da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB. Editado.

#### 4.2.4 Clima

O clima do município de Itaoca é quente e temperado, e, de acordo com (CEPAGRI, 2015), a classificação climática de Koeppen é Af. A pluviosidade é significativa ao longo do ano, e, mesmo o mês mais seco (Agosto) apresenta alta pluviosidade. Para este trabalho, a pluviosidade influencia, pois está diretamente relacionada a um dos fatores da equação RUSLE. A média anual de chuva do município é de 1366 – 1400 mm e 23.3°C de média de temperatura. A Figura 8 ilustra a média anual de chuva da região.



**Figura 8.** Mapa de média anual de chuva da região de Itaoca. Fonte: SIG-RB (2010). Editado

## 5. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

A erosão dos solos é causada principalmente pela água (erosão hídrica), sendo que a erosão laminar constitui um dos processos mais comum e se refere à erosão que ocorre de forma difusa, erodindo teoricamente uma lâmina homogênea de solo (Brito *et al.*, 1988). A perda de solos por erosão laminar, acelerada pela ocupação humana, depende de fatores naturais que podem ser reunidos em três grupos (DAEE e IPT, 1989)

- Relacionados à natureza do solo, envolvendo principalmente as suas características físicas e morfológicas, tais como: textura, estrutura, permeabilidade etc.;
- Relacionadas à morfologia do terreno, envolvendo a conformação da encosta, no que se refere principalmente à declividade e comprimento da encosta;
- Relacionados ao clima, envolvendo principalmente a quantidade de água que atinge a superfície do terreno, causando remoção dos solos através das chuvas.

A elevada quantidade de perda de solo nos mais variados ambientes ao redor do mundo tornou necessário o desenvolvimento de metodologias para estimar a magnitude e a localização das áreas mais propensas à erosão com o propósito de diminuir os seus efeitos (Gurgel *et al.*, 2011).

Na década de 1970, Wischmeier e Smith (1978) desenvolveram a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS ou USLE), o qual estima a taxa média anual de perda de solo por erosão hídrica laminar, sob variadas condições de uso e cobertura do solo, declividade, comprimento de rampa, tipos de solo, chuva e práticas de gestão. Essa Equação será detalhada a seguir.

### 5.1 Equação Universal de Perdas de solo (EUPS ou USLE)

A Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) busca estimar a taxa média anual de perda de solo por erosão hídrica laminar em terrenos inclinados a longos prazos, baseando-se em fatores naturais (erosividade da chuva, erodibilidade do solo e relevo) e antrópicos (uso do solo, manejo e práticas de conservação). A USLE é uma equação empírica e fundamenta-se em mais de meio século de pesquisas em erosão realizadas em terrenos agrícolas de vários estados dos Estados Unidos por Wischmeier e Smith (1978). De acordo com estes autores, acredita-se que a equação seja aplicável em qualquer local onde valores numéricos dos fatores envolvidos estejam disponíveis, inclusive em áreas não agricultáveis. A Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) é a versão computadorizada da USLE, tem a mesma fórmula e pode lidar com combinações mais complexas de práticas de cultivos e uma melhor variedade de inclinação de terrenos (Stone e Hilborn, 2012). Esta é a versão da equação a ser utilizada neste Trabalho.

A equação consiste na multiplicação simples dos fatores e é representado desta forma (Dalmas, 2013):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Onde:

A = perda média anual de solo por unidade de área.

R = erosividade da chuva: capacidade da chuva em provocar erosão num solo desprotegido, sendo relacionada à energia cinética, intensidade de precipitação e lâmina total precipitada.

K = erodibilidade do solo: é representada pela resistência do solo à erosão hídrica, sendo relacionada a atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos do solo.

L = comprimento do declive: relação de perda de solo entre um comprimento de declive qualquer e um comprimento de rampa de 25 metros para o mesmo solo e grau de declive.

S = grau de declive: relação de perda de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa.

C = uso e manejo do solo: relação de perda de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes desse terreno mantido continuamente descoberto.

P = práticas conservacionistas: relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática (curvas de nível, por exemplo) e as perdas quando o cultivo é em morro abaixo.

De acordo com Khosrowpanah *et al.* (2007), as unidades da perda média anual de solo (A) são conduzidas pelos fatores R (MJ mm/ha. h ano) e K (ton ha. h/ha. MJ mm), pois estes representam a causa e o efeito da erosão de solo. Os fatores restantes da USLE (L,S,C e P) são entendidos como ajustes, uma vez que a equação foi formulada examinando dados de erosão coletados em terrenos agrícolas em que foi fixado um comprimento de rampa de aproximadamente 25 metros e um grau de declive de 9%. Os fatores L,S, C e P ajustam para condições reais em relação às condições dos terrenos agrícolas experimentais, portanto estes fatores representam as relações destas diferenças e são adimensionais. A unidade para perda média anual de solo por unidade de área (A), portanto, é ton/ha. ano.

Wischmeier e Smith (1978) apontam ainda que os efeitos do comprimento de rampa e ângulo de rampa (fatores L e S, respectivamente) na taxa de erosão laminar do solo são avaliados separadamente em pesquisa, no entanto, em aplicações em campo, consideram-se os dois como fator topográfico LS, o que o torna mais prático.

Em relação ao fator P (práticas conservacionistas), os terraços, conhecidos comumente como curvas de nível no controle da erosão, são estruturas que têm a função de diminuir o comprimento da vertente, reduzindo, deste modo, a capacidade da água da enxurrada em causar erosão. Com sua ausência, as rampas, sob a óptica do escorramento superficial, permanecem alongadas, aumentando a energia, a

capacidade e competência do fluxo superficial da água em causar erosão (Andreoli e Torres, 2014).

## 5.2 Aplicação da RUSLE no Vale do Ribeira

Dalmas (2013) em sua tese utilizou a metodologia do RUSLE para gerar o mapa de susceptibilidade à erosão da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI-11) correspondente à Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira do Iguape e Litoral Sul e pequenas bacias litorâneas adjacentes.

Dalmas (2013), assim como Khosrowpanah *et al.* (2007), Paranhos Filho *et al.* (2003), Gurgel *et al.* (2011), utilizaram SIG para desenvolverem mapas baseados em RUSLE em outras localidades, pois o SIG permite: completa integração entre os dados heterogêneos para os parâmetros da equação; cálculo em escala de mapa; rápido recálculo na entrada de dados atualizados e simulação de diferentes cenários de susceptibilidade à erosão a partir da alteração de dados de natureza antrópica.

Baseando-se principalmente em Bertoni e Lombardi (1990) e utilizando programas computacionais de base SIG (Sistema de Informação Geográfica), Dalmas (2013) gerou mapa de cada um dos fatores para no final produzir o mapa de susceptibilidade à erosão.

### Erosividade da chuva (R)

Este fator é calculado pela aplicação desta equação:

$$EI = 6.886 \times (r^2/P)^{0.85}$$

Onde:

EI = média mensal de erosão em MJ mm/ha. h ano;

r = média pluviométrica mensal em milímetros;

P = média pluviométrica anual em milímetros.

O valor de EI calculado de acordo com Bertoni e Lombardi (1990), levou em conta valores pluviométricos mensais e anuais referentes a janeiro de 2000 a julho de 2012 (total de 151 registros), obtidos através de dados imagens TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), os quais foram recortados no limite da UGRHI-11, vetorizados e resultando em 24 pontos. Assim, a erosividade foi calculada para cada ponto, realizada uma interpolação e gerado um mapa raster de erosividade.

### Erodibilidade do solo (K)

O fator erodibilidade do solo se relaciona ao poder da resistência do solo específico contra forças erosivas. As propriedades do solo que influenciam o fator K são aquelas relacionadas à velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água, além de resistências diferenciadas às forças de dispersão, salpico, abrasão, transporte pela chuva e escoamento. Sobre o mapa pedológico vetorizado na escala 1:250.000, atribuem-se os valores de erodibilidade

em ton ha. h/ha. MJ mm para cada classe de solo segundo a Tabela 1 de acordo com Bertoni e Lombardi (1990) e, em seguida, realiza-se a transformação em formato raster.

**Tabela 1.** Valores de erodibilidade atribuídos às classes de solos.

Classe Pedológica	Fator K	Classe Pedológica	Fator K	Classe Pedológica	Fator K
Brunizem Avermelhado	0,0300	Podzolico Bruno Acimentado Eutrófico	0,0180	Solos Gleizados Distróficos	0,0011
Cambissolo Álico	0,0350	Podzolico Vermelho Amarelo Álico	0,0400	Solos Gleizados Tiomórficos	0,0011
Cambissolo Distrófico	0,0350	Podzol	0,0270	Solos Litólicos Álicos	0,0008
Cambissolo Eutrófico	0,0350	Podzolico Vermelho Amarelo Álico Distrófico	0,0396	Solos Litólicos Distróficos	0,0008
Latossolo Amarelo Álico	0,0133	Solo de Mangue	0,0009	Solos Orgânicos Álicos	0,0011
Latossolo Variação Una Distrófico ou Álico	0,0133	Solos Aluviais Distróficos	0,0010	Solos Orgânicos Tiomórficos	0,0011
Latossolo Vermelho Amarelo Álico	0,0133	Solos Gleizados Álicos	0,0011	Terra Bruna Estruturada Distrófica	0,0133

#### Comprimento e grau de declive (LS)

Considerando a associação dos fatores L e S, o mapa do fator LS foi gerado a partir de um mapa topográfico (escala 1:50.000) com cotas de 20 em 20 metros, que primeiramente foi rasterizado para um Modelo Numérico de Terreno utilizando ArcMap e, transformado em mapa de declividade no módulo 'declividade' do programa computacional IDRISI Andes (Eastman, 2006) posteriormente. Em seguida, o mapa foi reclassificado conforme a Tabela 2, conforme Bertoni e Lombardi (1990):

**Tabela 2.** Valores de LS atribuídos às classes de declividade.

Declive (%)	Fator LS	Declive (%)	Fator LS	Declive (%)	Fator LS
1	0,18	8	2,08	16	4,72
2	0,41	10	2,71	18	5,43
4	0,92	12	3,36	20	6,14
6	1,48	14	4,03		

#### Fatores de uso e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P)

Apesar do tratamento independente dos fatores C e P no RUSLE, Stein *et al.* (1987) apontam alta correlação entre eles, e, deste modo, não podem ser analisados individualmente no cálculo da perda de solo por erosão laminar. Desta forma, Dalmas (2013) gerou um único mapa (fator CP) utilizando mapa de Uso do Solo da UGRHI-11 (dados obtidos do SIG-RB, 2010) na escala 1:250.000 e atribuindo valores de CP para cada tipo de uso, a partir da Tabela 3, de acordo com Paranhos Filho *et al.* (2003):

**Tabela 3.** Valores de CP atribuídos às classes de uso do solo.

Descrição	Fator CP	Descrição	Fator CP	Descrição	Fator CP
Aeroportos	0,00000	Cultura Perene	0,01000	Mata Ciliar	0,00004
Campo Antrópico	0,10000	Cultura Semi-Perenes	0,01500	Mineração	0,10000
Campos úmidos	0,00000	Industrial	0,00000	Reflorestamento	0,00010
Corpos d'água	0,00000	Mangues	0,00000	Restingas	0,00000
Cultura Anual	0,20000	Mata	0,00004	Área Urbana	0,00000

Após a disposição de todos os quatro mapas no formato raster e com células de tamanho de 30 metros, o passo final foi a de fazer a multiplicação simples envolvendo as quatro camadas (mapas) no IDRISI Andes (Eastman, 2006). Esse procedimento resultou no mapa raster de susceptibilidade à erosão na área estudada.

### 5.3 Incerteza associada a operações aritméticas de mapas em SIG

Como mencionado anteriormente, a equação de RUSLE envolve procedimentos de multiplicação de mapas dos fatores em ambiente SIG. De acordo com Yamamoto *et al.* (2015), resultados de operações aritméticas realizadas com variáveis aleatórias apresentam incertezas, haja vista as variáveis individuais estarem sujeitas a incertezas. Na verdade, qualquer resultado obtido a partir de uma amostra estará sujeito à incerteza, devido à falta de conhecimento por amostragem insuficiente.

Deste modo, antes de tratar sobre variância de interpolação, alguns conceitos básicos envolvidos nesta monografia serão abordados com breves descrições: métodos de amostragem, média  $E[X]$ , variância  $Var[X]$ , covariância  $Cov(X,Y)$ , interpolação e equações multiquádricas.

A amostra, sendo subconjunto de valores do fenômeno espacial, deve reproduzir a distribuição e variabilidades espaciais tanto em tamanho (número de pontos de dados) como em termos de distribuição dos pontos na área de estudo (Yamamoto e Landim, 2013). A amostragem consiste na coleta das unidades de amostragem baseando-se em planejamento e há três tipos: aleatória simples, aleatória estratificada e sistemática. Em amostragem aleatória simples, na população com  $N$  unidades são numerados sequencialmente os pontos de amostragem, os quais possuem coordenadas geográficas e localizam-se dentro da área de estudo, e, em seguida,  $n$  unidades são sorteados sem reposição. Na amostragem aleatória estratificada é feita uma subdivisão da região de estudo em áreas menores com dimensões fixas nas direções leste-oeste e norte-sul. No interior dessas áreas, as coordenadas geográficas são escolhidas aleatoriamente e o ponto é selecionado. O número de pontos selecionados será igual ao número de subáreas ao final do procedimento. A amostragem sistemática consiste em realizá-la sobre nós de uma malha regular, definida (na prática) pelo responsável pela amostragem para otimizar a coleta dos dados dentro da área de estudo (Yamamoto e Landim, 2013). Nesta monografia, o ponto de amostragem é o valor do pixel da cada mapa raster dos fatores da RUSLE.

O trabalho envolve também alguns itens fundamentais da estatística, como esperança matemática, variância e covariância. A esperança matemática é obtida como média aritmética das realizações das variáveis aleatórias. De forma geral, sendo X uma variável aleatória, a esperança matemática ou média é dada por (Yamamoto et al. 2015):

$$E[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Ou seja, o valor da esperança matemática consiste na somatória dos valores dos pontos amostrados dividida pelo número de pontos amostrais.

Como consta em Yamamoto e Landim (2013), essa média atribuída em uma situação real seria supor que os valores são homogêneos espacialmente. No entanto, essa homogeneidade dificilmente acontece na natureza, sendo importante verificar a distribuição e as variabilidades espaciais da função aleatória. Sendo assim, a variância configura uma medida de dispersão em torno da média, uma medida de incerteza associada à média e tem esta equação (Yamamoto et al. 2015):

$$Var[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - E[X])^2$$

Ou seja, o valor da variância é dado pela somatória da diferença ao quadrado entre cada ponto amostrado e a esperança matemática (média) previamente calculada, dividida pelo número de pontos amostrais.

Por fim, a covariância é uma medida da relação mútua entre duas variáveis distintas (Yamamoto e Landim, 2013), por exemplo, variáveis R e K da equação de RUSLE (fatores erosividade da chuva e erodibilidade do solo respectivamente). Considerando X e Y duas variáveis aleatórias, a equação geral é dada por (Yamamoto et al. 2015):

$$Cov(X, Y) = E[XY] - E[X]E[Y]$$

O processo de reprodução das características do fenômeno espacial com base em pontos amostrais designa-se interpolação ou estimativa (Yamamoto e Landim, 2013). A interpolação ou estimativa do ponto não amostrado ( $Z^*$ ) é realizada por ajuste de funções matemáticas locais (utilizando pontos amostrados mais próximos ao ponto não amostrado) ou globais (todos os pontos amostrados são considerados). Nesse contexto, supondo valores de pontos conhecidos  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ , o valor  $Z^*$  a ser estimado para qualquer local será igual a:  $Z^* = \sum p_i Z_i$ , ou seja, somatório da multiplicação entre os valores dos pontos amostrais e respectivos pesos  $p_i$ . A diferença entre os diversos métodos estimadores consiste no modo como  $Z_i$  e  $p_i$  são escolhidos. Neste trabalho, a interpolação será realizada utilizando equações multiquádricas.

As equações multiquádricas (Hardy, 1971) foram inicialmente propostas para interpolação global (considerando todos os pontos de dados simultaneamente). No entanto, mais tarde, esse método foi estendido para interpolações locais (Yamamoto e

Landim, 2013). Essas equações compreendem funções de base radial em que, para calcular o ponto a ser estimado  $Z^*$ , são envolvidos pontos vizinhos amostrados mais próximos dentro de um raio definido pelo tipo de função escolhido.

Estimativas locais e incertezas usando equações multiquádricas são propostos por Yamamoto et al. (2015). A variância de interpolação é uma medida de incerteza que leva em conta tanto a configuração dos pontos quanto seus valores. Deste modo, pelas equações multiquádricas possuírem fórmulas ponderadas, ou seja, atribuirão pesos para pontos amostrais, é possível tê-las como base para determinar a variância de interpolação.

De acordo com Yamamoto et al. (2015), para cada célula do mapa raster, a relação com os dados vizinhos pode ser estabelecida pela equação dual de interpolação por multiquadráticas:

$$Z_{MQ}^*(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i)$$

Os pesos  $\{w_i, i = 1, K = n\}$  são gerados a partir da solução do sistema de equações lineares.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n w_j \phi(x_i - x_j) + \mu &= \phi(x_i - x_o) \text{ for } i = 1 \text{ to } n \\ \sum_{j=1}^n w_j &= 1 \end{aligned}$$

Onde  $\mu$  é o multiplicador de Lagrange e  $\phi(x) = \sqrt{|x|^2 + C}$  é a função de base radial utilizada (equação multiquádrica).

Portanto, a variância que mede a incerteza associada ao método de interpolação por equações multiquádricas é a denominada variância de interpolação e tem esta fórmula:

$$S_o^2(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i [Z(x_i) - Z_{MQ}^*(x_o)]^2$$

Nesse contexto, as operações em mapas raster envolvem pelo menos duas variáveis ao mesmo tempo. Considerando  $Z_1(x)$  e  $Z_2(x)$  duas variáveis a serem combinadas aritmeticamente, ambas possuem o mesmo número de dados, mesma configuração dos dados e mesmas coordenadas geográficas (condições fundamentais para conduzir operações aritméticas entre as variáveis  $Z_1(x)$  e  $Z_2(x)$ ). Por causa dessas condições apontadas anteriormente, os pesos a serem utilizados serão exatamente os mesmos para as duas variáveis.

Deste modo, os pontos a serem estimados por equações multiquádricas para as variáveis  $Z_1(x)$  e  $Z_2(x)$  são dados por (Yamamoto et al. 2015):

$$Z_{MQ}^*(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i Z_1(x_i)$$

$$Z_{MQ_2}^*(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i Z_2(x_i)$$

A média envolvendo as duas variáveis,  $E[Z_1(x)Z_2(x)]$ , como estatística local é calculada deste modo:

$$E[Z_1(x)Z_2(x)] = \sum_{i=1}^n (w_i Z_1(x_i) Z_2(x_i))$$

Para a covariância local (covariância de interpolação):

$$Cov(Z_1(x), Z_2(x)) = \sum_{i=1}^n w_i Z_1(x_i) Z_2(x_i) - \left( \sum_{i=1}^n w_i Z_1(x_i) \right) \left( \sum_{i=1}^n w_i Z_2(x_i) \right)$$

A equação dada acima permite calcular a covariância célula-a-célula, sendo fundamental para a propagação da incerteza. Nota-se que a covariância de interpolação é calculada diretamente dos dados da vizinhança usando, portanto, os mesmos pesos da equação multiquádratica.

Por fim, a variância de interpolação pode ser calculada desta forma:

$$S_{o,1}^2(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i [Z_1(x_i) - Z_{MQ_1}^*(x_o)]^2$$

$$S_{o,2}^2(x_o) = \sum_{i=1}^n w_i [Z_2(x_i) - Z_{MQ_2}^*(x_o)]^2$$

Todas essas equações mostradas são fundamentais, pois elas são o alicerce das equações que calculam a média e a variância do produto de duas variáveis aleatórias conforme aproximação proposta por Mood *et al.* (1974) utilizando séries de Taylor. Para isso, serão mantidas estas relações:

$$\mu_x = Z_{MQ_1}^*(x); \mu_y = Z_{MQ_2}^*(x); \sigma_x^2 = S_{o,1}^2(x_o); \sigma_y^2 = S_{o,2}^2(x_o) \text{ and } \sigma_{xy} = Cov(Z_1(x), Z_2(x)).$$

Deste modo, a equação da média do produto de duas variáveis aleatórias é dada pela equação (1):

$$E[f(x,y)] = \mu_x \mu_y + \sigma_{xy}$$

E a equação da variância do produto de duas variáveis aleatórias é dada pela equação (2):

$$\begin{aligned} Var[f(x,y)] &= \mu_y^2 \sigma_x^2 + \mu_x^2 \sigma_y^2 \\ &+ E[(x - \mu_x)^2 (y - \mu_y)^2] \\ &- \sigma_{xy}^2 + 2\mu_x \mu_y \sigma_{xy} \\ &+ 2\mu_y E[(x - \mu_x)^2 (y - \mu_y)] \\ &+ 2\mu_x E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] \end{aligned}$$

Essas são as equações (1 e 2) a serem consideradas nesta monografia. Como se pode observar, o cálculo dessas estatísticas leva em conta momentos de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordem. Os detalhes do desenvolvimento matemático podem ser encontrados em Mood et al. (1974).

## 6. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho, de modo geral, constituiu-se por duas etapas fundamentais: obtenção dos dados apropriados e, com eles, produção do mapa de incerteza.

O mapa de incerteza foi desenvolvido através da variância de interpolação. Para tanto, utilizou-se o software Geovisual (versão estendida, 2015), programa de cunho acadêmico desenvolvido pelo Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto. Os dados brutos da UGRHI-11 foram cedidos pelo Prof. Dr. Fabrício Bau Dalmas (coorientador do Trabalho) e reprocessados utilizando o programa ArcMap 10.3. Os procedimentos utilizados para atingir os objetivos estão discriminados com detalhes abaixo.

Os mapas do fator R (erosividade da chuva) e fator K (erodibilidade do solo) foram obtidos dos mapas vetoriais da UGRHI-11 do banco de dados de Dalmas (2013), efetuando-se recorte utilizando máscara do município de Itaoca (também em arquivo vetorial). Para o mapa LS (fator topográfico), também de Dalmas (2013), em formato raster, foi utilizado o mesmo procedimento de recorte, porém utilizando a ferramenta 'Processamento de Raster' em 'Ferramentas de gerenciamento de dados', resultando em mapa raster LS de Itaoca. Os mapas vetoriais dos fatores R e K de Itaoca foram transformados em raster com células de 30 metros através da ferramenta 'Polígono para raster' em 'Ferramentas de conversão'. Os mapas vetoriais dos fatores R e K estão representados nas Figuras 9 e 10. O mapa raster LS é apresentado na Figura 11.

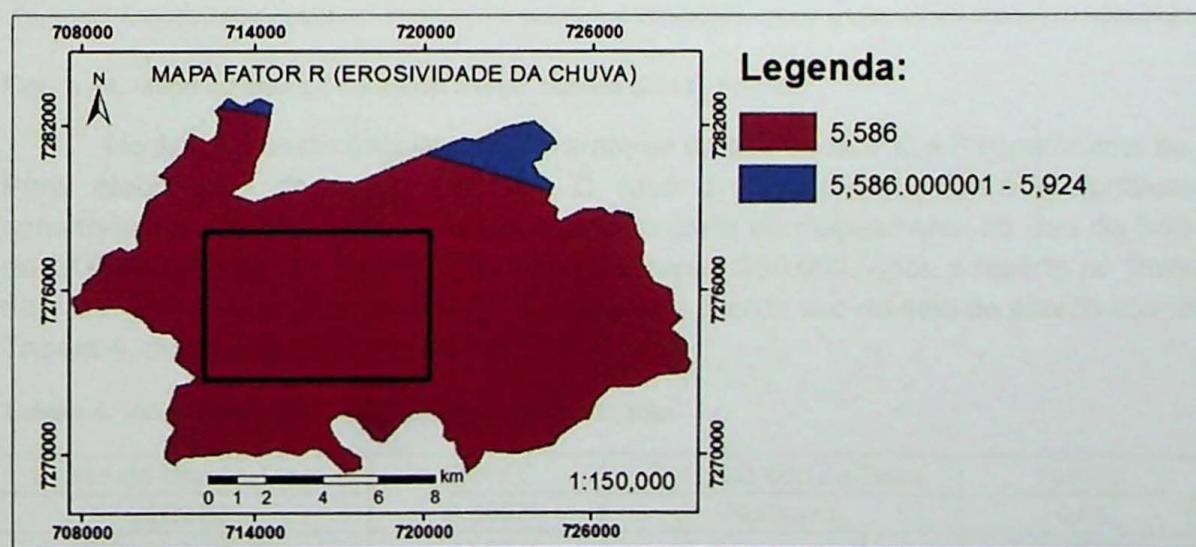


Figura 9. Mapa do fator R de Itaoca. Fonte: Dalmas (2013). Editado.

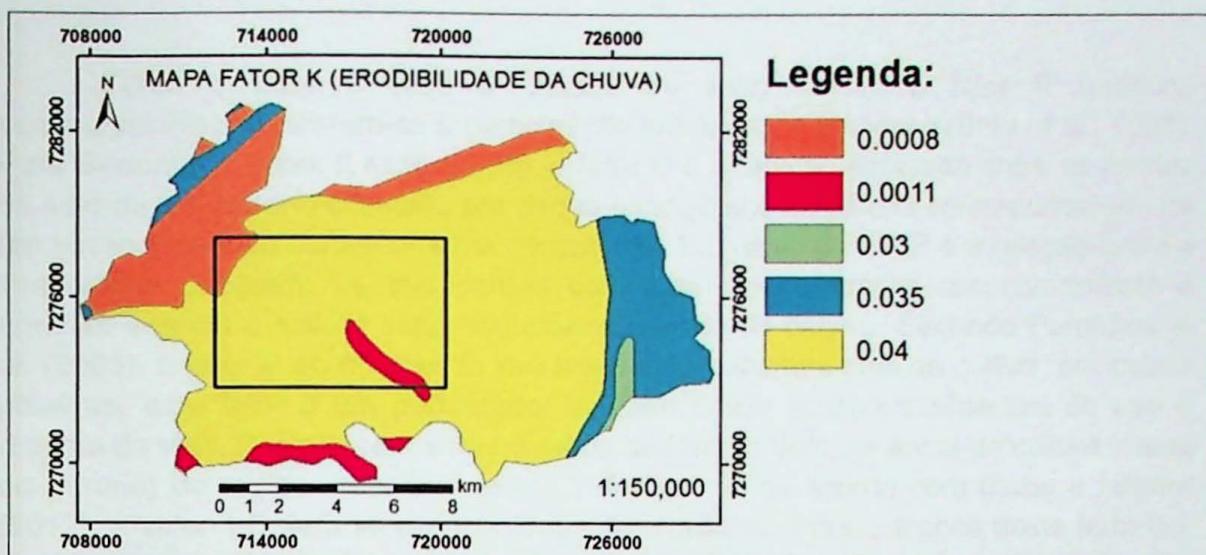


Figura 10. Mapa do fator K de Itaoca. Fonte: Dalmas (2013). Editado.

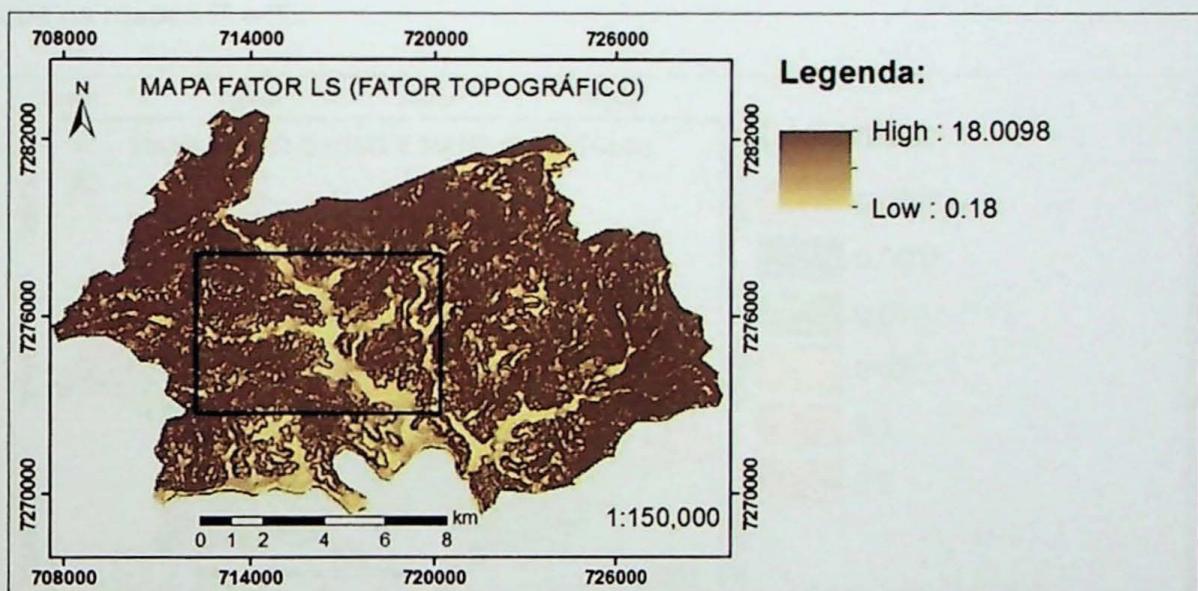


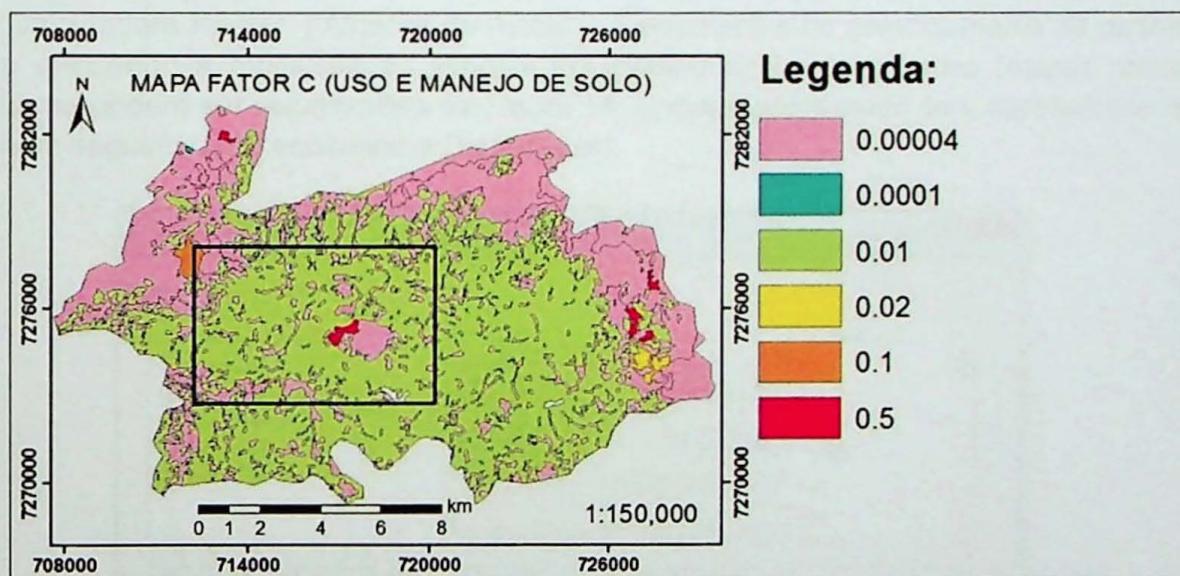
Figura 11. Mapa do fator LS de Itaoca. Fonte: Dalmas (2013). Editado.

No âmbito deste trabalho, elaboraram-se mapas do fator C e P separadamente. Para elaboração do mapa do fator C (uso e manejo de solo) e P (práticas conservacionistas) foi obtido arquivo digital da carta de mapeamento de Uso do Solo da UGRHI-11 junto ao SIG-RB (2010), na escala 1:250.000. Após o recorte no limite da área, atribuiu-se valores de fator C para cada tipo de uso do solo de acordo com a Tabela 4, de acordo com Stein *et al.* (1987):

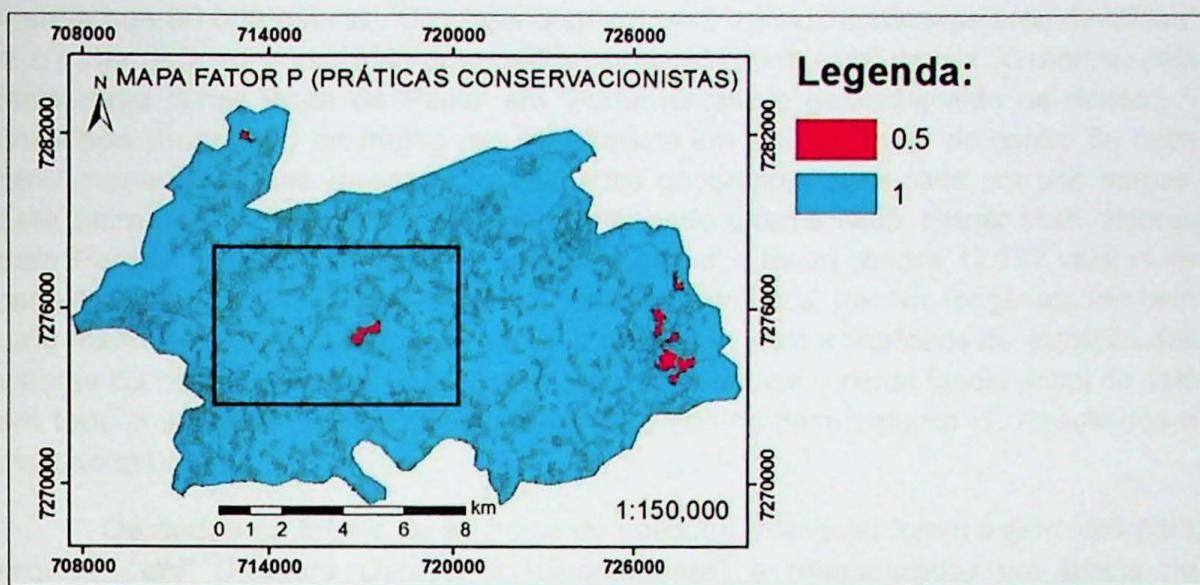
Tabela 4. Valores de C atribuídos aos tipos de uso do solo.

Classe de Uso da Terra	Fator C	Classe de Uso da Terra	Fator C
Cerrado	0,0007	Pastagem	0,01
Cultura Irrigada	0,12	Reflorestamento	0,0001
Cultura Anual	0,20	Campo Higrófilo	0,0000
Cultura Permanente	0,02	Represas	0,0000

Tanto o fator C (uso e manejo de solo) quanto o fator P (práticas conservacionistas) referem-se à participação antrópica no processo (Brito *et al.*, 1998). Para Bertoni e Lombardi Neto (2005), o fator C é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto. Enquanto o fator P é a relação entre a intensidade esperada de tais perdas com determinada prática conservacionista e aquelas quando a cultura está plantada no sentido do declive. Segundo Paranhos *et al.* (2003), o fator P só é aplicado em áreas cuja cobertura seja de cultivo, em outras palavras, este fator é um ponderador do fator C em situações especiais de uso e manejo de solo. Deste modo, sobre o mapa de Uso do Solo, as áreas de cultura (anual ou perene) da região recebem valor 0,5 de fator P, de acordo com Stone e Hilborn (2012), e valor 1,0 para as demais áreas do município. Para o âmbito deste trabalho, nas áreas agricultáveis foi considerada apenas prática de cultivo em contorno (curvas de nível), prática predominante na região da UGRHI<sup>11</sup>. Os mapas vetoriais C e P de Itaoca (Figuras 12 e 13) também foram convertidos em mapa raster do mesmo modo que os mapas R e K.

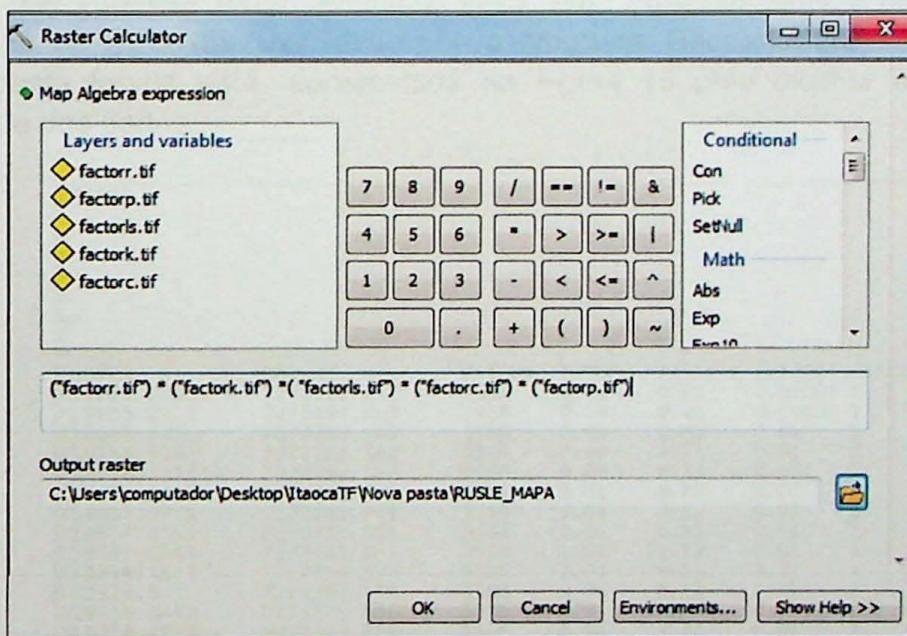


**Figura 12.** Mapa do Fator C de Itaoca.



**Figura 13.** Mapa do fator P de Itaoca.

O mapa de RUSLE do município pôde então ser gerado utilizando a ferramenta 'Calculadora Raster' ('Álgebra de mapa' – 'Ferramentas de gerenciamento de dados') e efetuando a multiplicação simples envolvendo as cinco camadas (mapas raster) como podem ser visualizadas na Figura 14. O mapa processado será apresentado no item seguinte (7. Resultados e Discussões).



**Figura 14.** Interface da ferramenta 'Calculadora Raster' do programa ArcMap 10.3. Ferramenta que possibilita a multiplicação dos mapas para gerar mapa RUSLE.

Para os dados serem utilizados no programa Geovisual, foi definido um polígono retangular no interior do município de Itaoca, em razão da dificuldade de se processar um número muito grande de dados se fosse considerado o município todo. Deste modo, o arquivo vetorial do polígono foi criado numa área em que fosse possível obter boa variabilidade dos dados e numa dimensão em que comportasse

menos que 50.000 células. O polígono criado para o trabalho abrange área de 43 km<sup>2</sup> e, a partir dele, foi construída uma malha regular de pontos (células de 30 metros) pela ferramenta 'Criar Rede de Peixe' em 'Ferramentas de gerenciamento de dados'. A finalidade da criação da malha regular consiste em extrair o valor do centro de cada pixel exatamente nas mesmas coordenadas geográficas para cada um dos mapas. Este último procedimento foi executado utilizando a ferramenta 'Extrair Multi Valores para Pontos' em 'Ferramentas de análise espacial' e foram obtidos 42.727 valores de cada fator da RUSLE apresentados na tabela de atributos. Por fim, foi gerada também uma malha regular de pontos para todo o município, com a finalidade de extração dos valores da célula do mapa RUSLE final para se conhecer a perda média anual de solo em todo o limite de Itaoca. O valor será discutido no item seguinte (7. Resultados e discussões).

Os dados na tabela de atributos do polígono retangular foram exportados para arquivo '.dbf' (*Feature Dataset in Geodatabase*) e reorganizados em tabela no programa Microsoft Office Excel. A tabela única foi estruturada em formato GeoEAS, ou seja, deste modo: a primeira linha é o cabeçalho, o qual informa o nome do projeto, a segunda linha, onde consta o número "7", se refere à quantidade de variáveis a serem consideradas. As linhas subsequentes descrevem cada variável, sendo a primeira e a segunda as coordenadas geográficas "X" e "Y" respectivamente; a terceira, quarta, quinta, sexta e sétima comportam os fatores da RUSLE, ou seja, os fatores "R", "K", "LS", "C" e "P" respectivamente. Cada variável é então disposta em uma coluna. É importante destacar que nos pontos onde não foram encontrados valores das variáveis foram atribuídos valor "-99". Posteriormente, a tabela Excel foi exportada na extensão '.txt', dado que o programa Geovisual aceita este formato. Parte desta tabela está representada na Figura 15 para mostrar a organização requerida dos dados.

ITAOCÀ						
7						
X						
Y						
R						
K						
LS						
C						
P						
COORDX	COORDY	FATORR	FATORK	FATORLS	FATORC	FATORP
719624.8385	7272384.942	5586	0.04	0.41	0.00004	1
719655.2117	7272384.462	5586	0.04	0.41	0.00004	1
719685.585	7272383.982	5586	0.04	0.41	0.01	1
719715.9582	7272383.502	5586	0.04	2.71	0.01	1
719746.3315	7272383.022	5586	0.04	6.13	0.01	1
719776.7047	7272382.541	5586	0.04	6.13	0.01	1
719807.0779	7272382.061	5586	0.04	3.3	0.01	1
719837.4512	7272381.581	5586	0.04	6.13	0.01	1
719867.8244	7272381.1	5586	0.04	6.13	0.01	1
719898.1977	7272380.62	5586	0.04	6.13	0.01	1
719928.571	7272380.139	5586	0.04	6.13	0.01	1
719958.9442	7272379.659	5586	0.04	6.13	0.01	1
719989.3175	7272379.178	5586	0.04	3.35	0.01	1
720019.6908	7272378.697	5586	0.04	6.13	0.01	1

Figura 15. Tabela dos dados de Itaoca no formato GeoEAS, requerido pelo programa Geovisual.

No programa Geovisual (versão estendida, 2015), os dados foram submetidos à reamostragem na forma aleatória estratificada, em que amostragem aleatória é realizada em estratos e, desse modo, foram obtidos 339 pontos a partir dos 42.727 pontos originais. Após esse procedimento, os dados foram incluídos no módulo 'OrdKrig2'. Para cada um dos fatores, foi realizada interpolação por equações

multiquádricas e gerado mapa de distribuição da variável. Em seguida, foi obtida a variância de interpolação para cada um deles. Os mapas das estimativas e das variâncias são apresentados no item seguinte (7. Resultados e Discussões). A interface do programa pode ser visualizada na Figura 16.

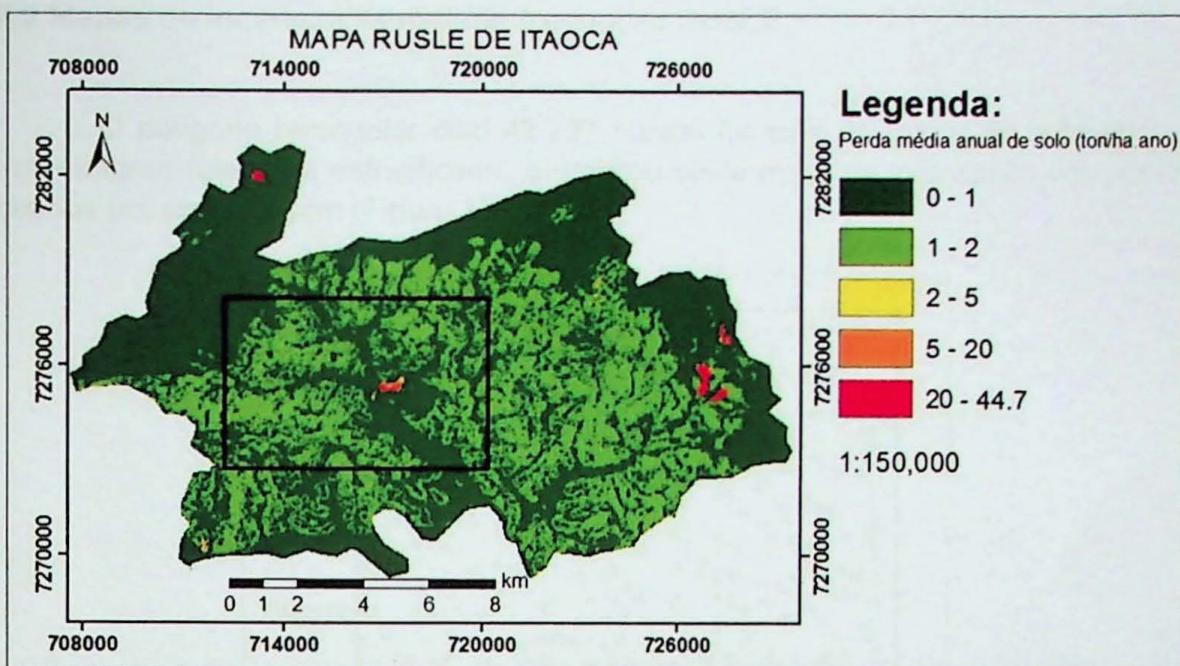


**Figura 16.** Interface geral do programa Geovisual.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Mapa RUSLE de Itaoca

O produto final gerado pela multiplicação dos cinco mapas raster dos fatores obtidos, em programa de base SIG, resulta no mapa que indica a quantidade média anual de toneladas por hectare de solo que se perde por erosão hídrica laminar em cada célula (dimensões de 30 metros), e ele está ilustrado na Figura 17.



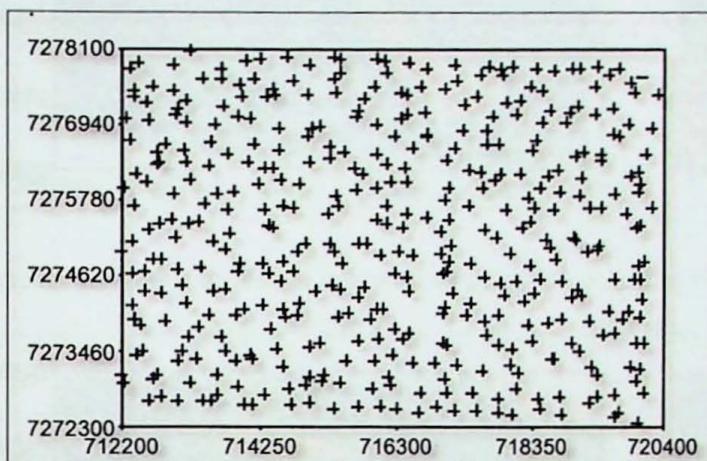
**Figura 17.** Mapa de perda média anual de solo do município de Itaoca, desenvolvido através da equação de RUSLE.

A perda média anual de solo levando em consideração todo o município de Itaoca e utilizando o mapa RUSLE gerado, é de 0,67 toneladas por hectare. O mapa RUSLE aqui gerado utilizou dados de chuva no intervalo dos anos 2000 a 2012 e o mapa de Uso do Solo de 2010, ou seja, considerando que fatores referentes à declividade e pedologia não variam muito em uma escala de tempo de poucos anos, tanto esse valor médio de toda a área, quanto o valor calculado para cada célula do mapa são considerados como referentes aos anos 2010-2012. Ou seja, esse valor certamente alterará com o tempo e com as modificações referentes ao uso de solos (aumento ou diminuição das áreas de agricultura, áreas de mineração, devastação ou reflorestamento, etc.). Do mesmo modo, a implantação de técnicas agrícolas de conservação de solo como utilização de curvas de nível também alteram o valor final. Assim sendo, uma das metodologias utilizada nesta monografia que combina a equação de RUSLE e programas computacionais de base SIG é bastante interessante, pois há a possibilidade de reprocessar mapas RUSLE assim que os dados são atualizados. O reprocessamento é importante, uma vez que possibilita o monitoramento da perda de solos e permite a análise da sua evolução em decorrer dos anos, de forma que se busquem procedimentos a fim de evitar ou diminuir a erosão.

Em relação aos valores em cada célula do mapa apresentado, observa-se que a maior parte de Itaoca (97%) apresenta perda média anual de solo menor que duas toneladas por hectare, e os altos valores (maiores que 20 ton/ha) coincidem com áreas de agricultura. Desta forma, mesmo a área toda apresentando altas declividades, pouca variabilidade de tipo de solo e Itaoca apresentando considerável pluviosidade o ano todo, a prática da atividade agrícola é certamente o fator que mais influencia a perda de solos.

## 7.2 Mapas de incerteza associada à equação RUSLE

O polígono retangular com 42.727 pontos da área de estudo foi submetido à amostragem (aleatória estratificada) e resultou neste mapa de localização dos pontos obtidos por amostragem (Figura 18).



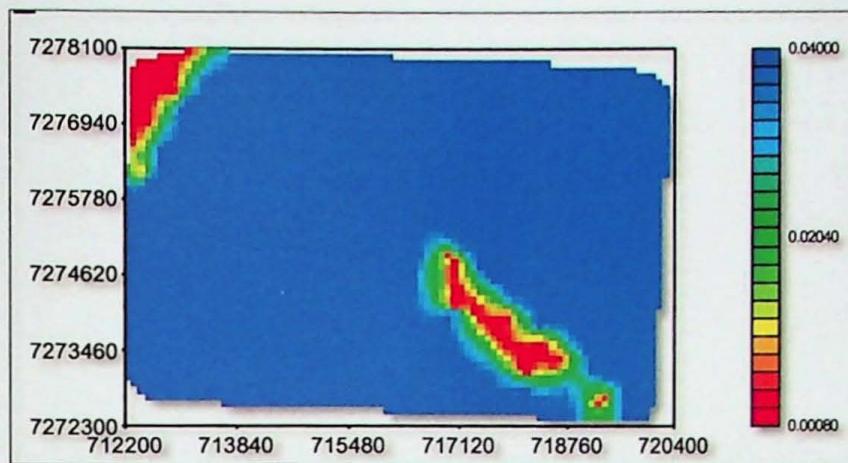
**Figura 18.** Mapa de localização dos pontos obtidos por amostragem aleatória estratificada.

Em seguida, dados obtidos por amostragem de cada um dos fatores interpolados por equações multiquádricas são apresentados abaixo. As Figuras 19, 20, 21, 22 e 23 apresentam os mapas de distribuição dos fatores "R", "K", "LS", "C" e "P" respectivamente.

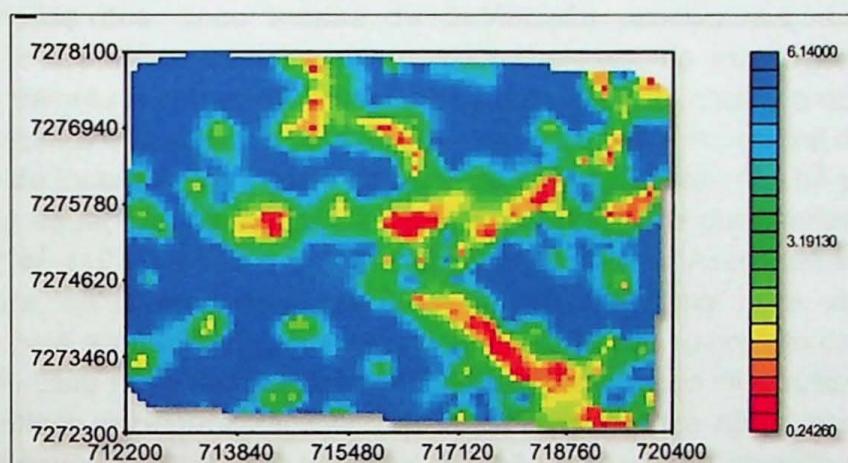


**Figura 19.** Distribuição da variável R obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas.

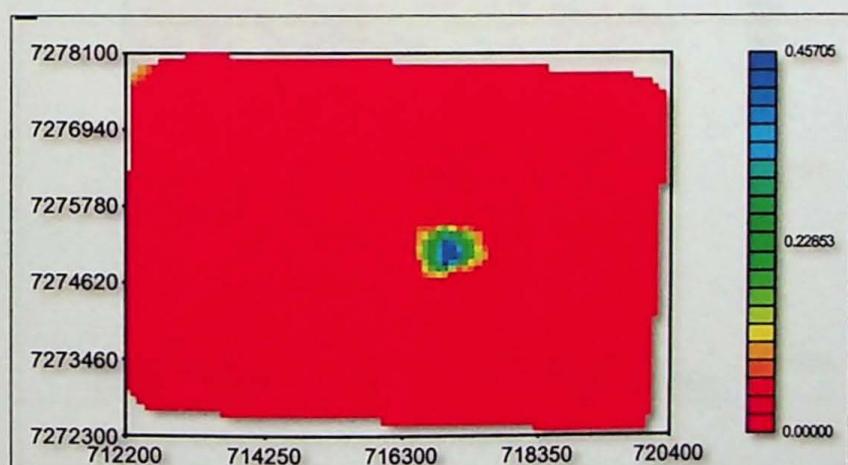
Nota-se que o mapa do fator R (erosividade da chuva) interpolado apresenta um único valor constante (5586.0) em todo o domínio.



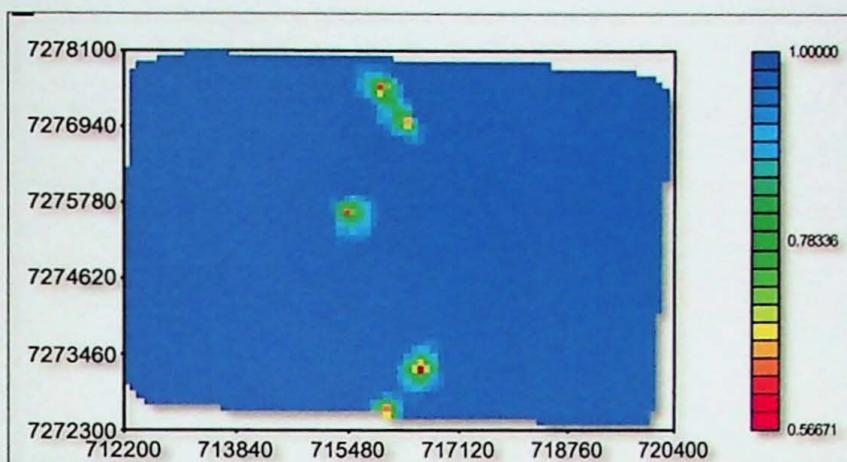
**Figura 20.** Distribuição da variável K obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas.



**Figura 21.** Distribuição da variável LS obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas.

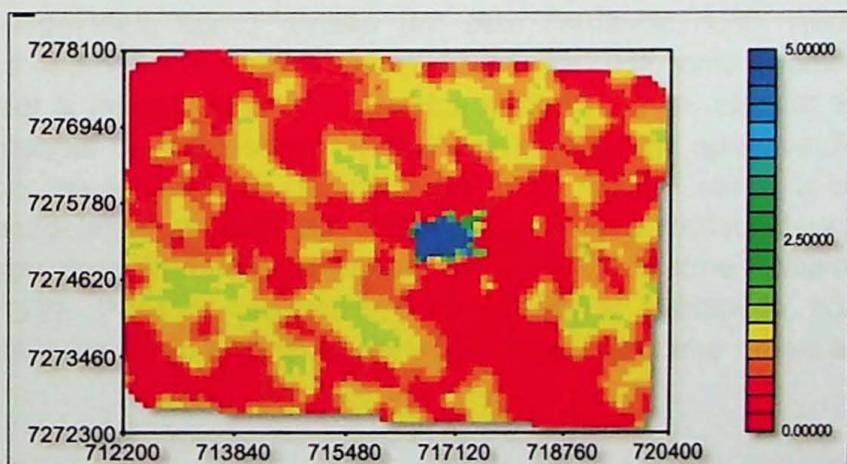


**Figura 22.** Distribuição da variável C obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas



**Figura 23.** Distribuição da variável P obtida por interpolação utilizando equações multiquádricas.

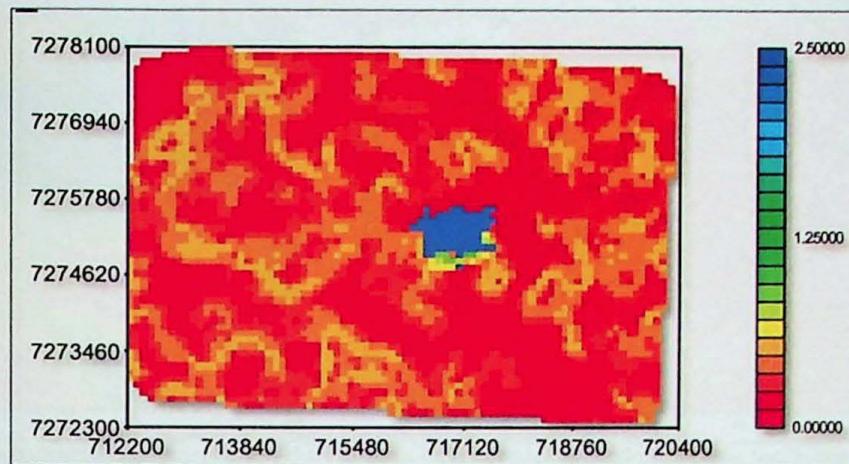
A análise dos cinco mapas de distribuição permitiu que, à exceção das variáveis K e LS (Figuras 20 e 21 respectivamente), de modo geral as demais apresentam valores constantes sobre a área de estudo. O grande problema de uma variável constante é que a sua variância é nula e, portanto, impossível de utilizá-la na propagação de incertezas por meio da série de Taylor. Ou seja, não há a possibilidade de utilizar as equações de média e variância do produto de duas variáveis aleatórias de Mood *et al.* (1974) para a determinação de incerteza. Assim, uma aproximação possível para solucionar este problema foi calcular uma nova variável obtida diretamente pela aplicação da equação de RUSLE, ou seja, o produto das variáveis R, K, LS, C e P. Esta nova variável foi submetida à interpolação multiquádrica, conforme se pode verificar na Figura 24. Cabe salientar também que não é possível calcular variogramas experimentais para variáveis que não apresentam variação.



**Figura 24.** Distribuição da variável RUSLE.

O valor máximo encontrado nesse mapa foi de 45 ton/ha.ano, no entanto, esse valor impede a visualização da área toda caracterizada por valores muito baixos. Deste modo, limitou-se a 5 ton/ha.ano como valor máximo para que o mapa da distribuição fosse notado.

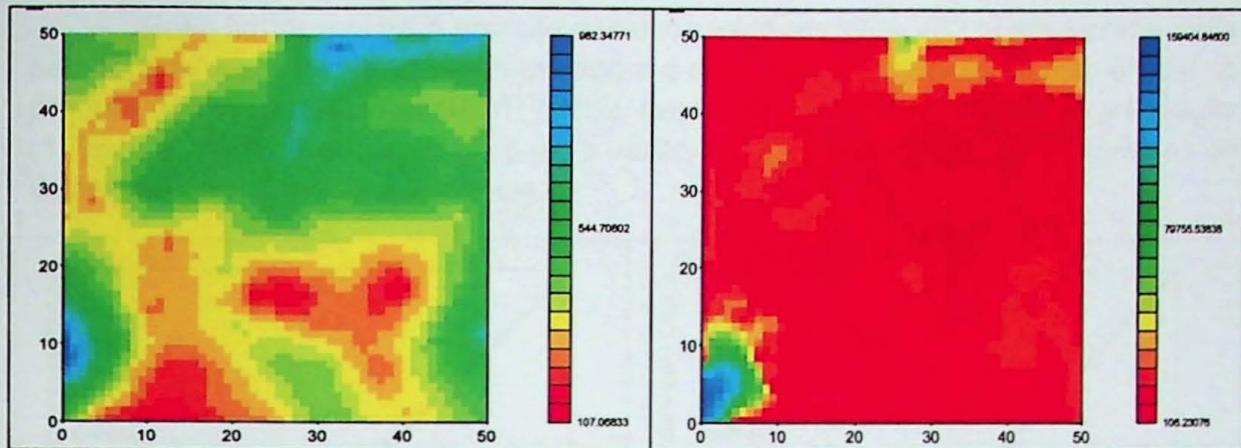
A incerteza associada pode ser vista na Figura 25, a qual representa a variância do valor médio calculado.



**Figura 25.** Mapa de incerteza em torno da interpolação multiquádrica.

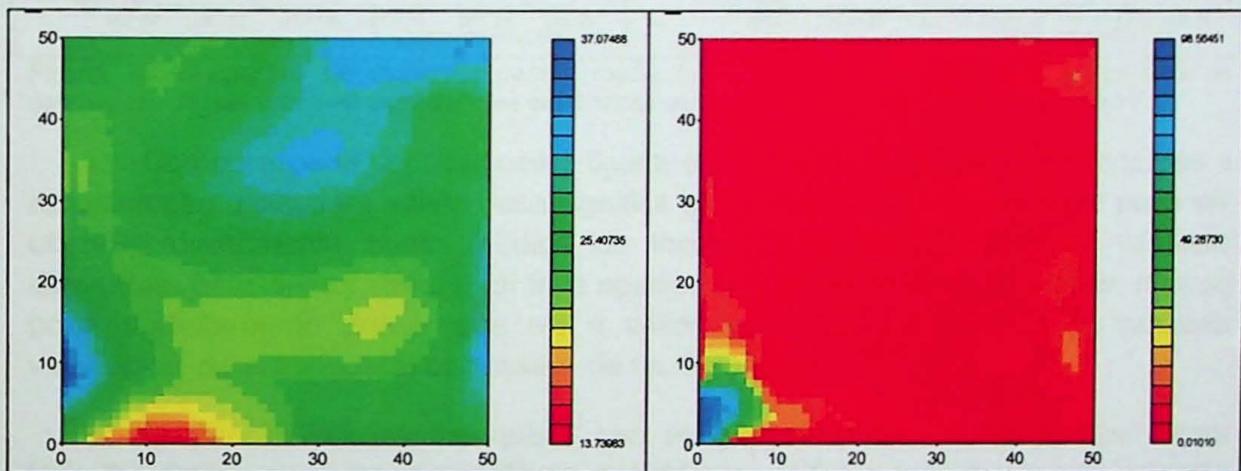
Este é o mapa que mostra quantificação de incerteza relacionada à perda média anual de solo por hectare pela aplicação de RUSLE da área de estudo no interior do município de Itaoca. Nota-se facilmente que a posição central concentra maior incerteza, coincidindo com região de área de agricultura, o que é viável, pois, considerando área de agricultura rodeada por região de pouca perda de solo, varia-se valor de Rusle consideravelmente nesse espaço. Portanto, para cada célula do mapa da Figura 24 há um valor estimado de perda de solo e um valor de incerteza (na mesma unidade da perda de solo, ton/ha.ano) representado na Figura 25.

Entretanto, como mencionado anteriormente, a propagação de incerteza resultante da equação de RUSLE, para a área em estudo, é quase impossível devido ao comportamento constante de algumas variáveis, como, R, C e P. Na realidade, quando se tenta calcular as médias e variâncias dessas variáveis, tem-se operações aritméticas indevidas, como divisão por zero (variância nula). Assim, a solução adotada foi a obtenção direta da variável RUSLE em cada ponto de amostragem e, em seguida, fazer a interpolação multiquadrática e, dessa forma, calcular a incerteza por meio da variância de interpolação. Resta provar que essa aproximação é válida, ou seja, verificar se a variância de interpolação do RUSLE reflete a propagação de incertezas associadas às variáveis. Assim, para provar a validade dessa aproximação se considerou duas variáveis sintéticas VP e VS2, conforme Yamamoto e Landim (2013, p. 122). Para a variável VP foi gerada a distribuição por interpolação multiquadrática, bem como a variância de interpolação, conforme mostra a Figura 26.



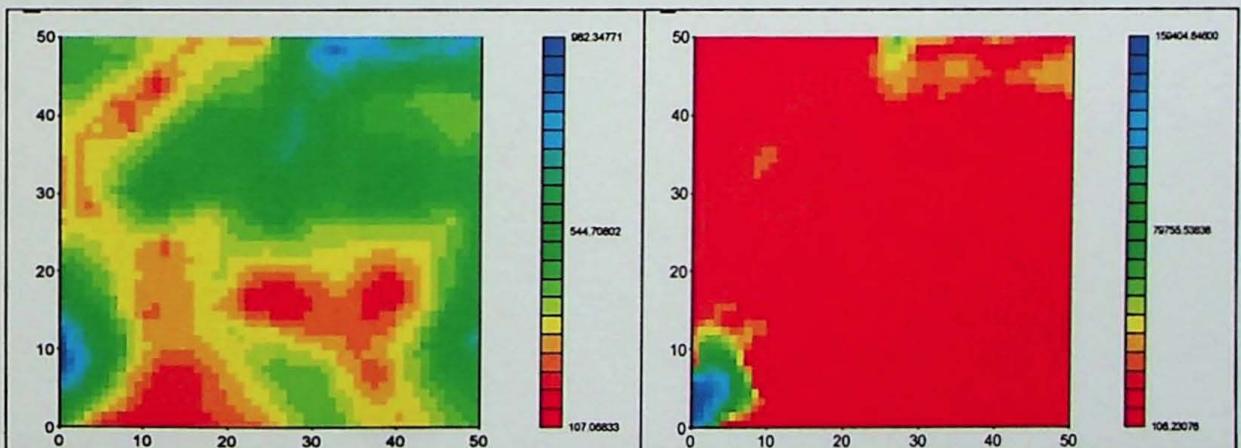
**Figura 26.** Interpolação multiquádrica da variável obtida pela multiplicação das variáveis VP e VS2 (média do produto – esq. e variância de interpolação – dir.).

Para a variável VS também foi adotado o mesmo procedimento, qual seja, de geração da distribuição dessa variável e também da incerteza associada, calculada por meio da variância de interpolação (Figura 27).



**Figura 27.** Interpolação multiquádrica da variável VS2 (esq.) e da variância de interpolação (dir.)

As variáveis VP e VS2 podem ser combinadas diretamente aplicando-se exatamente o mesmo procedimento para as variáveis individuais (Figura 28).



**Figura 28.** Interpolação multiquádrica da variável obtida pela multiplicação das variáveis VP e VS2 (média do produto – esq. e variância de interpolação – dir.).

Essa figura mostra o produto das duas variáveis VP e VS2 obtidas diretamente pela multiplicação delas. O problema agora é provar que a média do produto é igual ao produto das variáveis originais VP e VS2, devidamente corrigidas conforme a equação (1) para a média e equação (2) para a variância. A Figura 29 ilustra os diagramas de dispersão para a média e variância.

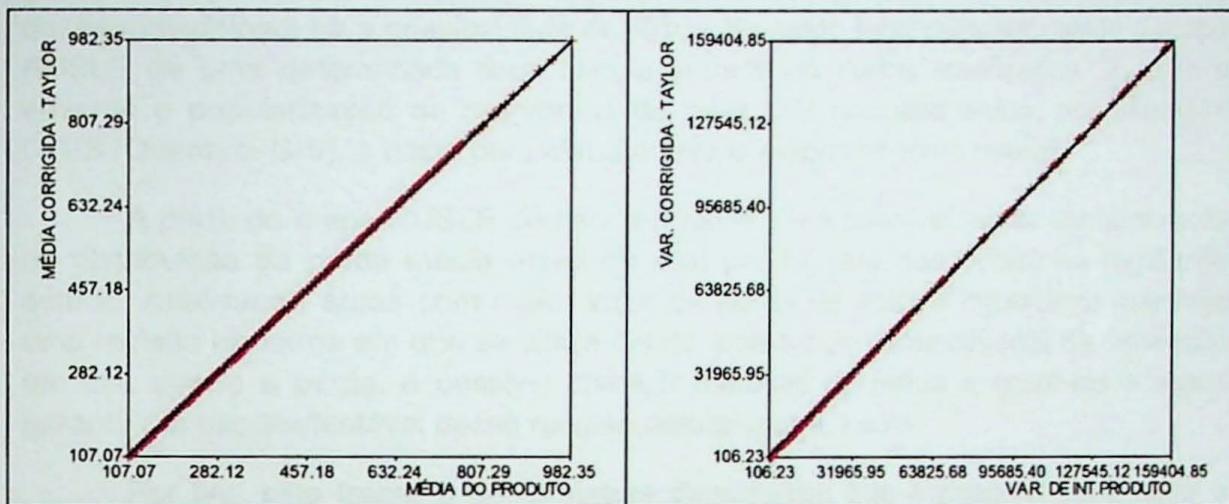


Figura 29. Diagramas de dispersão para a média (esq.) e para a variância (dir.), comparando as estatísticas diretas (variável produto) e as estatísticas derivadas por meio das equações de Taylor.

Como se pode verificar nesta figura, a correlação é perfeita mostrando que a aproximação utilizada é válida. Isso significa que a variância de interpolação pode ser utilizada diretamente como medida de incerteza do produto de duas variáveis aleatórias. Esta demonstração foi feita apenas para duas variáveis aleatórias, mas se pode perfeitamente provar que ela é válida para qualquer número de variáveis valendo-se da propriedade comutativa da multiplicação.

Por fim, vale ressaltar que o uso da geoestatística não foi possível neste trabalho devido ao comportamento da maioria das variáveis consideradas na equação de RUSLE. A grande maioria das variáveis exibe valores constantes por toda a área de estudo, impossibilitando o cálculo de variogramas experimentais.

## 8. CONCLUSÕES

A combinação do uso da equação de RUSLE com metodologia baseada em SIG é interessante no sentido de produzir mapas de susceptibilidade à erosão de grandes áreas à medida que haja disponibilidade dos dados. Além disso, por causa dessa metodologia há a possibilidade de recriar de modo relativamente rápido o mapa RUSLE de uma determinada área com a entrada de dados atualizados. E, com o advento e popularização de programas de base SIG gratuitos como, por exemplo, QGIS (Quantum GIS), o custo para elaborar esses mapas se torna menor.

A partir do mapa RUSLE de Itaoca (Figura 17) é possível tomar conhecimento da distribuição da perda média anual de solo por hectare que ocorre na região de estudo. Analisando áreas com maior valor de perda de solo, é importante que haja uma revisão na forma em que se utiliza o solo, pois tendo conhecimento da dimensão em que ocorre a perda, é possível planejar medidas de forma a contê-las e assim garantir um uso sustentável desse recurso natural que é o solo.

Por fim, este trabalho de formatura demonstrou que é possível determinar a incerteza associada à estimativa RUSLE por meio da variância de interpolação. A quantificação da incerteza, deste modo, contribui para aprimorar mapas de susceptibilidade à erosão de solos produzidas a partir da equação de RUSLE.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M., Hasui , Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. (1977). Províncias Estruturais Brasileiras. Simpósio de Geologia do Nordeste, v.8, 363-391. Campina Grande: SBG.
- Andreoli, C. V., Torres, P.L. (2014). Complexidade: redes e conexões do ser sustentável. In: V. A. Andreoli, F. N. Andreoli, J. J. Junior, *Formação e características dos solos para o entendimento de sua importância agrícola e ambiental*. (v. 2, 511-529). Curitiba: Kairós.
- Aquino, D.N. et al. (2007). A aplicação da USLE e SIG na estimativa da perda de solos em uma micro bacia hidrográfica do semi-árido do estado do Ceará. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Bonito, MS, p. 35-52.
- ArcMap 10.3 Aplicação usada no ArcGis que representa informações geográficas na forma de coleções de *layers* e outros elementos de mapa.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F. (1990): Conservação do solo. 353 p. São Paulo: Ícone.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F. L. (2005). Conservação do solo. 5,p.355. São Paulo: Ícone.
- Bizi, A. L., Schobbenhaus, C., Vudotti, R. M., Gonçalves, J. H. (2003). Geologia, tectônica e recursosminerais do Brasil: texto, mapas e SIG.In: Delgado, I. M., Souza, J. D., Silva, L. C., Silveira Filho, N. C, Santos, R. A, Pedreira, A. J., Guimarães, J. T., Argelim, L. A. A., Vasconcelos, A.M., Gomes, I. P., Lacerda Filho, J. V., Valente, C. R., Perrotta, M. M., Heineck, C. A. *Geotectônica do Escudo Atlântico*. (v. 1, 227-361). Brasília: CPRM- Serviço Geológico do Brasil.
- BRASIL. Resolução Conama N°423, de 12 de abril de 2010. Dispõe sobre parâmetros básicos para identificação e análise da vegetação primária e dos estágios sucessionais da vegetação secundária nos Campos de Altitude associados ou abrangidos pela Mata Atlântica. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legipesq.cfm?tipo=3&numero=&ano=&texto=>>>. Acesso em: 27 de julho de 2015.
- Brito, J. L. S., Lima, S. C., Shiki, S., Moreira, M. R. ( 1998). Uso do geoprocessamento na estimativa da perda de solos por erosão laminar em Iraí de Minas, Minas Gerais. IX Brasileiro de Sensoriamento remoto, v. 1, 501-512. Santos: INPE.
- Campanha, G. A. da C., Basei, M. S., Faleiros, F. M., Nutman, A. P. ( 2015). The mesoproterozoic to early neoproterozoic passive margin Lajeado Group and Apiaí Gabbro, southeastern Brazil. *Geoscience Frontiers*, 1-12.
- Campanha, G. A. da C., Sadowski, G. R. ( 1999). Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). *Elsevier Science, Precambrian Research*, 31-51.
- Campanha, G. A. C., Basei, M. A. S., Faleiros, F. M., Tassinari, C. C. G., Nutman, A. P., Vasconcelos, P. M., Dantas, E.L.(2009). Geocronologia do Terreno Apiaí no Sul do

Estado de São Paulo. In: Simpósio 45 anos de Geocronologia no Brasil. 2009, São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos*. São Paulo: IGc.CEPAGRI (2015). Acesso em 5 de outubro de 2015. Disponível em <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_256.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_256.html)>.

Dalmas, F. B. ( 2013). *Análise da evolução do uso e ocupação do solo na UGRHI-11 e avaliação de cenários futuros em função de processos erosivos e de movimentos de massa utilizando técnicas de geoprocessamento*. Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências: USP

Faleiros, F. M. (2003). Zona de Cisalhamento Ribeira: Deformação, Metamorfismo e Termobarometria de Veios Sin-Tectônicos. Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências: USP.

Faleiros, F. M. (2008). Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serraria do Ribeira e Planalto Alto Turvo (São Paulo- Paraná). Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências: USP.

Faleiros, F. M., Campanha, G.A.C., Bello, R.M.S., Fuzikawa, K., (2010). Quartz recrystallization regimes, c-axis texture transitions and fluid inclusion reequilibration in a prograde greenschist to amphibolite facies mylonite zone (Ribeira Shear Zone, SE Brazil). *Tectonophysics* 485, 193 – 214.

Faleiros, F. M., Ferrari, V. C., Costa, V. S., Campanha, G. A. da C. (2011). Geoquímica e Petrogênese de metabasitos do Grupo Votuverava (Terreno Apiaí, Cinturão Ribeira Meridional): Evidências de Bacia de Retroarco Calimiana. *Revista do Instituto de Geociências- USP*, v. 11 (2), 135-155.

Gurgel, S. R., Carvalho Júnior, O. A., Gomes, R. A. T., Guimarães, F. R., Câmara, J. F. A., Araújo Sobrinho, D., Martins, É. S., Braga, A. R. S. ( 2011). Identificação das áreas vulneráveis à erosão a partir do emprego de EUPS- Equação universal de perdas de solos no município de Riachão das Neves- Bahia. *Geografia Ensino & Pesquisa*, 15(2), 93-109.

Hardy, R. L. (1971). Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. *Journal of Geophysics*, 76, p.1905-1915.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). Disponível em <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=352215&idtema=130&search=sao-paulo%7Citaoca%7Cestimativa-da-populacao-2015->>. Acesso em 12 de outubro de 2015.

Khosrowpanah, S., Heitz,L. F., Wen, Y. (2007). *Developing a GIS-based soil erosion potential model f the Ugum watershed*. Water and Environmental Research Institute of the Pacific: University of Guam.

Mello, I. S. C., Bettencourt, J. S. (1998). Geologia e gênese das mineralizações associadas ao maciço Itaóca, Vale do Ribiera, São Paulo e Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(3), 269-284.

Minerais do Paraná- MINEROPAR (2010), Departamento Nacional de Produção Mineral- DNPM. (2004). *Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba.*

Mood, A. M, Graybill, F. A, Boes, D.C. (1974). *Introduction to the theory of statistics.* Tokyo, McGraw Hill. 3<sup>rd</sup> ed. 564p.

Paranhos Filho, A. C., Fiori, A. P., Disperati, L., Lucchesi, C., Ciali, A., Lastoria, G. (2003). Avaliação multitemporal das perdas de solos na Bacia do Rio Taquarizinho-Mato Grosso. *Boletim Paranaense de geociências*, 52, 49-59. UFPR.

QGIS Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU.

Salomão, F. X. de T., Rocha, G. A. (1989). Controle de erosão: bases conceituais e técnicas. Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, Instituto de Pesquisas Tecnológicas—IPT. p.92.

SIG-RB (2010). Sistema de Informações Geográficas da Bacia do Ribeira de Iguape e Litoral Sul. Carta de mapeamento de Uso de Solo da UGRHI11. Escala 1:250.000.

Stein, D.P., Donzelli, P.L., Gimenez, A.F., Ponçano, W.L., Lombardi Neto, F., (1987). Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na Bacia do Peixe-Paranapanema. Anais do IV Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Marília, SP, p. 105-135.

Stone, R. P., Hilborn, D. (2012). *Universal Soil Loss Equation (USLE).* Ontario: OMAFRA. Acesso em 15 de Março de 2015, <<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.pdf>>.

Wischmeier,W. H., Smith, D. D.(1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning.* Department of Agriculture, Estados Unidos.

Yamamoto, J. K, Kikuda, A. T., Leite, C. B. B. (2015). Uncertainties associated with arithmetic map operations in GIS. Submetido para *Environmental Modeling and Software.*

Yamamoto, J. K., Landim, P. M. B. (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações.* . 1(8), p.215. São Paulo: Oficina de textos.

