

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Campus Experimental de Ourinhos

Alice Nardoni Marteli

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE INTERPOLADORES
PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE pH PARA A
AGRICULTURA FAMILIAR**

Ourinhos – SP
Agosto de 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Campus Experimental de Ourinhos

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE INTERPOLADORES
PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS DE pH PARA A
AGRICULTURA FAMILIAR**

Alice Nardoni Marteli

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
banca examinadora para obtenção do título de
Bacharel em Geografia pela Unesp – Campus
Experimental de Ourinhos.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Edson Luís Piroli

Ourinhos – SP
Agosto de 2013

Banca examinadora

Prof. Dr° Edson Luís Piroli (Orientador)

Prof. Dr° Rodrigo Lilla Manzione

Me. Julio Cesar Demarchi

Ourinhos, 01 de Agosto de 2013.

Ao meu querido avô (in memoriam) que plantou a primeira semente e a todos agricultores familiares que continuam a lutar, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido iniciar e finalizar este curso, me orientado nos momentos de dúvidas e incertezas, conservando minha saúde e me dando forças para lutar e acreditar na vitória.

Aos meus pais, Carmem e Emilio, pelo incentivo e apoio que depositaram em mim todos esses anos, ajudando a enfrentar todos os obstáculos durante toda minha jornada acadêmica e incentivando-me nos momentos difíceis e desanimadores.

Ao meu querido Má (Marcelo), que com muita paciência sempre me ajudou nos trabalhos acadêmicos e que mesmo com os anos, e a distância que nos separa, continua ao meu lado.

Aos professores do ensino fundamental e médio, que foram os primeiros professores a incentivar na busca pelos meus objetivos. Em particular o Odair Pegoraro, Marlene, Noemi, Eliana, Jô, Carla e Écio.

Aos meus queridos Professores Edson Luís Piroli e Rodrigo Lilla Manzione, que muito considero, pelo profissionalismo e pelos conselhos em todos os momentos que a eles recorri. Agradeço também ao Professor Edson Luís Piroli pela orientação deste trabalho, pela confiança, ensinamentos e oportunidades, sempre acreditando em nosso trabalho e defendendo nossos objetivos. E também ao Professor Rodrigo Lilla Manzione pelo apoio dedicado a este trabalho, pelas orientações dadas e pela disponibilidade em me ajudar sempre.

Aos Professores Marcos Aurelio Saquet, Paulo Milton Barbosa Landim e Marcelo Tutia por me auxiliarem nas pesquisas bibliográficas e ao Professor Marcelo Dorneles Carvalhal pelas contribuições sobre esta pesquisa.

Ao Julio Cesar Demarchi e a Laryssa Bitencourt Silva, que sempre se disponibilizaram a me ajudar e ao Alexandre Catania Greco de Oliveira pelas horas no Laboratório de Geoprocessamento e pela enorme paciência.

Aos “bixos” Guilherme, André e Wilyan por terem me acompanhado nas coletas de solo e ao produtor familiar Edezio Roberto Palermo, por ter cedido sua propriedade para realizar esta pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de iniciação científica concedida para realização desta pesquisa (proc. n° 2012/05452-4).

A bibliotecária da UNESP-FEIS, Cristina Alexandra de Godoy, pela ajuda com a ABNT para esta versão final.

Agradeço a mim mesma pela persistência em todas as etapas desse trabalho e as pessoas que duvidaram e não acreditaram (que o curso levaria a algo), pois me deram forças para continuar a lutar.

Agradeço também à Escola Municipal de Música de Ourinhos – “Maestro Américo de Carvalho” que desde agosto de 2009 me recebeu, proporcionando grandes momentos e amizades, nesta breve (e longa) passagem ourinhense.

Enfim, a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para que eu chegasse até aqui, meus sinceros agradecimentos.

Há pessoas que transformam o sol numa simples mancha amarela, mas há aquelas que fazem de uma simples mancha amarela o próprio sol.

PABLO PICASSO

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 O CONCEITO DE AGRICULTURA FAMILIAR INSERIDO NO CONTEXTO GEOGRÁFICO BRASILEIRO	15
3.1.1 <i>Modernização da agricultura brasileira no contexto da Agricultura Familiar....</i>	<i>19</i>
3.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO (AP)	20
3.2.1 <i>Agricultura de Precisão e Geoprocessamento.....</i>	<i>25</i>
3.2.2 <i>Variabilidade espacial e mapas digitais na análise de pH do solo</i>	<i>27</i>
3.3 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL	30
3.3.1 <i>Métodos globais de interpolação espacial</i>	<i>31</i>
3.3.1.1 <i>Análise de Superfícies de Tendência.....</i>	<i>31</i>
3.3.2 <i>Métodos locais de interpolação espacial.....</i>	<i>33</i>
3.3.2.1 <i>Redes Irregulares Triangulares (TIN).....</i>	<i>34</i>
3.3.2.2 <i>Geoestatística</i>	<i>37</i>
3.3.2.2.1 <i>Krigagem</i>	<i>40</i>
4 MATERIAL E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
4.1.1 <i>O município de Ourinhos</i>	<i>44</i>
4.1.1.1 <i>A propriedade rural</i>	<i>45</i>
4.2 MATERIAIS	46
4.2.1 <i>Materiais para coleta de amostras de solo.....</i>	<i>46</i>
4.2.2 <i>Materiais para análise de pH.....</i>	<i>46</i>
4.2.3 <i>Materiais para elaboração dos mapas</i>	<i>47</i>
4.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	47
4.3.1 <i>Procedimentos preliminares.....</i>	<i>47</i>
4.3.2 <i>Procedimentos metodológicos para coleta de amostras de solo</i>	<i>49</i>
4.3.3 <i>Procedimentos metodológicos para análise de pH.....</i>	<i>50</i>
4.3.4 <i>Procedimentos metodológicos para elaboração dos mapas</i>	<i>51</i>

4.3.5 Procedimentos metodológicos para a comparação dos mapas	53
4.3.5.1 Procedimentos metodológicos para avaliação da exatidão dos mapas utilizando o Índice Kappa e a Exatidão Global	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DE pH DO SOLO.....	56
5.2 RESULTADOS DAS INTERPOLAÇÕES	57
5.2.1 <i>TREND</i>	57
5.2.2 <i>TIN</i>	60
5.2.3 <i>Krigagem</i>	64
5.3 MAPAS TEMÁTICOS DE pH DO SOLO	67
5.3.1 <i>TREND</i>	67
5.3.2 <i>TIN</i>	71
5.3.3 <i>Krigagem</i>	75
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DOS MAPAS PELO ÍNDICE KAPPA E A EXATIDÃO GLOBAL.....	77
5.5 RECOMENDAÇÕES PARA MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DO SOLO PARA AGRICULTURA FAMILIAR	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
REFERÊNCIAS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de Ourinhos no sudoeste do estado de São Paulo.....	43
Figura 2. Distribuição dos pontos para coleta de 9, 18 e 36 amostras respectivamente	48
Figura 3. Coleta de amostras de solo em campo	50
Figura 4. Leitura das amostras de pH do solo	51
Figura 5. Semivariograma ajustado “a sentimento” para os dados de pH do solo.....	52
Figura 6. TREND - 9 pontos amostrais	58
Figura 7. TREND - 18 pontos amostrais	59
Figura 8. TREND - 36 pontos amostrais	60
Figura 9. TIN - 9 pontos amostrais.....	61
Figura 10. TIN - 18 pontos amostrais.....	62
Figura 11. TIN - 36 pontos amostrais.....	63
Figura 12. Krigagem - 9 pontos amostrais	64
Figura 13. Krigagem - 18 pontos amostrais	65
Figura 14. Krigagem - 36 pontos amostrais	66
Figura 15. Interpolação por Análise de Superfície de Tendência com 9 pontos amostrais.....	68
Figura 16. Interpolação por Análise de Superfície de Tendência com 18 pontos amostrais...	69
Figura 17. Interpolação por Análise de Superfície de Tendência com 36 pontos amostrais...	70
Figura 18. Interpolação por Redes Irregulares Triangulares com 9 pontos amostrais	72
Figura 19. Interpolação por Redes Irregulares Triangulares com 18 pontos amostrais	73
Figura 20. Interpolação por Redes Irregulares Triangulares com 36 pontos amostrais	74
Figura 21. Interpolação por Krigagem com 36 pontos amostrais	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de pH do solo	53
Tabela 2. Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa	54
Tabela 3. Resultado das análises de pH do solo	56
Tabela 4. Verdade terrestre.....	77
Tabela 5. Resultado do Índice Kappa e Exatidão Global	78

RESUMO

O objetivo desta pesquisa consistiu na análise de interpoladores aplicados em diferentes espaçamentos de coletas de amostras de solos para a elaboração de mapas de pH em pequenas propriedades rurais que se enquadram na categoria de Agricultura Familiar na região de Ourinhos, SP. As técnicas utilizadas seguiram os fundamentos da agricultura de precisão, porém, foi proposto desenvolver uma forma de análise que prescindisse do uso de equipamentos caros, inacessíveis a pequenos produtores rurais. Para o desenvolvimento da pesquisa foram feitas coletas georreferenciadas de amostras de solo em campo, análises das amostras no laboratório de solos do Campus da Unesp de Ourinhos e espacialização dos resultados em mapas, que foram gerados a partir de técnicas de interpolação e de Geoprocessamento. Através dos resultados cartográficos obtidos, buscou-se atender o método mais simples e preciso na geração destes mapas de pH do solo. Neste trabalho, o interpolador avaliado como o mais adequado foi o TIN, pois sua precisão independe da quantidade de amostras. Desta forma, buscou-se atender ao desenvolvimento rural usando alternativas que diminuíssem o uso de máquinas, equipamentos, insumos e mão de obra altamente qualificada, minimizando os custos financeiros e os impactos sobre o ambiente.

Palavras-chave: TIN; TREND; Krigagem.

ABSTRACT

The aim of this research was consisted in the interpolators analysis applied in different collections of spacings soils for the elaboration of pH maps in small farms which fit into the category of Family Farming in Ourinhos region, SP. The techniques used followed the foundations of the agriculture of precision, but, it was intended to develop an analysis method that avoided using of expensive equipments that are inaccessible to the rural small farmers. For the development of this research were made collections of georeferenced soil samples in field, analyses of the soil samples were made at the soils laboratory at the Unesp - Ourinhos Campus and the spatial distribution of the results in maps that was generated starting from interpolation techniques and Geoprocessing. Through the mapping results obtained, we search for the simplest and the most accurate method in generating these maps of soil pH. In this work, the interpolator rated as the most suitable was the TIN, because its accuracy doesn't depend on the number of samples. Thus, this research looked for assisting to the rural development by using alternatives that decreased the use of machines, equipments, inputs and highly skilled manpower, minimizing the financial costs and the impacts on the environment.

Keywords: TIN; TREND; Kriging.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A agricultura familiar foi o termo encontrado para caracterizar a organização da produção agrícola em pequenas propriedades, cujas atividades se baseiam na mão-de-obra familiar. Nestas propriedades, os trabalhos são exercidos pelos proprietários, podendo ter ou não trabalho contratado, desde que prevaleça o trabalho entre membros familiares.

No Brasil, a agricultura familiar tem origens coloniais, desde os primeiros núcleos de ocupação. Já naquela época, os pequenos agricultores cultivavam produtos alimentícios e de subsistência, contrapondo-se ao modelo agrário do latifúndio monocultor.

Com a modernização da agricultura brasileira a partir da década de 1960, propriedades patronais foram privilegiadas novamente, não se atendendo aos produtores familiares. Uma grande parcela destes foi então incorporada como mão-de-obra para a indústria (êxodo rural) e os que sobreviveram continuaram encontrando diversos problemas relacionados à miséria presente no campo brasileiro até a atualidade. Desta forma, encontram-se excluídos do sistema de produção tecnificado, tendo dificuldade de aumentar a produtividade de suas áreas. Mesmo assim, são estes produtores os responsáveis por importante percentual da produção de alimentos no país.

Nesse sentido, a agricultura familiar encontra-se distante da aplicação dos recursos e técnicas modernas para gestão de seu patrimônio maior, que é o seu solo, uma vez que é comum o menor acesso a essas tecnologias aos agricultores familiares. No entanto, agricultores dos tempos antigos já reconheciam os benefícios da aplicação diferenciada de insumos, onde atualmente referem-se à gestão de propriedades e de suas unidades de produção com a adoção da agricultura de precisão, técnica que combina a aplicação de insumos e de práticas mecânicas com o GPS (Sistema de Posicionamento Global).

A agricultura de precisão permite maior exatidão nas ações sobre as áreas produtivas de uma propriedade, possibilitando o monitoramento da qualidade do solo e, portanto, uma melhor produção, com redução de gastos com insumos, além de impactar menos o ambiente, com a aplicação das doses de insumos necessárias, apenas nos locais onde houver a necessidade. Favorece também possibilidades de competição no mercado com a produção excedente, diminui a jornada de trabalho no campo e permite que o agricultor se exponha menos a produtos que podem causar problemas de saúde.

Assim, a partir destas tecnologias é possível coletar e armazenar uma grande quantidade de informações e dados das áreas agrícolas. Propriedades físicas e químicas dos

solos, dados climáticos, incidência de pragas, doenças, ervas daninhas e produção das culturas são as variáveis normalmente levantadas utilizando essas tecnologias. Esses dados normalmente são georreferenciados e organizados em Sistemas de Informações Geográficas, onde é possível elaborar mapas, por meio de uma variedade de técnicas de interpolação e geoestatística (COELHO, 2003).

O que viabiliza essa nova tecnologia por sua vez é o uso intensivo da informática aliado a técnicas de posicionamento global, muito desenvolvidas nos últimos anos e cada vez mais disponíveis (MANZIONE, 2002). No entanto, a agricultura de precisão tem sido desenvolvida a partir de equipamentos sofisticados e caros, que estes pequenos agricultores não conseguem adquirir.

Nesse sentido, uma alternativa simples e sem muito investimento inicial para os pequenos agricultores é uma forma de levar essas tecnologias da agricultura de precisão para o campo e, com isso, iniciar o manejo dos solos e culturas por zonas uniformes, dividindo-se as áreas cultivadas em talhões, para avaliação da variabilidade dos solos e da produtividade das culturas. Utilizando-se esse procedimento, pode-se obter informações importantes para ajustes dos sistemas de produção (COELHO, 2003).

Por isso, esta pesquisa teve como proposta aplicar os fundamentos da agricultura de precisão, com uma metodologia que pode ser facilmente reaplicada a agricultores interessados, visando sua inserção em um sistema de produção mais eficiente com baixos custos de investimento. Assim sendo, foram testados interpoladores em diferentes espaçamentos de amostras em uma área de 33,3 hectares situada em uma propriedade rural no município de Ourinhos SP, que se enquadra na categoria de agricultura familiar. Para tal, foi avaliado o pH (potencial Hidrogeniônico) do solo como variável para se comparar os interpoladores.

Os interpoladores escolhidos para serem avaliados foram a Análise de Superfície de Tendência, as Redes Irregulares Triangulares e a Krigagem, disponíveis no SIG Idrisi Taiga. Ao analisa-los, avaliou-se qual apresenta um melhor resultado para elaboração de mapas de pH do solo, de modo que apresentem fidelidade aos dados coletados, que a espacialização coincida com a realidade de campo, que sejam rápidos de serem processados e que não necessitem de grande quantidade de dados.

Desta maneira, pretendeu-se aumentar os benefícios e diminuir os custos de operação, que vão desde o número de amostras coletadas até o processamento dos dados e elaboração

dos mapas. Além disso, é possível agregar outras metodologias para serem adequadas no campo em relação às práticas de manejo. No entanto, não é objetivo deste trabalho propor metodologias para serem aplicadas após a elaboração dos mapas. Também não é objetivo diferenciar os conceitos de agricultura familiar, uma vez que tal discussão é muito complexa.

Dessa forma, a importância dessa pesquisa para a elaboração de mapas, em propriedades que se enquadram na categoria de agricultura familiar, está relacionada à falta de recursos financeiros em que a maior parte destas pequenas propriedades rurais se encontra, devido ao modelo agrícola e agrário brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve por objetivo a análise do desempenho de interpoladores e espaçamentos de coletas de amostras de solo para a elaboração de mapas de pH destinados à agricultura familiar, buscando verificar qual método gerará dados mais confiáveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o mapeamento da área piloto, utilizando ferramentas de Geoprocessamento;
- Produzir mapas de pH da propriedade pesquisada;
- Testar os interpoladores TIN, TREND e Krigagem, disponíveis no SIG Idrisi Taiga, para a elaboração de mapa de pH em diferentes espaçamentos;
- Propor desta forma, uma técnica eficaz, simples e de baixo custo a partir dos resultados obtidos, para utilização por agricultores familiares.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O CONCEITO DE AGRICULTURA FAMILIAR INSERIDO NO CONTEXTO GEOGRÁFICO BRASILEIRO

Ao buscar na literatura contribuições conceituais para descrever o surgimento da agricultura familiar, encontram-se duas vertentes principais: uma que considera a moderna agricultura familiar como uma nova categoria, gerada no centro das transformações das sociedades capitalistas desenvolvidas, e outra que defende ser a agricultura familiar brasileira um conceito com raízes históricas, advindas do campesinato (AL ZAHER, 2012).

Na economia campesina, a produção é basicamente de subsistência, cujo objetivo não é o lucro, como ocorre em atividades especificamente capitalistas (SAQUET, 1997). Desta forma, no campesinato, há a venda de parte do que produzem para comprar o que não produzem, garantindo suas necessidades de reprodução e sobrevivência, diferentemente da agricultura familiar¹, onde os produtores são donos das terras e demais meios de produção, tem baixo nível técnico e tecnológico e não tem uma produção intensiva para o mercado².

Ao descrever o desenvolvimento das colônias agrícolas no Rio Grande do Sul, Saquet (2002) apresenta que a colonização italiana se deu em pequenas unidades produtivas, caracterizadas basicamente pela policultura e pelo trabalho familiar “em que, lentamente, a produção de excedentes comercializados em forma de mercadorias torna-se uma das suas principais características” (SAQUET, 2002, p.55).

Para Schneider (2003) a expressão “agricultura familiar” emergiu no contexto brasileiro a partir da década de 1990, quando o Estado criou o Pronaf (Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar), em 1996.

Esse programa,

formulado como resposta às pressões do movimento sindical rural desde o início dos anos de 1990, nasceu com a finalidade de prover crédito agrícola e apoio institucional às categorias de pequenos produtores rurais que vinham sendo alijados das políticas públicas ao longo da década de 1980 e encontravam sérias dificuldades de se manter na atividade (SCHNEIDER, 2003, p.100).

¹ Agricultura familiar e campesinato, para nós, não são sinônimos. Porém, não será discutida neste trabalho, essa questão.

² Sobre as relações de trabalho agrícola familiar, a produção do espaço geográfico local e o processo de modernização agrícola a partir dos anos de 1960, consultar Saquet (1997, 2002).

Além disso, Denardi (2001) ressalta que nos empreendimentos familiares, a gestão é familiar e o trabalho é predominantemente familiar, ou seja, têm duas características principais: a administração pela própria família e o trabalho familiar direto, com ou sem o auxílio de terceiros. Segundo este autor, “um estabelecimento familiar é, ao mesmo tempo, uma unidade de produção e de consumo; uma unidade de produção e de reprodução social” (DENARDI, 2001, p.57). Além dessas características básicas nos conceitos encontrados, a área da propriedade é determinante na definição de propriedade familiar.

A propriedade familiar, de acordo com artigo 4º, inciso II da Lei nº 4.504 (Estatuto da Terra) estabelecida em 30 de novembro de 1964, é:

(...) o imóvel que, direta e pessoalmente explorado pelo agricultor e sua família, lhes absorva toda a força de trabalho, garantindo-lhes a subsistência e o progresso social e econômico, com área máxima fixada para cada região e tipo de exploração, e eventualmente trabalhado com a ajuda de terceiros (BRASIL, 1964).

A Lei Federal 8.629/93, relativa à reforma agrária, regulamentou o dispositivo constitucional e definiu a pequena propriedade como o imóvel rural de área compreendida entre um e quatro módulos fiscais (FAERJ, 2008). No município de Ourinhos o módulo fiscal corresponde a 20 hectares (CATI, 2011).

Asmus (2004) salienta que o módulo fiscal passou a ser o fator para o cálculo da pequena e média propriedade – argumento este que embasa o Pronaf, que só atende pequenas propriedades, que não extrapolem a área de quatro módulos fiscais. Desta forma,

para fins de atendimento e de financiamento agrícola, o Pronaf caracteriza os agricultores familiares como aqueles que exploram uma parcela de terra na condição de proprietário, assentado, posseiro, arrendatário ou parceiro e que atendem simultaneamente aos seguintes quesitos: a) utilizar o trabalho direto seu e de sua família, podendo ter, em caráter complementar, até dois empregados permanentes e contar com ajuda de terceiros, quando a natureza sazonal da atividade agropecuária o exigir; b) não deter, a qualquer título, área superior a quatro módulos fiscais, quantificados segundo a legislação em vigor; c) ter, no mínimo, 80% da renda familiar bruta anual originada de pelo menos uma das explorações: agropecuária, pesqueira (só a artesanal) e extrativa; d) residir na propriedade ou em aglomerado rural ou urbano próximo; e) possuir uma renda anual máxima de até R\$27.500,00 (PRONAF, 1999; MATTEI, 2001 apud ASMUS 2004, p.44-5).

Nesse sentido, muitos pesquisadores escolhem o tamanho da área do estabelecimento como critério central para distinguir a agricultura familiar da agricultura patronal, sendo este o critério mais fácil de constatação num questionário, dentro de uma pequena margem de erro. No entanto, outros critérios, mesmo com certas limitações, devem ser discutidos como: o grau

da utilização da mão-de-obra familiar, a renda do agricultor, a significância do autoconsumo (subsistência), as regras de herança, a relação com os recursos naturais, a cultura, entre outras possibilidades (SCHMITZ; MOTA, 2007).

Assim, surge a delimitação formal do conceito de agricultor familiar, prevista na Lei 11.326, aprovada pelo Congresso Nacional e sancionada pelo presidente da República em 24 de julho de 2006. Esta lei em seu Art. 3 considera:

[...] agricultor familiar e empreendedor familiar rural aquele que pratica atividades no meio rural, atendendo, simultaneamente, aos seguintes requisitos: I - não detenha, a qualquer título, área maior do que 4 (quatro) módulos fiscais; II - utilize predominantemente mão-de-obra da própria família nas atividades econômicas do seu estabelecimento ou empreendimento; III - tenha percentual mínimo da renda familiar originada de atividades econômicas do seu estabelecimento ou empreendimento, na forma definida pelo Poder Executivo; IV - dirija seu estabelecimento ou empreendimento com sua família (BRASIL, 2006).

Tendo em conta o atendimento de tais requisitos, inclui ainda neste Art.3, § 2º:

I - silvicultores que [...] cultivem florestas nativas ou exóticas e que promovam o manejo sustentável daqueles ambientes; II - aquícultores que [...] explorem reservatórios hídricos com superfície total de até 2ha (dois hectares) ou ocupem até 500m³ (quinhentos metros cúbicos) de água, quando a exploração se efetivar em tanques-rede; III - extrativistas que [...] exerçam essa atividade artesanalmente no meio rural, excluídos os garimpeiros e faiscaidores; IV – pescadores que [...] exerçam a atividade pesqueira artesanalmente [...] (BRASIL, 2006).

No entanto, há outras diferenciações conceituais de agricultura familiar. O Censo³ Agropecuário (IBGE, 2006) diferencia a agricultura familiar de estabelecimento agropecuário: o primeiro está relacionado à unidade familiar, enquanto que o segundo está relacionado à unidade produtiva⁴. Já Schmitz e Mota (2007) diferenciam campesinato,

³ Por conta de atender à demanda do Ministério do Desenvolvimento Agrário, o Censo Agropecuário (IBGE, 2006) também adotou o conceito de “agricultura familiar”, conforme a Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006, que estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais.

⁴ Neste trabalho não serão descritas as variáveis de categorização da agricultura familiar, que de acordo com o Censo Agropecuário (IBGE, 2006) são: unidade de trabalho familiar; unidade de trabalho contratado; renda total do empreendimento; entre outras. Esta discussão conceitual não será aqui tratada, visto que não está nos objetivos deste Trabalho de Conclusão de Curso. No entanto, cabe ressaltar que Saquet (2002) faz uma discussão das relações sociais de compra e revenda, bem como dos aspectos de circulação e de produção, destacando as relações do trabalho familiar. Para tal, são incluídas referências no final deste trabalho.

pequena produção e agricultura familiar, de modo que estes se deram de forma cronológica em função de diferentes modelos de desenvolvimento no país⁵.

Atualmente, o Censo Agropecuário (IBGE, 2006) identificou 4.367.902 estabelecimentos de agricultura familiar, o que representa 84,4% dos estabelecimentos brasileiros⁶. Este numeroso contingente de agricultores familiares estão em uma área de 80,25 milhões de hectares, ou seja, 24,3% da área ocupada pelos estabelecimentos agropecuários brasileiros. Desta forma, estes dados mostram uma estrutura agrária ainda concentrada no país: os estabelecimentos não familiares, apesar de representarem 15,6% do total dos estabelecimentos, estão em 75,7% da área ocupada. A área média dos estabelecimentos familiares é cerca de 18,37 hectares, e a dos não familiares, de 309,18 hectares.

Desta forma, como o agricultor familiar dispõe, em geral, de pouca terra, menos de 100 ha, a pequena intensidade de uso limita severamente a renda que obtém (ALVES, 2001). Por isso, a agricultura familiar enfrenta também problemas como a falta de recursos, investimentos, de acesso ao crédito e ao capital.

Além disso, apesar de cultivar em uma área menor, com lavouras e pastagens, a agricultura familiar é responsável pelo fornecimento de alimentos para o mercado interno. Ainda de acordo com o Censo Agropecuário (IBGE, 2006), a agricultura familiar produz 87,0% da produção nacional de mandioca; 70,0% da produção de feijão; 46,0% do milho, 38,0% do café; 34,0% do arroz, 58,0% do leite; 59,0% do plantel de suínos; 50,0% do plantel de aves; 30,0% dos bovinos e 21,0% do trigo. Vale ressaltar ainda que a cultura com menor participação da agricultura familiar foi a da soja (16,0%), um dos principais produtos da pauta de exportação brasileira.

No estado de São Paulo, conforme os dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2006), a maior produção (em quantidade produzida, Kg) advinda da agricultura familiar é de milho (1.131.956.593 Kg), seguida por mandioca (243.249.509 Kg), soja (135.295.613 Kg), café (73.099.402 Kg), feijão (33.755.410 Kg), arroz (12.182.310 Kg) e trigo (1.851.160 Kg).

⁵ Além disso, os autores afirmam que estes três termos foram usados como sinônimos e, na época do predomínio de cada um, tinham em comum o fato de descrever os mesmos segmentos da população rural. Para estes autores, o conceito de campesinato é substituído por pequena produção a partir dos anos de 1970. Já o conceito de agricultura familiar está ligado à redemocratização e às categorias sociais no campo que foram agrupadas sob este novo conceito. Ainda, Schmitz e Mota (2007) diferenciam os conceitos de campesinato, pequena produção, agricultura familiar, produção familiar rural e produção (familiar) coletiva. No entanto, neste Trabalho de Conclusão de Curso não irei discutir tais conceitos e diferenciações. Para mais informações a respeito, vale buscar esse artigo no qual está devidamente indicado nas referências deste trabalho.

⁶ Em caso de interesse, no Censo Agropecuário (IBGE, 2006) há mais informações, como grau de escolaridade dos produtores familiares, sexo, utilização das terras nos estabelecimentos, receitas e valores da produção.

3.1.1 Modernização da agricultura brasileira no contexto da Agricultura Familiar

Devido o atraso do setor agrícola frente à urbanização e à consequente ampliação da demanda por produtos agrícolas pelo mercado interno, na década de 1950, o Estado passa a estimular o crescimento da agricultura, com base na importação de máquinas e insumos químicos, uma vez que tais indústrias ainda não haviam se instalado no país. Desta forma, o processo de modernização da agricultura brasileira teve início na década de 1950 e se tornou expressivo na década seguinte com a implementação de políticas⁷ explícitas de apoio à modernização da agricultura pelo Governo Federal (HESPANHOL, 1997).

Para Saquet (2002), a modernização da agricultura no Brasil ocorreu a partir da articulação Estado-capital, sob o comando dos capitais industrial e financeiro. “Essa nova forma de produção agrícola, agora modernizada, está estreitamente integrada e subordinada à agroindústria e às políticas estatais” (CORADINI, 1982 apud SAQUET, 2002, p. 73 - 4).

Como política agrícola, foi instituído o Sistema Nacional de Crédito Rural (SNCR), em 1965. No entanto, políticas adotadas pelos governos militares levaram a privatizações, beneficiando uma pequena parcela de produtores rurais e as agroindústrias. No início da década de 1980, a economia brasileira entrou em profunda crise com reflexos negativos sobre todo o setor agrícola no país⁸ (HESPANHOL, 1997).

Desta maneira, a modernização da agricultura, com a utilização intensiva de tecnologias e insumos, trazidos pela Revolução Verde, aconteceu sem a distribuição da terra e sem o apoio aos pequenos produtores, causando disparidades: maiores e mais ricos agricultores que controlam o capital e as terras férteis sendo privilegiados, em detrimento dos agricultores mais pobres e com menos recursos (ALTIERI, 2009).

Enquanto a classe patronal rural usufruía da modernização financiada pelo Estado,

a maioria dos pequenos produtores rurais não conseguiu alterar a base técnica e econômica da produção, sendo muitos excluídos do meio rural, dado o caráter excludente e concentrador do processo modernizante, durante a crise econômica iniciada nos anos 1980 e

⁷ De acordo com Hespagnol (1997), até então, não havia políticas agrícolas propriamente ditas, mas sim específicas, que atendiam aos interesses dos segmentos mais importantes da economia agrária, como o açucareiro, o cafeeiro e o cacaueteiro, que dispunham de fortes organizações, como o Instituto Brasileiro do Café (IBC), o Instituto do Açúcar e Alcool (IAA) e a Comissão Especial da Lavoura Cacaueteira (CEPLAC).

⁸ No ano de 1981, a Política de Garantia de Preços Mínimos (PGPM) foi adotada para neutralizar os efeitos da inflação, tornando-se um instrumento mais importante que o crédito rural (Id., 1997).

ainda não superada, a situação dos mesmos agravou-se ainda mais (HESPANHOL, 1997, p.47)⁹.

Além disso, a Revolução Verde contribuiu também na disseminação dos problemas ambientais, como a erosão do solo, desertificação, poluição por agrotóxicos e perda da biodiversidade (ALTIERI, 2009). Ainda nos anos 1940-50,

os agrotóxicos e adubos químicos eram raros e os principais instrumentos de trabalhos continuavam sendo a enxada, a foice, as juntas de bois, as carroças (...) o arroz era cultivado para o consumo familiar e por quem tinha terra plana; o trigo era transformado em farinha nos moinhos da colônia. De todos os produtos agrícolas, o milho permanecia sendo o mais cultivado desde 1883 porque era usado na alimentação da família e dos animais. Por isso, praticamente não era comercializado. Já o fumo era plantado para a venda desde o início do século XX (SAQUET, 2002, p.47).

Entre o período de 1960 a 1992, houve uma ampliação da produção de soja, cana-de-açúcar, laranja e milho (HESPANHOL, 1997). Para Saquet (2002), esse processo de modernização da agricultura no Brasil foi centrado, num primeiro momento, na produção do trigo até o início da década de 1970; e no pós 1972, na supremacia da soja, produto de exportação.

Assim, o maior desafio da agricultura familiar é adaptar e organizar seu sistema de produção a partir das tecnologias disponíveis (PORTUGAL, 2004) que fazem cada hectare produzir mais. É importante também, dar aos pequenos produtores condições de explorar intensamente seus recursos (ALVES, 2001). Nesse contexto, desenvolver tecnologias agrícolas é uma maneira de alcançar independência em relação aos insumos externos e ao mesmo tempo de promover a adoção de tecnologias de baixo custo, possibilitando o desenvolvimento rural sustentável.

3.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO (AP)

Desde os primórdios dos tempos o homem teve a necessidade de localização, fosse para saber onde estava, para marcar caminhos, campos de caça e mesmo por sobrevivência. Desta forma, vários foram os métodos de localização utilizados pelo homem durante a sua evolução, como por exemplo, pedras para marcar caminhos e estrelas para se localizar (CELINSKI, 2008).

⁹ Sobre o quadro histórico, político e social da agricultura no Brasil, consultar Hespagnol (1997).

Quanto à agricultura, desde seu surgimento no mundo, o homem já buscava aprimorar suas técnicas de cultivo utilizando a tração animal para facilitar o trabalho no campo. Após o surgimento dos primeiros tratores, a mecanização agrícola evoluiu constantemente, iniciando na década de 1980 as pesquisas em agricultura de precisão (AP) (WERNER, 2004).

O conceito de agricultura de precisão, para Coelho (2008), surgiu no fim do século XX, em função da liberação do sinal do sistema GPS para o uso civil, aliadas ao sensoriamento remoto, aos SIG's e à Geoestatística¹⁰. No Brasil, a agricultura de precisão chegou entre 1995 e 1996, com forte resistência, pois era vista como uma ferramenta apenas para grandes propriedades.

Nesse sentido, o conceito de agricultura de precisão não é novo (QUEIROZ et al., 2000; WERNER, 2004). É sim uma nova tecnologia de longa história (COELHO, 2003). Na realidade, as práticas agrícolas são utilizadas desde os tempos em que pequenas áreas eram cultivadas e grande parte do trabalho era feito manualmente, incluindo o tratamento individualizado para uma planta, ou pequenas áreas (QUEIROZ et al., 2000).

No entanto, vale ressaltar que com a introdução da tecnologia da agricultura de precisão no Brasil, muitos técnicos e agricultores tem confundido os conceitos de precisão na agricultura com a agricultura de precisão. Enquanto a precisão na agricultura está relacionada com a capacidade de planejamento e gerenciamento do produtor na atividade agrícola, em que aspectos de implantação e condução das culturas são determinantes para a construção e proteção do potencial produtivo, a agricultura de precisão consiste no uso da tecnologia da informação para adequar o manejo dos solos e das culturas à variabilidade presente dentro das áreas cultivadas, visando ao aumento da produtividade, ao benefício econômico e à redução no impacto ambiental (COELHO, 2008).

Dessa forma, por muito tempo, agricultores têm procurado maximizar a produção das culturas, variando a aplicação de insumos de acordo com os tipos de solos e culturas (COELHO, 2003). Além disso, com o aumento das áreas cultivadas e o desenvolvimento da mecanização agrícola, tornou-se impossível o tratamento individualizado das plantas e grandes áreas passaram a ser trabalhadas de maneira uniforme (QUEIROZ et al., 2000), não considerando a variabilidade (WERNER, 2004).

No entanto, sabe-se que é incorreto afirmar que a agricultura de precisão deseja uniformizar a produtividade através de todo o campo. Ao contrário, ela procura perceber a

¹⁰ Os conceitos de GPS, SIG's e Geoestatística serão apresentados posteriormente.

produtividade potencial e a qualidade da cultura com o incremento do retorno econômico de todas as partes de um campo, com o mínimo impacto sobre o meio ambiente (RODRIGUES, 2002; MACHADO et al., 2004; WERNER, 2004). Para isso, decisões sobre o preparo do solo, manejo de resíduos das culturas, seleção de melhor cultivar, aplicação de água na irrigação e drenagem também devem ser consideradas na agricultura de precisão (MANZIONE, 2002).

Nesse sentido, o objetivo da agricultura de precisão consiste em manusear áreas visando reduzir o uso de produtos químicos e aumentar a produtividade. Além disso, o atendimento às necessidades do solo e das culturas em desenvolvimento tanto pode beneficiar economicamente os produtores, como também melhorar as condições ambientais nas quais ele e seus vizinhos vivem (QUEIROZ et al., 2000).

Molin (2001, p.2) define a agricultura de precisão como

uma proposta para permitir que se faça aquilo que o pequeno agricultor sempre fez, porém em larga escala e associando todo o conhecimento acumulado pelas ciências agrárias até hoje. A ideia básica é que o agricultor possa inicialmente identificar as “manchas” de altos e baixos de cada talhão e depois vir a administrar essas diferenças.

É por isso que a agricultura de precisão é um novo paradigma de gerenciamento agrícola que vem alterando a forma de se praticar a agricultura em todo o mundo, onde o fundamento maior é a existência da variabilidade significativa dentro de um talhão ou unidade mínima de manejo da agricultura convencional (SARAIVA et al., 2000; WERNER, 2004).

Na agricultura convencional, baseada na mecanização e na produção em larga escala, o campo é tratado de forma homogênea, onde a aplicação de fertilizantes é feita de forma uniforme em toda a área a partir de cálculos com base em índices médios de fertilidade. Já na agricultura de precisão, o sistema de manejo agrícola reconhece a existência da variabilidade no campo, onde a prática da semeadura, o nível de aplicação de fertilizantes e pesticidas varia dentro do campo. Desta forma, a aplicação é diferenciada entre as zonas de manejo (VALENCIA et al., 2001).

Apesar de rapidamente difundida e muito comentada, ainda é difícil definir o que vem a ser a agricultura de precisão (GIMENEZ, 2000). Menegatti e Molin (2003) caracterizam a agricultura de precisão como um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial de propriedades do solo e da planta encontrada nos talhões, visando à otimização do lucro, a sustentabilidade e a proteção do ambiente. Este sistema integrado da agricultura de

precisão tem também por princípio básico o manejo da variabilidade dos solos e culturas no espaço (distância e profundidade) e no tempo (COELHO, 2003; WERNER, 2004). Esta variação, no entanto, pode se manifestar com maior intensidade em alguns atributos do que em outros (CELINSKI, 2008).

Desta forma, diferentes tecnologias são incorporadas a programas computacionais e levadas ao campo para permitir um sistema de manejo que considere a variabilidade espacial da produção a fim de tornar prático o planejamento (QUEIROZ et al., 2000; MENEGATTI; MOLIN, 2003). Como exemplo dessas tecnologias, há a utilização de satélites, sensores remotos e mapas, que possibilitam atingir o mais alto grau de eficácia no planejamento do plantio, através da informatização das operações agrícolas e da criação de um banco de dados das áreas agrícolas ao longo dos anos (MANZIONE, 2002).

É por isso que a amostragem sistematizada de solos, o levantamento de dados e o mapeamento da área fornecem informações sobre a variabilidade dos solos e das culturas em uma determinada área. Esses dados, quando processados e representados em formas de mapas podem ser utilizados para a tomada de decisões (COELHO, 2003).

Além disso, para a agricultura de precisão o produtor necessita saber como o solo varia dentro do campo. Para isso, é necessário um método de amostragem e estimativa diferente daqueles usados tradicionalmente, pois a variação no interior do campo incluirá desde centímetros até metros, sendo desejável solucioná-la com a escala mais ampla para o manejo, o que dependerá da amostragem adequada e de um efetivo método de estimativa (RODRIGUES, 2002).

Souza et al. (2004) ainda reforçam que a variabilidade espacial dos atributos do solo deve ser bem conhecida, visando minimizar os erros de amostragem e de manejo, pois o solo apresenta heterogeneidade, tanto vertical como horizontal, imposta pela natureza dos fatores de formação. No entanto, além dos fatores de formação do solo, Machado et al. (2004) apontam outras “variabilidades”, sintetizadas pela: variabilidade da produção (distribuição histórica e atual da produtividade); variabilidade do campo (altitude, declive, aspecto da paisagem, terraço, proximidade à bordadura e a rios e lagos); variabilidade do solo (fertilidade do solo, propriedades físicas do solo, como textura, densidade, teor de umidade e condutividade elétrica, propriedades químicas, como pH, carbono orgânico e CTC, e profundidade do solo); variabilidade da cultura (densidade de plantio, altura da planta, estresse nutricional, estresse hídrico, propriedades biofísicas da planta, conteúdo de clorofila na folha e qualidade do grão); variabilidade em fatores anômalos (infestação de plantas

daninhas, ataque de pragas, presença de nematóides, geadas e granizo) e variabilidade no manejo (taxa de semeadura, rotação de culturas, aplicação de fertilizantes e pesticidas).

Ainda cabe ressaltar a descrição de Dodermann e Ping (2004 apud DELLAMEA et al., 2007, p.1) que

embora o manejo do solo tradicionalmente adotado pelos agricultores seja uniforme em uma determinada área ou gleba, a resposta a este manejo será diferenciada em função do histórico da área (erosões, compactações, sub-fertilizações ou superfertilizações, histórico de colheitas e exportações de nutrientes, entre outros). Neste contexto, a Agricultura de Precisão (AP) apresenta-se como uma excelente ferramenta para auxiliar o produtor rural na definição das melhores estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência do gerenciamento agrícola. A AP tem como principal conceito aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam.

Por isso, o desafio da agricultura de precisão é oferecer subsídios para a definição de unidades de manejo para posterior intervenção (TRABACHINI et al., 2009). Ao aplicar em cada ponto apenas a quantidade necessária, do produto certo e na hora adequada, as vantagens ambientais e econômicas permitirão obter o rendimento esperado por essa tecnologia. Além disso, a agricultura de precisão traz consigo a possibilidade de identificar, quantificar e mapear a variabilidade com boa acurácia por meio de uma tecnologia eletrônica antes não disponível (SARAIVA et al., 2000).

Sobre isso, Coelho (2008, p.1065) afirma que a agricultura de precisão

caracteriza-se por ser uma ferramenta para bons produtores; não é um substituto desses. Baseia-se em informações de qualidade e interpretadas em base agronômica. É implementada por um bom administrador e depende de uma base de dados com informação científica, bem organizada em um SIG, para sua interpretação.

É desta forma que a interação com o produtor é essencial para a agricultura de precisão devido o conhecimento da área analisada e seu histórico, pois a variabilidade espacial do rendimento da cultura pode ser resultado de outros fatores (como diferença de manejo) que não os tradicionais, como a fertilidade, por exemplo (LAMPARELLI et al., 2001).

E assim, esta tecnologia proporcionará ao agricultor a aplicação de insumos considerando a área de modo diferenciado, a fim de racionalizar seu uso (QUEIROZ et al., 2000), pois ao associar a uma localização exata, podem ser expressas na forma de mapas

digitais. A integração deste tipo de mapa com outras informações sobre a área, como propriedades físicas e químicas, produtividade, incidência de doenças e pragas, pode servir de base para um sistema de suporte à decisão, visando ao gerenciamento localizado (LAMPARELLI et al., 2001) uma vez que com as informações processadas pode-se determinar também a quantidade de insumos que deve ser aplicada em um determinado local, buscando-se uma maior uniformização do rendimento da cultura.

Por isso, para Coelho (2008) o ciclo completo da agricultura de precisão consiste na obtenção de informações de campo, análise dessas informações, interpretação, geração das recomendações técnicas, aplicação a campo das intervenções recomendadas e monitoramento dos resultados. No entanto, a agricultura de precisão não implica numa técnica de manejo específica. Ela possibilita ao profissional responsável pelo manejo o melhor entendimento e maior controle sobre os sistemas de tratamento dos campos de produção. Ao aumentar a eficiência, com base no manejo diferenciado de áreas na agricultura, não significa necessariamente, a obtenção de máxima produtividade, mas sim a otimização do retorno econômico dentro de restrições impostas pelo meio ambiente (QUEIROZ et al., 2000).

3.2.1 Agricultura de Precisão e Geoprocessamento

Os avanços em tecnologia expandiram em vários setores, entre eles a agricultura. A era industrial trouxe a mecanização e os fertilizantes sintéticos; a era tecnológica ofereceu a engenharia genética e a automação e, na era da informação foi possível integrar e aplicar na agricultura de precisão os diferentes avanços tecnológicos alcançados nas áreas de eletrônica, geografia, informática, engenharia mecânica e mecatrônica (MACHADO et al., 2004).

Através da consolidação da informática na segunda metade da década de 1980, hoje não se consegue executar tarefas de natureza técnica sem os recursos de *hardware* e de *software* atualizados (ANDRIOTTI, 2010). Para Molin (2001) muitas dessas tecnologias foram adaptadas ao meio agrícola, pois para a implementação da agricultura de precisão é necessário um bom grau de automatização e, grande parte dessa automatização é fruto do aproveitamento de tecnologias desenvolvidas por outras áreas. Entre essas tecnologias, está o desenvolvimento espacial, principalmente o relacionado aos satélites. Este sistema tem grande confiabilidade e permite a localização exata, sendo chamado de GPS (CELINSKI, 2008).

O GPS (Sistema de Posicionamento Global) é um sistema projetado para fornecer o posicionamento instantâneo (ANTUNIASSI et al., 2007). A tecnologia GPS foi criada na

década de 70, mas somente nos dias atuais, com uma rede de satélites de alta confiabilidade é que tem feito do seu uso uma rotina em muitas propriedades agrícolas (MANZIONE, 2002).

Na agricultura, é utilizado como uma ferramenta para fornecer as coordenadas do campo para o computador ou processador na máquina (ANTUNIASSI et al., 2007). Para Celinski (2008), o GPS ainda pode ser utilizado no acompanhamento da lavoura, na demarcação de áreas de ocorrência de doenças das culturas e de ataque de plantas daninhas, bem como no mapeamento da produtividade e em amostragens de solos.

Para isso, existem diversos tipos de GPS, normalmente classificados pela precisão na localização ou posicionamento. O mais comum e mais barato, é o GPS de navegação, normalmente sem correção nenhuma e que proporciona uma precisão entre 5 a 10m. Esta precisão é suficiente para o mapeamento da fertilidade do solo e no mapeamento da produtividade da cultura quando utilizado na colhedora (ANTUNIASSI et al., 2007).

Além disso, para Coelho (2003), com o desenvolvimento do GPS, associado a equipamentos capazes de medir a variabilidade (monitores de colheita) e aplicação de insumos (fertilizantes, herbicidas, sementes, etc.) a taxas variáveis, há possibilidade de manejo das culturas de modo mais específico.

A agricultura de precisão necessita então de um GPS, de mecanismos para controle de aplicação de nutrientes e de um banco de dados. O GPS fornece a posição onde o equipamento está localizado; os mecanismos para controle de aplicação de nutrientes tratam-se de defensivos agrícolas, água ou outros insumos em tempo real, e o banco de dados fornece a informação necessária para desenvolver as relações de causa e efeito e as respostas à aplicação de insumos em várias condições especificamente localizadas (TRABACHINI et al., 2009)

Dessa forma, o GPS foi um dos fatores que alavancou a agricultura de precisão, pois a maioria dos trabalhos nesta área necessitam de posicionamento instantâneo de um ponto. Assim, os equipamentos que oferecem técnicas de posicionamento em tempo real são os mais indicados para as aplicações dinâmicas. No entanto, pode-se obter melhor acurácia, com aqueles equipamentos que necessitam de pós-processamento (ELIAS; PIROLI, 2009).

Quanto aos procedimentos práticos referentes à agricultura de precisão, Molin (2001) apresenta que uma vez que as amostras tenham sido coletadas, enviadas ao laboratório e as informações geradas, devem-se produzir os mapas das propriedades, a partir de técnicas de geoestatística associadas a programas computacionais denominados de Sistemas de

Informações Geográficas – SIG ou “Geographic Information System” – GIS, para a organização e análise dos dados, bem como para a produção dos mapas e análise espacial.

Para Manzione (2002), essas informações quando processadas em *softwares* usados para monitorar as áreas, servirão para o planejamento do plantio seguinte, pois esses *softwares* ou SIGs auxiliam na interpretação das relações entre os fatores que afetam a produção de uma área e sua produtividade. É desta maneira que as ferramentas de geoprocessamento, na agricultura, permitem integrar vários tipos de informações necessárias, como o tratamento estatístico dos dados coletados, fundamentais para o gerenciamento e controle da produção agrícola (CELINSKI, 2008).

Sobre o gerenciamento localizado de insumos na agricultura de precisão, Lamparelli et al. (2001, p.11) afirmam que

entender e modelar a variabilidade espacial da produtividade das culturas, das propriedades do solo e de qualquer outro parâmetro que possa estar correlacionado com a produtividade é uma das etapas mais importantes para se estabelecer um processo de gerenciamento localizado de insumos.

Nesse sentido, são relevantes os recursos geoestatísticos para análise da variabilidade espacial, os sistemas de sensores para mapeamento da produtividade, os SIGs e o GPS (RODRIGUES, 2002). Assim, a geoestatística surge como uma área na qual são estudados fenômenos geográficos em conjunto com ferramentas estatísticas voltadas para o entendimento espacial. Deste modo, as ferramentas da agricultura de precisão estão vinculadas a experimentos agrícolas que utilizam elementos (geo)estatísticos para planejamento e avaliação dos resultados, baseando-se muitas vezes, em técnicas de interpolação.

3.2.2 Variabilidade espacial e mapas digitais na análise de pH do solo

Desde o início do século XX, pesquisadores procuravam desenvolver uma metodologia para que os produtores rurais pudessem amostrar, testar e mapear os solos, principalmente com relação à acidez (pH do solo), de forma simples e prática e que resultasse em uma economia dos insumos aplicados (CELINSKI, 2008).

A variabilidade espacial dentro das culturas, incluindo a produtividade e qualidade da cultura, o tipo e fertilidade do solo, os padrões de cultivo, a incidência de plantas daninhas, pragas e doenças tem sido há muito tempo observado pelos produtores rurais, os quais tem

grosseiramente aplicado calcário em taxas e em partes diferentes das áreas agrícolas, baseados em análises de pH do solo no campo (RODRIGUES 2002).

Na ciência cartográfica é possível encontrar vários tipos de mapas. Um mapa de produtividade, por exemplo, ilustra a variabilidade da produtividade, indicando locais com possíveis problemas agronômicos. Esses mapas indicam a variabilidade dos talhões de determinada cultura e também podem ajudar a identificar as causas desta variabilidade, possibilitando assim, uma redução dos custos e um aumento da produção (ANTUNIASSI et al., 2007). Além disso,

um mapa de produtividade evidencia regiões com alta e baixa produtividade, mas **não explica a causa de tal variação, que pode ser** por doenças, **por baixo pH**, por estresse hídrico entre outras; se a causa específica não é determinada, nenhuma resposta ao gerenciamento pode ser obtida (LARK & STAFFORD, 1997 apud TRABACHINI et al., 2009, p. 2, grifo nosso).

Por isso, investigando “as causas” desta variabilidade é possível tomar algumas decisões para correção, como os níveis de fertilidade, compactação, problemas de drenagem ou mesmo de pragas (ANTUNIASSI et al., 2007). Tais decisões buscam beneficiar o agricultor, o solo, a colheita e a aplicação de insumos, pois a agricultura de precisão disponibiliza uma enorme quantidade de informação, contida nos diversos tipos de mapas que podem ser elaborados, entre eles, os de atributos físicos e químicos do solo (WERNER, 2004).

Nesse sentido, a fertilidade do solo é apontada por Gimenez (2000) como um dos fatores mais importantes para a determinação do rendimento das culturas. É por isso que a análise química do solo é muito utilizada na agricultura para avaliação da disponibilidade de nutrientes para as plantas. Serve para a prescrição de corretivos e fertilizantes (RAIJ et al., 2001). A alteração de alguns minerais e o uso de alguns fertilizantes podem tornar o solo ácido, comprometendo o crescimento dos vegetais e, conseqüentemente, o rendimento da produção agrícola. Por isso, o conhecimento do pH é fundamental na agricultura.

O pH (potencial hidrogeniônico) indica a quantidade de íons hidrogênio (H^+) que existe no solo. Assim, um solo é ácido quando possui muitos íons H^+ e poucos íons de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) adsorvidos em seu complexo coloidal de troca (RONQUIM, 2010). Dessa forma, o pH fornece indícios das condições químicas gerais do solo, ao disponibilizar nutrientes às raízes das plantas, propiciando condições favoráveis para

o desenvolvimento de microorganismos que transformam em melhores condições o solo (KIEHL, 1979).

Solos com acidez elevada (baixos valores de pH) geralmente apresentam: pobreza em bases (cálcio e magnésio principalmente), elevado teor de alumínio tóxico, excesso de manganês, alta fixação de fósforo nos colóides do solo e deficiência de alguns micronutrientes. O pH do solo é o indicador de uma situação biológico-físico-química e como tal seria enganoso considerar somente os seus efeitos químicos diretos às raízes (RONQUIM, 2010).

Além disso, sabe-se que solos ácidos dificultam as trocas químicas, comprometendo o desenvolvimento vegetativo (KIEHL, 1979). A acidificação dos solos é um processo químico que ocorre naturalmente. Todos os solos “envelhecem” ou sofrem intemperismo, e a acidificação é parte deste envelhecimento natural. O Brasil, por estar sob influência do clima tropical, em que a ação de chuvas e altas temperaturas são intensas durante o ano inteiro, possui solos mais velhos e, por isso, mais ácidos (RONQUIM, 2010), além de baixos teores de cátions trocáveis e reduzida fertilidade (MACHADO et al., 2004).

Kiehl (1979, p.246) ainda completa que “a acidez do solo desenvolve-se devido à remoção de bases pelas plantas e pela água de percolação, permitindo que o hidrogênio deste líquido tome os lugares, por troca, das bases que vão sendo removidas”. Nesse sentido, os elementos alcalinos, notadamente o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , são lixiviados das camadas superiores pelas águas contendo CO_2 , sendo substituídos nos colóides pelos íons H^+ (RONQUIM, 2010).

Por isso, o ideal para fins agrícolas é que o pH esteja entre 5,5 e 6,5, pois é o mais favorável para as plantas (KIEHL, 1979). Desta forma, para que se saiba o valor do pH de uma determinada área agrícola, é necessário realizar a análise química. Entre os métodos de determinação do pH, destacam-se a solução pela água e pelo cloreto de cálcio.

O pH em solução de cloreto de cálcio é uma determinação mais precisa do que o pH determinado em água, pois este é bastante afetado por pequenas quantidades de sais presentes no solo (SCHOFIELD e TAYLOR, 1955; DAVEY e CONYERS, 1988 apud RAIJ et al., 2001). Posteriormente a esta determinação, deve-se tomar medidas adequadas conforme o tipo de solo. De acordo com os valores obtidos, pode ser necessária a correção da acidez do solo.

Para se corrigir a acidez do solo deve-se utilizar um elemento que libere ânion e que forme um ácido fraco com o hidrogênio e ainda forneça cálcio ou cálcio e magnésio para a planta. Os materiais empregados na correção da acidez do solo tropical (calcários) são

encontrados na natureza em forma de rocha, que é moída e peneirada para ser aplicada ao solo. Assim, após a calagem ocorre a neutralização do alumínio trocável, aumentando a saturação por bases (V%). Com a neutralização de parte do hidrogênio adsorvido, ocorre elevação do pH do solo (RONQUIM, 2010).

3.3 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

A interpolação é o procedimento de predizer valores de atributos em locais não amostrados a partir de medições feitas em locais pontuais dentro da mesma área ou região (BURROUGH; MCDONNELL, 2004; VALERIANO; ROSSETTI, 2010), isto é, a partir de valores estimados e conhecidos é possível utilizar-se de técnicas de geração de isolinhas ou superfícies para a produção de mapas de interesse (MOLIN, 2001).

A interpolação é usada para converter dados de observações pontuais para campos contínuos de modo que os padrões espaciais formados por estas medidas possam ser comparados aos padrões espaciais de outras entidades espaciais. Desta forma, a interpolação é necessária quando a superfície de dados tem um nível diferente de resolução, tamanho de pixel ou orientação; quando uma superfície contínua é representada por um modelo de dados que é diferente do exigido e quando os dados não cobrem completamente o domínio de interesse (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

Sobre isso, Molin (2001, p. 63) completa que

com os dados de cada ponto amostrado, incluindo sua localização em coordenadas, pode-se utilizar técnicas matemáticas ou estatísticas para estimar e atribuir valores para pontos não amostrados. Estes processos são conhecidos como interpolações e são efetuados por programas especializados. Esses programas tendem a integrar várias outras funções como a organização e armazenamento dos dados, geração de mapas e análise de dados.

Assim, a interpolação é o procedimento pelo qual se estimam valores de uma variável em área interior aos pontos de amostragem disponíveis, permitindo representar em mapa, de forma contínua, o comportamento de variáveis amostradas pontualmente (ANDRIOTTI, 2010). No entanto, ao contrário, há a predição de valores de um atributo em locais fora da área de cobertura de observações existentes, denominando-se extrapolação (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

Ainda, Lamparelli et al. (2001, p.82) afirmam que

muitos são os métodos de interpolação de valores não amostrados e uma vez que os dados podem ser coletados em um número razoavelmente grande de pontos na área, é pequena a diferença em eficiência de um método para outro. Mas em muitos casos, um número grande de amostras significa um custo muito alto e que não pode ser considerado.

Nesse sentido, os métodos de interpolação espacial podem ser divididos basicamente em dois grupos, chamados interpoladores globais e locais. Enquanto os globais são inexatos, os locais são exatos (LANDIM, 2013a).

3.3.1 Métodos globais de interpolação espacial

Interpoladores globais utilizam todos os dados disponíveis para fornecer previsões para a área toda de interesse. São simples de calcular e se baseiam em ideias estatísticas de padrão de análise de variância e de regressão. Os métodos de classificação utilizam informações disponíveis (tais como tipos de solos ou áreas administrativas) para dividir a área em regiões que podem ser caracterizadas por modelos estatísticos (média, variância) dos atributos medidos nas localizações dentro dessas regiões (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

Para Druzina (2007, p.25) os interpoladores globais “não são muito usados para interpolação direta, mas para a análise e possibilidade de remoção de efeitos de variações globais ou a presença de várias classes de terra, o que pode indicar áreas que têm valores de média diferentes”. Os métodos globais de interpolação espacial ainda podem ser divididos em estocástico e determinístico. Como exemplo de estocástico, há os modelos de regressão e como exemplos de determinístico há a análise de superfície de tendência (LANDIM, 2013a).

3.3.1.1 Análise de Superfícies de Tendência

A técnica Análise de Superfícies de Tendência, do inglês *Trend Surface Analysis*, propõe a representação das variações de grande porte de variáveis numéricas, que lança mão de regressão polinomial (ANDRIOTTI, 2010). É encontrada dentro dos estudos de geologia matemática, geologia do petróleo, geomorfologia, geografia física e sensoriamento remoto (ZANI; ASSINE, 2009).

De acordo com Landim (2010), esta metodologia foi introduzida nas Ciências da Terra por Oldham e Sutherland em 1955; Krumbein em 1956-9; Grant em 1957 e Whitten em 1959

para obterem mapas gravitacionais, estratigráficos, de isópacas e mapas com atributos específicos em rochas sedimentares e ígneas. Desde então, o número de aplicações tem crescido significativamente e o mesmo tem sido aperfeiçoado.

As superfícies de tendência são interpoladores determinísticos globais que buscam modelar a variação espacial em larga escala através de uma regressão múltipla entre os valores de atributo e as localizações geográficas (FELGUEIRAS; CÂMARA, 2004), sendo as tendências funções das coordenadas dos pontos amostrados (ANDRIOTTI, 2010).

Nesse sentido, vale destacar que a função polinomial é um caso específico da regressão múltipla. Nesta, várias variáveis independentes governam o comportamento de uma variável dependente. No caso específico da função polinomial, na qual se baseia a superfície de tendência há duas variáveis independentes, representadas pelas coordenadas geográficas (LANDIM, 2013b).

Na interpolação por superfícies de tendência, na caracterização do fenômeno em estudo predomina a variação em larga escala, onde a variabilidade local não é relevante. É utilizada então, uma função polinomial na qual o valor do atributo é expresso em função das coordenadas da superfície, dadas em duas ou três dimensões (FELGUEIRAS; CÂMARA, 2004). Assim, a partir dos dados georreferenciados, tem-se o ajuste de uma superfície teórica contínua através de critérios de regressão por mínimos quadrados, em relação aos valores da variável dependente Z (altitude) e considerando como variáveis independentes as coordenadas geográficas Norte-Sul (Y) e Leste-Oeste (X) (POLIZEL, 2012; ZANI; ASSINE, 2009; LANDIM, 2010).

Para Andriotti (2010, p.86), a análise de superfície de tendência pode ser caracterizada “como um filtro aplicado sobre os valores originais com a finalidade de remover as variações de grande porte, mantendo (e realçando) as feições de pequeno porte presente nos dados”. Segundo Burrough e McDonnell (2004) sua vantagem é que consiste em uma técnica fácil de compreender, visto na maneira simples de como as superfícies são calculadas. Landim (2010, p.46) ainda ressalta que a *Trend* é

uma técnica relativamente simples e muito útil quando os mapas de tendência e os respectivos resíduos podem ser interpretados a partir de um ponto de vista espacial ou então quando o número de observações é limitado de modo que a interpolação passa a ser baseada nesses poucos dados.

Com a aplicação dessa análise, consegue-se separar dados mapeáveis em duas componentes, sendo uma de natureza regional, representada pela própria superfície, e outra

que revela as flutuações locais (anomalias), representadas pelos valores residuais (BERNARDI et al., 2001), ou seja, em alguns mapas, em determinadas situações, os padrões de variação podem não se mostrar muito claros devido a flutuações locais ou a valores anômalos. Estes casos se tratam de tendências regionais que são mascaradas por anomalias locais. O método *Trend* pode então ser utilizado para evidenciar tal situação, pois, segundo esse procedimento, além das grandes mudanças existentes na área, há aquelas pequenas, aparentemente não ordenadas flutuações, que se impõem aos padrões mais gerais (LANDIM, 2010).

Quando aplicada a análise de superfície de tendência, os mapas de resíduos ressaltam as rugosidades da superfície real. Os resíduos são as diferenças entre os valores observados e os estimados nos locais amostrados, ou seja, é a distância vertical entre a elevação do ponto e a elevação da superfície ajustada naquele local. O resíduo é positivo se o valor real estiver acima da superfície ajustada e negativo se estiver abaixo dela (ANDRIOTTI, 2010).

Para exemplificar, Polizel (2012) apresenta que em dados topográficos a análise de superfície de tendência fornecerá um plano de informação contendo o padrão regional topográfico (a tendência) e, em outro, será obtido da subtração da tendência dos dados originais no qual irá representar a microtopografia (resíduos).

Além disso, esse tipo de análise espacial considera que as relações encontradas na natureza são gradativas, ou seja, quanto mais próximos estiverem os pontos de coleta de uma determinada variável no espaço mais semelhantes entre si serão os valores obtidos. Dessa forma os valores de determinada variável podem ser parcialmente previstos por pontos vizinhos, que são dependentes entre si (BERNARDI et al., 2001).

Por isso, embora as superfícies de tendência sejam bem úteis para descrever grandes tendências geográficas, raramente passam exatamente nos pontos de dados originais, a menos que estes sejam poucos e que estejam distribuídos em uma superfície extensa, visto seu caráter de suavização. Assim, a principal utilização de análise de superfície de tendência não é como um interpolador de uma região, mas como uma forma de remover as características gerais dos dados antes de usar algum interpolador local (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

3.3.2 Métodos locais de interpolação espacial

Interpoladores locais operam dentro de uma pequena zona ao redor do ponto a ser interpolado para garantir que as estimativas sejam feitas somente com dados situados na vizi-

nhança imediata ao ponto (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

Os métodos locais de interpolação espacial podem ser divididos em determinístico e estocástico. Como exemplos de determinísticos há o TIN (*Triangular Irregular Network*) contemplado aos Polígonos de Thiessen (Triângulos de Delaunay), o Inverso do quadrado da distância e as *Splines* e, como exemplo estocástico há a krigagem (LANDIM, 2013a). Há ainda outros interpoladores locais como o vizinho mais próximo, funções que usam covariância espacial e outras funções não lineares (BURROUGH; MCDONNELL, 2004; VALERIANO; ROSSETTI, 2010).

3.3.2.1 Redes Irregulares Triangulares (TIN)

As Redes Irregulares Triangulares correspondem à expressão TIN (do inglês *Triangular Irregular Network*) e são estruturas do tipo vetorial com topologia do tipo *nó-arco*, que representam uma superfície através de uma série de segmentos, conectando os pontos amostrais para formar triângulos de faces interligadas não sobrepostas (CÂMARA; MONTEIRO, 2004; FELGUEIRAS; CÂMARA, 2004; GOMES et al., 2007) geradas a partir de um conjunto finito de pontos amostrados (KERSTING et al., 2004).

A rede irregular triangular foi projetada por Peucker para a modelagem digital (BURROUGH; MCDONNELL, 2004). Dessa forma, a triangulação é um método de estimativa para modelagem de superfícies que conecta pontos amostrados através de triângulos e interpola os valores entre eles. São considerados métodos de estimação diretos uma vez que os contornos derivam do padrão original dos dados. Além disso, não permite a extrapolação e as estimativas limitam-se estritamente à área amostrada (LANDIM, 2000).

Para Valeriano e Rossetti (2010), a rede irregular de triângulos remete à interpolação linear¹¹. Segundo o autor,

o interpolador linear funciona de modo que a variação do valor estimado entre um dado amostral e outro seja constante, o que produz superfícies marcadas por faces retilíneas, ou planos inclinados. Uma vez que cada plano se define por três pontos no espaço tridimensional, o interpolador linear precisa se apoiar numa divisão da área em

¹¹ Os autores apresentam que a rede irregular de triângulos é usada erroneamente para se referir à interpolação linear ou a MDE assim produzidos. Para eles, “o termo TIN, cujo núcleo é *Network*, ou rede, não se refere à interpolação nem ao MDE produzido e sim a uma abstração geométrica necessária à interpolação linear” (Id., 2010, p.23). Outros autores também discordam de considerar o TIN como um interpolador. No entanto, neste trabalho será avaliado como interpolador, visto que o SIG Idrisi, utilizado neste trabalho, o classifica como interpolador.

triângulos em cujos vértices se localizam as amostras (VALERIANO; ROSSETTI, 2010, p.23).

Para Landim (2000), na triangulação linear, os pares de dados são unidos por linhas retas para a formação de uma rede irregular triangular e uma equação matemática (algoritmo) é utilizada para ajustar uma superfície através dos pontos de dados, sendo os mais utilizados a triangulação linear e a de Delaunay. Rosim et al. (2010) ainda ressalta que no modelo TIN cada triângulo é formado por três amostras segundo a regra de Delaunay, regra esta que se baseia em criar triângulos com arestas com pouca variação de tamanho entre elas.

Para Fazan et al. (2010), estes triângulos possuem faces planas inclinadas no espaço tridimensional, sendo que cada aresta (lado formado pela conexão de dois vértices) possui uma inclinação uniforme. O sistema de triângulos formado é topologicamente organizado de modo a produzir a estrutura de representação TIN. Desta forma, ao usar as amostras do relevo, a estrutura TIN não altera os seus valores originais, preservando as feições geográficas (ROSIM et al., 2010).

Para cada um dos três vértices da face do triângulo são armazenadas as coordenadas de localização (x, y) e o atributo “z”, que pode ser representado pelas características do solo, pelo valor de elevação ou altitude (CÂMARA; MONTEIRO, 2004) onde as próprias funções lineares que descrevem a representação da grade triangular podem ser usadas na geração da superfície, o que torna o modelo capaz de se adaptar nas diversas densidades de dados sobre vários tipos de terrenos (GOMES et al., 2007). É nesse sentido que a estrutura TIN é um dos modelos mais usados em aplicações envolvendo modelos numéricos de terrenos (ROSIM et al., 2010).

Ao descrever as redes irregulares triangulares, Burrough e McDonnell (2004) as apresentam associando aos modelos digitais de elevação¹² como um caso especial de superfícies contínuas criadas pela interpolação. Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) ou *Digital Elevation Models* (DEM) são modelados por grades regulares (matrizes de altitude) e redes irregulares triangulares. As duas formas são inter-convertíveis e a preferência por uma ou outra depende do tipo de análise dos dados que tem de ser realizado.

Para Felgueiras e Câmara (2004), o TIN é um poliedro de faces triangulares. Valeriano e Rossetti (2010) afirmam ainda que dentro de cada triângulo, os valores assumem o valor local da superfície, em cada ponto estimado. De modo geral, os pontos dos dados originais

¹² Modelos Digitais de Elevação e Modelos Numéricos de Terrenos, neste caso, podem ser descritos como sinônimos. A terminologia muda conforme os autores.

são localizados em uma malha regular ou são distribuídas irregularmente ao longo de uma área, para posterior interpolação (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

Além disso, a malha também deve conter triângulos com geometria mais próxima possível de equiláteros, evitando assim a criação de triângulos afinados (GOMES et al., 2007). Dessa forma, quanto mais equiláteras forem estas faces triangulares, maior exatidão terá a superfície. Assim, o valor “z” em qualquer ponto dentro da superfície pode ser estimado a partir das faces triangulares, utilizando-se interpoladores (CÂMARA; MONTEIRO, 2004).

Para Felgueiras e Câmara (2004), as redes (ou grades) irregulares triangulares não apresentam regularidades na distribuição espacial dos vértices das células do modelo; os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral; representam melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas; a estrutura de dados é mais complexa; é necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos, sendo assim, mais utilizados em aplicações quantitativas.

Nesse sentido, há muitas vantagens associadas ao uso das redes triangulares. Os dados de superfície de terreno podem se apresentar irregularmente distribuídos no espaço e as feições podem ser incorporadas ao modelo (KERSTING et al., 2004) como a inclusão de características lineares denominadas linhas de quebra, utilizadas para representar descontinuidades abruptas da superfície modelada. No caso de um TIN, os segmentos de uma linha de quebra formam os lados de dois triângulos adjacentes que não interceptam nenhuma outra linha (FAZAN et al., 2010). É desta forma que os vértices podem descrever feições nodais como depressões, picos ou caminhos; enquanto os lados podem representar feições lineares como quebras, cristas ou linhas de canais, por exemplo, em estudos que envolvem o relevo (KERSTING et al., 2004).

Em uma estrutura TIN também se pode utilizar um número bem menor de pontos para representar a superfície com o mesmo nível de acurácia de uma grade regular mais densa, mesmo sendo sua estrutura de dados e o uso de algoritmos muito mais complexos para a geração e para a extração de informações a partir dos modelos (FAZAN et al., 2010). Por isso, Gomes et al. (2007) afirmam ainda que a maioria dos métodos de interpolação produzem resultados semelhantes, mesmo que em dados irregularmente espaçados, onde tais métodos apresentam limitações na representação da variabilidade espacial, pelo fato de desconsiderarem a descontinuidade (anisotropia) dos atributos.

Neste contexto, Fazan et al. (2010) destacam que a representação TIN evita os erros de interpolação para uma grade regular quando a fonte de dados é constituída por uma malha irregular de pontos. Porém, como desvantagem deste modelo, Rosim et al. (2010) aponta a complexidade da sua estrutura de dados, exigindo algoritmos mais elaborados.

Em vista disso, cada método tem suas vantagens e desvantagens. A grade triangular, por exemplo, ajusta a espacialização dos dados e favorece cálculos de áreas e distâncias. No entanto, é inadequada para visualização 3D, por se tratar de uma estrutura que é adequada para representação onde ocorrem mudanças na suavidade do terreno ou na continuidade da superfície (GOMES et al., 2007). Mesmo assim, ao adotar a estrutura TIN a um sistema de informação geográfica, é possível criar diferentes mapas, embora estes mantenham uma marca da triangulação de Delaunay (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

Por isso, além dos métodos tradicionais de interpolação há os geoestatísticos, onde os dados referentes a parâmetros do solo possuem uma natureza multivariada, por tratarem-se de áreas com mudanças contínuas, gradativas e uniformes pelo terreno, mas sujeitas a diferentes manejos e tratamentos que podem influir na sua caracterização pela própria atividade agrícola. Esses métodos de interpolação geoestatísticos são a krigagem e a cokrigagem (MANZIONE, 2002).

3.3.2.2 Geoestatística

A geoestatística é um tópico da estatística aplicada que trata de problemas referentes às Variáveis Regionalizadas (VR), isto é, variáveis com condicionamento espacial, as quais tem características intermediárias entre as variáveis aleatórias e aquelas determinísticas (LANDIM, 2003). Deste modo, para Andriotti (2010), quase todas variáveis quantitativas trabalhadas em ciências da Terra podem ser consideradas VRs, como por exemplo o teor de um elemento químico de uma rocha, a precipitação anual de chuva em determinada região, a densidade populacional de um país, entre outras.

Guerra (1988) descreve a teoria das variáveis regionalizadas, na qual se baseia a geoestatística, como uma função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade, ou seja, são variáveis cujos valores são relacionados de algum modo com a posição espacial que ocupam.

Essa continuidade no espaço é representada por funções numéricas ordinárias que assumem um valor definido a cada ponto no espaço e que matematicamente descrevem um

fenômeno natural (LANDIM, 2003), ou seja, é um conjunto de métodos estatísticos apropriados para analisar um atributo de um fenômeno que tem distribuição contínua sobre uma área geográfica (VALENCIA et al., 2004).

Lamparelli et al. (2001) descrevem a geoestatística como um conjunto de técnicas que estimam valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de uma determinada área a ser estudada. Para Andriotti (2010) a geoestatística possibilita a quantificação dos erros cometidos nas avaliações, mesmo que não faça todo o tratamento de dados de forma integrada (é preciso parar no fim de cada etapa e selecionar, interpretar) e também não cria dados (apenas trata a informação disponível).

A geoestatística fornece inúmeras ferramentas de modo a se obter o melhor proveito da informação disponível (GUERRA, 1988), além de permitir estimar dados em locais não amostrados levando em conta o comportamento espacial do fenômeno, minimizando o erro dessa estimativa e podendo, com isso, reduzir os custos (CELINSKI, 2008).

Ao descrever o histórico da geoestatística, Guerra (1988) apresenta que esta foi concebida e idealizada por George Matheron entre 1957 e 1962, influenciada pelos trabalhos estatísticos da escola sul-africana realizados por Krige e Sichel nas minas de ouro do Rand entre 1947 e 1960, bem como aqueles de Wijs sobre jazidas uraníferas (1952-3), ambos na África do Sul.

O engenheiro francês Matheron, além de matemático probabilista, é considerado o pai da Geoestatística, pois foi o primeiro a utilizar este termo e a noção de variograma (ANDRIOTTI, 2010). Formalizou as informações sobre todo o conhecimento de seus predecessores e colaboradores geólogos e engenheiros de minas (GUERRA, 1988), determinando o método de interpolação que usa a dependência espacial entre as amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, o nome de krigagem (VIEIRA, 2000).

Este nome deriva do engenheiro sul-africano Daniel G. Krige, pioneiro em aplicar o método empiricamente em predições de reservas minerais na década de 1950 (VALENCIA et al., 2004). Krige (1951 apud VIEIRA, 2000), trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não havia sentido nas variâncias se não levasse em conta as distâncias entre as amostras.

Nesse sentido, cabe ressaltar em que contexto consolidou a geoestatística. A escola norte-americana se baseava na Estatística Clássica e suas variáveis independentes, procurando

chegar a um fenômeno sem correlação espacial, tratando-os isoladamente. Já a escola sul-africana admitia a existência de correlações espaciais e a influência dos tamanhos das amostras, além dos problemas de estimação, originando a Geoestatística. Posteriormente, tem-se a escola francesa, em que Matheron procurou integrar todo o conhecimento das escolas antecessoras, corrigindo seus problemas (ANDRIOTTI, 2010).

Para Celinski (2008) o que difere entre a estatística clássica e a geoestatística é que a primeira requer valores das amostras independentes da sua localização, enquanto que a geoestatística requer a localização espacial de cada ponto de amostragem. Por isso, a geoestatística se consolidou como um método para quantificar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo (VALENCIA et al., 2004). Além disso, é nas limitações da estatística clássica que a geoestatística tem suas maiores aplicações (VIEIRA, 2000).

Para Andriotti (2010) as vantagens da geoestatística sobre outras técnicas são o estudo da variabilidade espacial (pela análise de um variograma), a suavização, o desagrupamento (ou efeito de anular as concentrações localizadas de observações), a determinação da anisotropia (comportamento da variabilidade dos dados nas diferentes direções), a precisão (fornecida pela krigagem) e a incerteza (estimativa associada à margem de erro).

Primeiramente a geoestatística foi aplicada em estudos de mineração. Depois expandiu em estudos de geologia e hidrologia e, mais recentemente nas ciências do solo e em sensoriamento remoto (VIEIRA, 2000). Desta maneira, a geoestatística tem gerado inúmeras aplicações e estudos sobre a distribuição espacial, principalmente em aplicações da agricultura de precisão (VALENCIA et al., 2004).

É nesse sentido que constitui também uma ferramenta para decisão no manejo de solo e água das culturas, pois a modelagem geoespacial permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial dos atributos do solo e a estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores desses atributos em locais não amostrados (BOLFE; GOMES, 2005). Dessa forma, os métodos geoestatísticos surgiram para fundir o aspecto espacial (topológico) e o aspecto aleatório (probabilístico), uma vez que levam em conta as correlações espaciais entre as amostras, bem como a aleatoriedade representada pelas variações entre os pontos (GUERRA, 1988).

Assim, dentre os métodos de interpolação contidos em sistemas de informações geográficas, há os métodos de interpolação geoestatísticos, como a krigagem e a cokrigagem (MANZIONE, 2002).

3.3.2.2.1 Krigagem

A Krigagem (do francês *krigeage*, e do inglês *kriging*) é o termo cunhado pela escola francesa de geostatística em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano e pioneiro na aplicação de técnicas estatísticas em avaliação mineira, Daniel G. Krige (LANDIM, 2003), na qual trata de valores em locais não amostrados, fornecendo precisão sobre as áreas ou pontos a serem avaliados. Para Andriotti (2010), a krigagem considera o número de amostras utilizadas, as posições das amostras na área a ser avaliada, as distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada e a continuidade espacial da variável em estudo.

A krigagem também dá uma visão global da tendência, e sua vantagem sobre outros métodos de interpolação deve-se principalmente à análise prévia da continuidade espacial (VALENCIA et al., 2001). Além disso, Andriotti (2010) ressalta que a krigagem faz uma suavização das dispersões passando sempre pelos pontos amostrados. Manzione (2002) afirma que essa interpolação é essencialmente idêntica à regressão linear múltipla, com algumas diferenças quanto ao uso das matrizes utilizadas para resolver os sistemas. Molin et al. (2007) ainda destaca que a krigagem é um método que permite estimar um valor desconhecido associado a um ponto, área ou volume, a partir de um conjunto de n dados disponíveis.

Assim, o estimador da krigagem é do tipo BLUE (*best linear unbiased estimator*), que é considerado linear por ser formado por uma combinação linear de dados, ou seja:

$$Z_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \quad (1)$$

Onde λ_i são os ponderadores, $z(x_i)$ são os dados experimentais, n o número total desses dados e Z_k^* o estimador de krigagem, “*best*”. O asterisco utilizado é uma designação de estimador. Este é também não-enviesado (*unbiased*), ou seja, sem “*bias*”. Dessa forma, a krigagem é um estimador exato (ANDRIOTTI, 2010).

Nesse sentido, além de ser um estimador linear, a krigagem utiliza de médias móveis, que é a melhor estimativa para locais não amostrados, pois trata de um método de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e no tempo a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma (LANDIM, 2003) cujo produto é um mapa da área segundo um atributo, com estimativas não viciadas e de mínima variância (LAMPARELLI et al., 2001).

Essas médias móveis são pesos que variam de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma. O interpolador se torna ótimo pela maneira como esses pesos são distribuídos. Por isso, ele não pode ser tendencioso e deve ter variância mínima. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. Já a condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças pontuais entre o valor estimado e o medido, essas diferenças devem ser mínimas (MANZIONE, 2002).

Molin (2001, p. 67) ainda completa que:

a krigagem é um dos mais flexíveis e complexos métodos de interpolação e extrapolação de valores para quase todos os tipos de dados. Em termos gerais, a krigagem é o método mais recomendado. No entanto, com grande quantidade de dados pode se tornar um método bastante demorado. Sua utilização requer o tratamento preliminar dos dados através da geração de um modelo de variabilidade espacial denominado de semivariograma. Após a geração deste modelo, a interpolação é feita usando os mesmos princípios dos outros métodos.

Nesse sentido, cabe apresentar o conceito de semivariograma e sua diferença principal em relação ao variograma. O variograma vale o dobro do semivariograma. Enquanto a função $2\gamma(h)$ é chamada de variograma, a função $\gamma(h)$ é definida como semivariograma, o qual tem sempre valor positivo. A forma usual do semivariograma é a colocação dos valores de $\gamma(h)$ no eixo das ordenadas e a dos valores de h no eixo das abscissas, fazendo com que as duas origens, iguais a zero, se coincidam (ANDRIOTTI, 2010).

Por isso, conhecido o semivariograma da variável e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em qualquer posição no espaço, uma vez que estes métodos descrevem mais fielmente a variabilidade presente no solo. No caso, a krigagem, vem sendo utilizada para obtenção de mapas espaciais de parâmetros do solo, a partir de dados de amostragens (VIEIRA, 2000; MANZIONE, 2002). Vale ressaltar ainda que, para grandes conjuntos de dados de pontos amostrais, a diferença em eficiência de um método para outro será pequena (BOLFE; GOMES, 2005).

Entre os tipos de krigagem existentes, a mais utilizada é a Krigagem Ordinária (KO), que considera a média como desconhecida. Há também a Krigagem Simples (KS), que considera a média como conhecida, a Krigagem Universal (KU), utilizada em casos de ocorrer uma tendência nos dados, a Krigagem da Indicatriz, que possibilita a estimativa de incertezas e a probabilidade da presença de anomalia e a Cokrigagem, cujas variáveis podem

ser estimadas em conjunto a outras variáveis que tenham correlação espacial entre si (ANDRIOTTI, 2010).

É neste sentido que a geoestatística tem-se mostrado de grande utilidade para mapear a variação espacial dos solos. Bolfe e Gomes (2005, s/p) ainda descrevem que:

os métodos geoestatísticos de interpolação, em especial o da Krigagem, apresentam propriedades ótimas de estimativas em dados esparsos. (...) Esse processo é viabilizado pela implantação de um sistema de coordenadas locais ou geográficas, onde cada atributo ou característica do solo terá suas informações quantitativas e/ou qualitativas (relevo, granulometria, textura, teor de argila, acidez ou alcalinidade, níveis de salinidade e sodicidade, matéria orgânica etc.) associados a um ponto no espaço. Essas informações podem ser obtidas por meio de coleta in loco, mapas temáticos, imagens de satélite ou fotografias aéreas. Para referenciar essas informações utiliza-se o GPS, ou de forma mais simplificada através da topografia convencional, obtendo coordenadas locais.

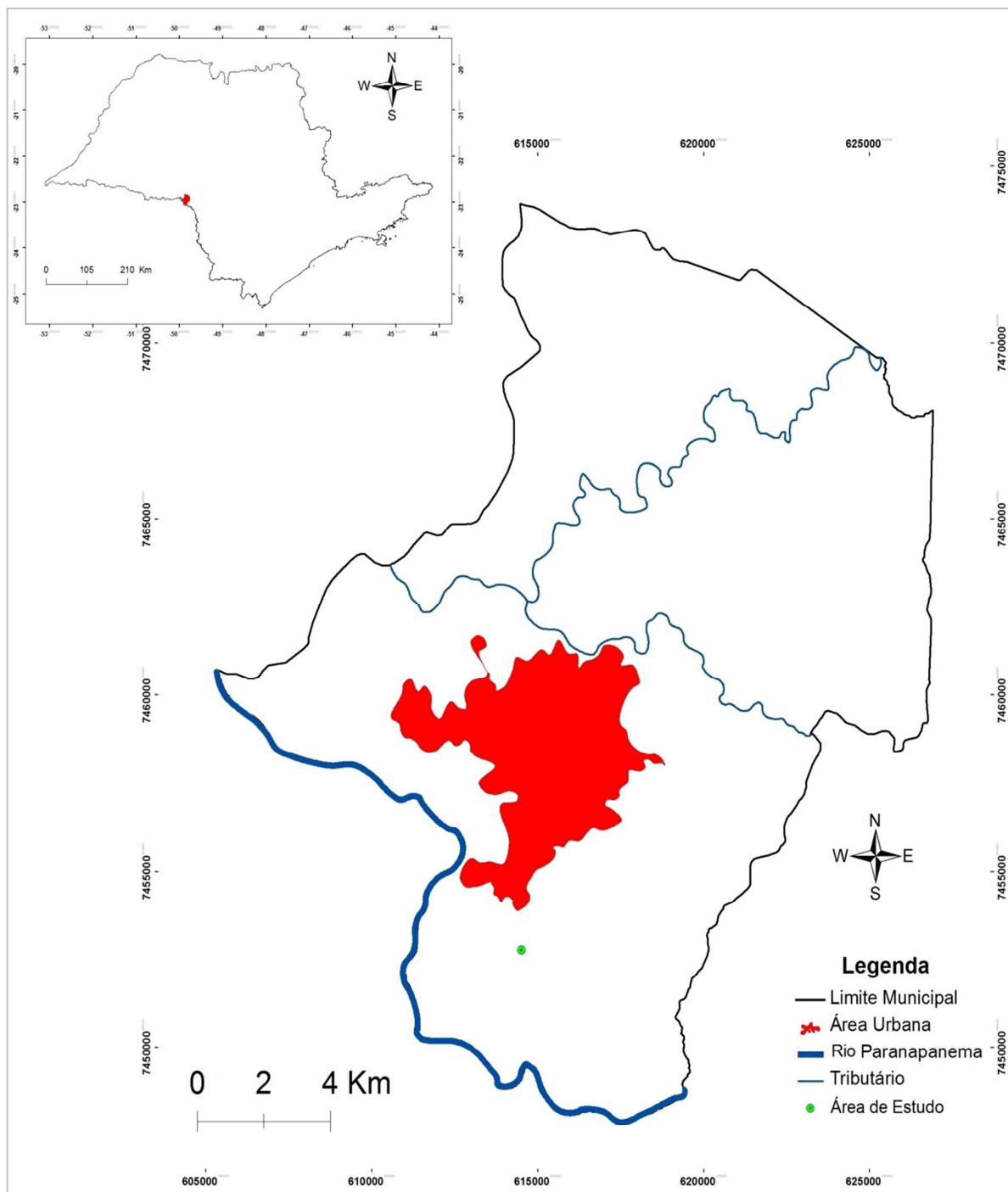
Os mesmos autores propõem utilizar os SIGs para processar e fornecer as informações da variabilidade espacial dos atributos do solo e suas interrelações com o meio, bem como de estimar o valor dos parâmetros nos locais não amostrados. Dessa forma, a utilização das tecnologias de informação geográficas através da geoestatística permite amparar tecnicamente decisões estratégicas e complexas em relação ao sistema de manejo adotado, além dos efeitos ambientais e produtivos nas culturas, contribuindo para o desenvolvimento de uma produção agrícola mais sustentável (BOLFE; GOMES, 2005).

4 MATERIAL E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende um campo de produção de grãos com 33,3 hectares em uma pequena propriedade familiar no município de Ourinhos, localizado a sudoeste do estado de São Paulo (Figura 1). Esta propriedade pertence ao Sr. Edezio Roberto Palermo.

Figura 1. Localização do município de Ourinhos no sudoeste do estado de São Paulo



Fonte: Elaboração da autora.

4.1.1 O município de Ourinhos

O município de Ourinhos surgiu no contexto do “pioneirismo agrícola”, impulsionado pela expansão cafeeira, originariamente com mão-de-obra de origem italiana. Com a implantação da Estrada de Ferro Alta Sorocabana intensificou seu povoamento nas décadas de 1930 e 1940, tornando-se a porta de entrada para o norte do Paraná. Com o processo de modernização e expansão da área urbana, a produção de café passa a ser substituída pela agroindústria canavieira, com incentivos fornecidos pelo governo federal, a qual tem como característica a concentração de terras, que afeta os pequenos e os médios produtores, expulsando-os do campo. Dessa forma, na década de 1950, há o aumento da urbanização, o êxodo rural, o desenvolvimento econômico, de equipamentos e serviços (AL ZAHER, 2012).

Ourinhos pertence à unidade geotectônica da Bacia Sedimentar do Paraná, Grupo São Bento, Formação Serra Geral (JKsg), caracterizado por derrames basálticos de coloração escura (IPT, 1981). De acordo com o Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo (ROSS; MOROZ, 1997), está localizado no Planalto Ocidental Paulista, apresentando relevo denudacional cujas formas dominantes são colinas amplas e baixas de topos convexos, aplanados ou tabulares, os quais predominam altitudes de 300 a 600m. Ao longo da extensão municipal encontram-se Latossolos Vermelhos (LV) Eutroféricos e Distroféricos A moderado, de textura média e argilosa (OLIVEIRA et al., 1999).

O município faz parte da 11ª Região Administrativa de Marília e é um dos 42 municípios integrantes do Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema (CBH-MP) – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI - 17), cujos tributários mais importantes são os da sub-bacia do Rio Turvo e Rio Pardo, que por sua vez é afluente do rio Paranapanema (AL ZAHER, 2012).

Desta forma, os Rios Paranapanema, Pardo e Turvo podem proporcionar um aumento na umidade relativa e no índice pluviométrico. Devido a topografia do município ser levemente acidentada, não gera grandes barreiras aos ventos. Localiza-se próxima ao Trópico de Capricórnio e apresenta um clima tropical úmido (classificação de Köppen), com precipitação média anual de 1405,3mm, sendo os meses mais chuvosos no verão e menos chuvosos no inverno, e a temperatura média do ar igual a 23,1°C, sendo os meses com temperaturas mais elevadas fevereiro e março, os meses com menores temperaturas junho e julho e o mês mais frio com temperatura média maior que 18,0°C (CARFAN, 2011; CEPAGRI, 2013). Além disso, nos meses de maio a julho há predominância de sistemas

frontais provenientes do extremo Sul da América do Sul, que provocam o declínio da temperatura e a baixa umidade. Já nos meses de setembro a março, com o aumento da radiação solar no Hemisfério Sul, há o aumento da temperatura e da evapotranspiração (CARFAN, 2011).

Sobre a vegetação, parte do sudoeste do Estado de São Paulo originalmente era coberto pela Floresta Estacional Semidecidual Submontana ou popularmente conhecida como Mata Atlântica de Interior (DAMASCENO, 2010). Essa formação florestal é caracterizada por ser mais seca que a atlântica e menos xeromorfa que o cerrado. Por isso, é também denominada de “floresta mesófila”, a qual está inserida dentro do bioma Mata Atlântica. A floresta estacional semidecidual foi o tipo florestal mais rápido e extensamente devastado no Estado de São Paulo. Atualmente, esse ecossistema está representado por pequenos fragmentos bastante isolados (GOMES et al., 2012).

No município de Ourinhos, o único remanescente dessa vegetação encontra-se no Parque Ecológico Municipal “Bióloga Tânia Mara Netto Silva”, com uma área de 10,96 hectares. Mesmo com as intervenções antrópicas, por estar inserida num contexto urbano, essa área guarda as características edáficas originais (DAMASCENO, 2010).

O município possui uma área de 296,269 km² e de acordo com a Contagem Populacional feita pelo IBGE em 2010, Ourinhos possui uma população de 103.035 habitantes, sendo na área rural aproximadamente 2.661 pessoas (IBGE, 2013).

A produção agrícola do município é pautada principalmente nas lavouras de cana-de-açúcar, soja, trigo, milho, algodão e mandioca (AL ZAHER, 2012). Em 2011, verificou-se que a cana-de-açúcar ocupava mais de 50% do território municipal, sendo 16.750 hectares (IBGE, 2013). Nos imóveis rurais de Ourinhos predomina a economia familiar em que o produtor explora seu imóvel com mão-de-obra familiar e complementar e temporária no período de colheita (CATI, 2007).

4.1.1.1 A propriedade rural

A propriedade rural está localizada próximo ao Córrego do Jacu, que compõe a microbacia do Córrego Pinho – Água do Jacu e Mundo Novo, que envolve três bairros rurais e é considerada como uma única microbacia (AL ZAHER, 2012). Estes córregos deságuam no rio Paranapanema e apresentam visível estado de assoreamento ao longo dos afluentes e

nascentes desprotegidas, devido à falta de mata ciliar e manejo inadequado do solo (CATI, 2007).

Segundo a CATI (2007), os tipos de solos existentes nesta microbacia são 80% de Latossolo Roxo e 20 % de Litólicos, considerados de baixa fertilidade e acidez. Além disso, pouco resta da mata original, havendo apenas 60 hectares de Áreas de Preservação Permanente (APP) em 25 propriedades, sendo necessário recompor 55%.

A Microbacia do Pinho - Água do Jacu e Mundo Novo - abrange uma área total de 1.528,80 ha, representando 5,4 % da área total do município, composta por 81 pequenas propriedades, três médias e três grandes. Estes pequenos agricultores se dedicam à pecuária e à avicultura, além das culturas do milho, soja, cana e, em menor área, feijão, trigo, café e mandioca. Em épocas de safra, além da mão-de-obra familiar, recorrem ao trabalho assalariado (CATI, 2007).

A propriedade rural na qual está inserida a área de estudo também se enquadra na categoria de agricultura familiar. Esta área compreende um talhão de 33,3 hectares e encontra-se sob rotação de culturas de milho e soja há 20 anos, com a prática de sistema de plantio direto há 8 anos. Nesta propriedade, nunca foi feita correção do solo e nenhuma análise química ou física¹³.

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Materiais para coleta de amostras de solo

- Trado tipo “Holandês”;
- Sacos plásticos para coleta de solo;
- Caneta para identificação das amostras de solo;
- GPS de navegação Garmin (precisão aproximada de 4 metros).

4.2.2 Materiais para análise de pH

- Cachimbo para medidas de 10 cm³ de terra;
- Erlenmeyer de 250 ml;
- Medidor de pH Marte MB 10 - eletrodo combinado de vidro e de referência;
- Mesa agitadora;

¹³ Informação apresentada pelo Sr. Edezio Roberto Palermo, Ourinhos (SP), em entrevista concedida à Alice Nardoni Marteli, autora deste trabalho, em 15.12.2012.

- Soluções-tampão para pH 4,0 e 7,0;
- Solução de cloreto de cálcio $0,01\text{mol L}^{-1}$ com pH entre 5,0 e 5,5;
- Água deionizada (feita em laboratório).

4.2.3 Materiais para elaboração dos mapas

- Computador;
- *Software* CorelDRAW;
- *Software* Excel do pacote Office 2010;
- Sistema de Informação Geográfica IDRISI (Eastman, 1998) versão Taiga.

4.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.3.1 Procedimentos preliminares

Antes de realizar as coletas de amostras de solo, foi feita uma visita de campo para definição dos pontos por meio do uso do GPS de navegação Garmin. Com as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) coletadas em campo foi feita a georreferência do mosaico de imagens (que foram baixadas em alta resolução a partir do Google Earth) no SIG Idrisi Taiga. Este mosaico foi elaborado no aplicativo CorelDRAW. Além disso, a área de estudo foi delimitada e recortada, também no SIG Idrisi Taiga.

O Idrisi é um aplicativo criado na Universidade de Clark, Massachusetts, EUA, que tem como principal desenvolvedor, o Doutor J. Ronald Eastman. O nome Idrisi é uma homenagem ao cartógrafo e geógrafo Abu Abd Allah Muhammed al-Idrisi, que nasceu no ano de 1099 d.C. na colônia espanhola de Ceuta, ao norte da África (hoje Marrocos). A primeira versão do SIG Idrisi surgiu em 1987, em uma parceria com a Organização das Nações Unidas - ONU (PIROLI, 2010). Este sistema vem sendo usado em cerca de 120 países em órgãos públicos, no planejamento local, como fonte de gerenciamento e em instituições educacionais (EASTMAN, 1998).

Pirolí (2010) descreve o Idrisi como um Sistema de Informações Geográficas que conta com um banco de dados capaz de capturar (adquirir), armazenar, recuperar e manipular informações digitais, georreferenciadas, provenientes de imagens, mapas e modelos numéricos do terreno e de efetuar análises geográficas e gerar a saída de dados na forma de mapas, gráficos e tabelas. Além disso, o Idrisi é líder na funcionalidade analítica *raster*, cobrindo todas as necessidades de SIG e de sensoriamento remoto, desde a consulta a banco de dados e modelagem espacial até realce e classificação de imagens (EASTMAN, 1998).

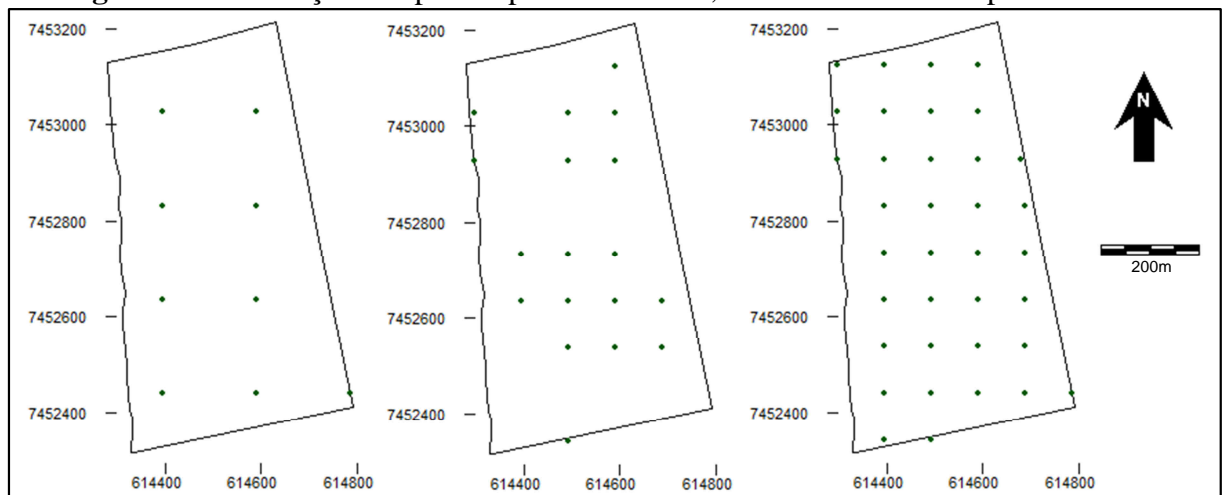
Apesar da natureza altamente sofisticada destas funções, este aplicativo é muito utilizado atualmente, tendo em vista sua relação custo-benefício, preço bastante acessível, fácil manipulação e interação com o usuário (PIROLI, 2010; EASTMAN, 1998). Por isso, vários são os métodos recomendados para identificar, caracterizar e entender a variabilidade dos atributos dos solos. O procedimento que tem sido o mais utilizado para a amostragem dos solos é o estabelecimento de grades (*grid*) espaçadas regularmente no campo. Quanto às dimensões das malhas (o espaçamento), pode variar em função da resolução desejada (precisão) associada aos custos (COELHO, 2008).

É por isso que esta pesquisa propõe analisar três distribuições de pontos amostrais distintos (9, 18 e 36 pontos), com três tipos de interpoladores para cada distribuição amostral. Os interpoladores aqui usados serão o TREND, o TIN e a Krigagem.

Para tal, foi necessário criar uma malha de pontos anteriormente à coleta de solo, para fornecer as coordenadas dos pontos onde seriam realizadas as coletas no campo. O procedimento foi realizado no menu *Image Processing*, em *Accuracy Assessment – SAMPLE*, do Idrisi Taiga.

Nesta distribuição, adotou-se a forma não aleatória para criação dos pontos, a partir da opção *Systematic*. Em função do formato da área de estudo, foi gerado um número maior de pontos de forma que à área de interesse fossem sobrepostos os 36 pontos. Para criação dos 9 e 18 pontos, estes seguiram a base criada pelos 36 pontos, de modo que as coordenadas para as coletas fossem as mesmas para não interferir nos valores das amostras de pH quando interpoladas (Figura 2).

Figura 2. Distribuição dos pontos para coleta de 9, 18 e 36 amostras respectivamente



Fonte: Elaboração da autora.

Em seguida, foram anotadas as coordenadas UTM destes pontos gerados para serem usadas no momento das amostragens de solo. Nesse sentido, Valencia et al. (2004) ressaltam a importância desse procedimento, onde a amostragem de solo quando coletadas em posições definidas por uma grade de amostragem e georreferenciadas por um GPS é fundamental para a agricultura de precisão, pois as análises de laboratório fornecem informações sobre as propriedades químicas e físicas relativas a cada posição amostrada, podendo estes dados serem analisados espacialmente usando as ferramentas de um SIG.

Assim, também foi necessário aguardar o momento da colheita do milho safrinha cultivado na propriedade estudada.

4.3.2 Procedimentos metodológicos para coleta de amostras de solo

Os pontos para as coletas das amostras de solo foram encontrados no campo com o auxílio do GPS de navegação Garmin, com precisão em torno de 4 metros, no sistema de referência SIRGAS 2000. As amostras compostas foram coletadas de acordo com a metodologia de Raij et al. (1997), a qual descreve que o trado deve ser introduzido até a profundidade de 20 cm, o que representa uma porção de solo na profundidade de 0-20 cm, a chamada camada arável (Figura 3).

Retirada a porção de terra simples, no ponto previamente localizado com o auxílio do GPS, foram coletadas outras duas porções próximas ao ponto para formar as amostras compostas, as quais foram colocadas em sacos plásticos limpos, identificadas e levadas ao Laboratório de Pedologia, Geologia e Geomorfologia da UNESP, campus de Ourinhos para serem analisadas. Vale ressaltar que este tipo de amostragem é recomendado para culturas anuais, perenes e em cultivo sob plantio direto.

Figura 3. Coleta de amostras de solo em campo



Fonte: Elaboração da autora.

4.3.3 Procedimentos metodológicos para análise de pH

No laboratório, as amostras foram secas em estufa a 40°C, peneiradas e analisadas com base na metodologia de determinação do pH em cloreto de cálcio descritas por Raij et al. (2001). De acordo com este procedimento, 10 cm³ de terra devem ser transferidos para os frascos Erlenmeyer de 250 ml com o uso de um cachimbo e identificados de acordo com cada ponto de coleta. Em seguida, deve ser adicionado 25 ml da solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ deixando por 15 minutos em contato. Após decorrido esse tempo, a solução é agitada por 10 minutos na mesa agitadora a 220 rpm, permanecendo por 30 minutos em descanso para decantação.

Para fazer a leitura do pH, o medidor foi ajustado com as soluções-tampão de 4,0 e 7,0. Após o ajuste e com o término da decantação do solo, o eletrodo foi mergulhado, sem agitar, em cada solução (Figura 4). Desta forma, o pH foi lido e anotado em cada amostra. Vale ressaltar que o eletrodo foi limpo com água deionizada para cada repetição deste processo.

Figura 4. Leitura das amostras de pH do solo



Fonte: Elaboração da autora.

Além disso, para cada amostra de solo, foram feitas três análises de pH, pois a repetição é necessária para confiabilidade dos resultados. Após, foram feitas a média das repetições.

4.3.4 Procedimentos metodológicos para elaboração dos mapas

Com os valores das análises de pH, estes dados foram associados a cada ponto coletado, respectivamente. Desta forma, seguiu-se para as interpolações por TREND, TIN e Krigagem. No entanto, antes de iniciar a interpolação por TREND, foi necessário criar uma imagem de valor zero, conhecida por “fundo zero”. Esta foi criada no menu *Data Entry – Initial*. Em seguida, foi rasterizado o arquivo de pontos (vetor) sobre a imagem base criada, por meio do menu *Reformat – Rastervector*.

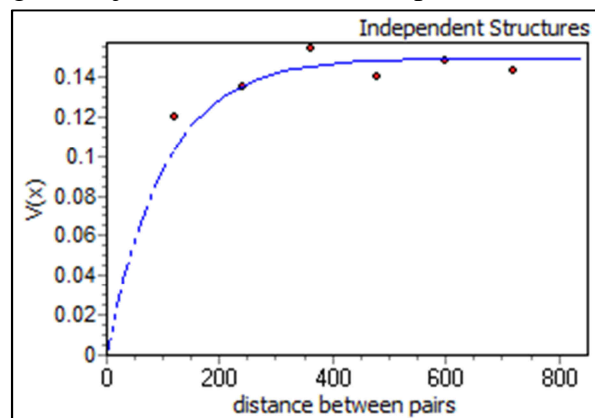
A análise de superfície de tendência foi feita utilizando-se o menu *Data Entry*, em *Surface Interpolation*, opção TREND. Neste procedimento, além do arquivo de pontos criado é necessário usar a imagem que foi rasterizada para que ocorra a interpolação.

A interpolação por redes irregulares triangulares, foi feita através do menu *Data Entry*, em *Surface Interpolation – TIN Interpolation*, opção TIN.

A Krigagem foi o processo mais demorado por ser constituído de três etapas. Esta foi realizada no menu *Data Entry*, em *Surface Interpolation – Kriging*. O primeiro passo foi feito em *Spatial Dependence Modeler*, onde as distâncias entre os pontos (*lags*) foram definidas e o semivariograma omnidirecional desenhado, com tolerância angular de 22,5°. Foram utilizadas seis *lags* em um espaçamento de 120 m.

O passo seguinte foi feito em *Model Fitting*, no qual o modelo foi ajustado conforme a equação que melhor se adequou. Neste caso, foi utilizado o modelo exponencial ajustado “a sentimento” (Figura 5). O efeito pepita evidencia a descontinuidade e é representado na origem da função, cujo valor foi 0,00. O alcance indica a partir de que distância os pares de pontos tornam-se independentes. Para estes dados de pH do solo o alcance foi de 100 m. O patamar refere-se ao valor em que ocorre a estabilidade no campo aleatório, o qual foi de 0,1495.

Figura 5. Semivariograma ajustado “a sentimento” para os dados de pH do solo



Fonte: Dados da pesquisa da autora.

O terceiro passo consistiu na interpolação, feita em *Kriging and Simulation*. Vale ressaltar que a krigagem feita foi a do tipo Ordinária.

Na krigagem não é necessário recortar a imagem criada na interpolação em relação a área de estudo, pois o terceiro passo já o faz. Esse procedimento, no entanto, foi realizado nos outros métodos. Para tal, foi usada a ferramenta OVERLAY no módulo *Database Query*. Já a reclassificação de valores foi necessária para todos interpoladores para transformar os diversos dados gerados em valores exatos. Esta foi feita no menu *GIS Analysis* no módulo

Database Query, em RECLASS. Após a reclassificação, foram acrescentadas as convenções cartográficas, finalizando o layout dos mapas¹⁴.

4.3.5 Procedimentos metodológicos para a comparação dos mapas

Para analisar os mapas de pH, estes foram reclassificados em intervalos pré-estabelecidos. A reclassificação adotada segue os parâmetros recomendados por Raij et al. (1997) na interpretação da acidez dos solos para valores obtidos de pH em CaCl₂ (Tabela 1), para amostras retiradas da camada arável de solo.

Tabela 1. Classes de pH do solo

Acidez	pH em CaCl₂
Muito Alta	Até 4,3
Alta	4,4 – 5,0
Média	5,1 – 5,5
Baixa	5,6 – 6,0
Muito Baixa	> 6,0

Fonte: Raij et al. (1997).

4.3.5.1 Procedimentos metodológicos para avaliação da exatidão dos mapas utilizando o Índice Kappa e a Exatidão Global

Avaliar a qualidade das classificações e comparar mapas temáticos são procedimentos fundamentais para conhecer a acurácia da informação produzida, pois evita interpretações de baixa confiabilidade em relação aos métodos utilizados. Dessa forma, para analisar a qualidade da classificação foram aplicados os Índices Kappa (K) e de Exatidão Global (EG), ambos extraídos da matriz de confusão (SILVA et al., 2011).

A matriz de confusão ou de erros é usada para avaliar o resultado de uma classificação. Para tal, ela compara os dados da verdade de campo com os da imagem classificada. Um subproduto desta matriz de confusão, que auxilia na avaliação do classificador é o coeficiente Kappa. Uma das vantagens alegadas para o uso do Kappa é que ele incorpora a informação dos pixels mal classificados, e não apenas dos bem classificados como a exatidão global (OLIVEIRA, 2003).

O índice Kappa de concordância testa a associação entre mapas e permite entender se os mapas diferem devido a alguma variação causal ou se há uma real concordância. Deste

¹⁴ Os mapas prontos serão apresentados no item “Resultados e Discussão”.

modo, permite também a comparação de dados com estruturas definidas (CARVALHO et al., 2001). Geralmente o índice Kappa consiste na última etapa de uma classificação, pois envolve a avaliação da exatidão do mapeamento. Tal avaliação pode ser feita através da geração de pontos aleatórios no mapa para serem verificados no campo (PIROLI, 2010). O índice Kappa varia de 0 a 1 (Tabela 2), onde 0 indica que os resultados acontecem totalmente ao acaso e 1 indica concordância perfeita (CARVALHO et al., 2001).

Tabela 2. Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa

Índice Kappa	Grau de concordância
< 0,00	Péssimo
0,01 – 0,20	Ruim
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Bom
0,61 – 0,80	Muito Bom
0,81 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977 apud SILVA et al., 2011).

Assim, enquanto o Kappa é um coeficiente que retira a parcela de colocação dos pixels, a exatidão global é um índice que estima a acurácia da classificação (OLIVEIRA, 2003), isto é, utiliza somente os elementos diagonais (concordância real). Desta maneira, a exatidão global é calculada dividindo a soma da diagonal principal da matriz de erros pelo número total de amostras coletadas (FIGUEIREDO; VIEIRA, 2007). Caso se queira apresentar os resultados em porcentagem, basta multiplicar por 100. Neste caso a exatidão global é dada pela fórmula estatística:

$$F_m = \frac{\sum X_i}{N} \times 100 \quad (2)$$

Onde, F_m é a exatidão global; X_i os elementos na diagonal principal da matriz (total de *pixels* classificados corretamente) e N o total de elementos amostrados, isto é o total de *pixels* da matriz (FERREIRA et al., 2007).

Foram criados 9 pontos de amostragem no Idrisi seguindo os mesmos procedimentos anteriores, tanto para geração de pontos, como para a coleta e análise do pH do solo. Em seguida, estes pontos amostrais foram relacionados aos identificadores de interpretação da acidez de solo descritas por Raij et al. (1997) em uma base de “fundo zero” criada, os quais foram rasterizados posteriormente.

Em *Image Processing – Accuracy Assessment*, ERRMAT, associou-se a base para o Kappa (com a verdade terrestre classificada) e a classificação dos mapas de categorias. Este procedimento foi feito para os três interpoladores, nos três espaçamentos amostrais¹⁵.

Desta forma, obteve-se a matriz de erro e a estatística Kappa, a qual foi devidamente comparada com a tabela de qualidade de classificação. Além disso, através da matriz de erro gerada, foi calculada a exatidão global. Este é um processo manual, que é feito para cada mapa isoladamente. Para tal, foram divididos os pixels totais da diagonal principal (classificação correta) pelo número total de pixels e, para melhor comparação, os resultados foram multiplicados por 100.

¹⁵ Exceto para krigagem de 9 e 18 pontos onde não ocorreu interpolação e conseqüentemente não pode-se reclassificar e finalizar os mapas. No entanto, isso será discutido nos “Resultados e Discussão”.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DE pH DO SOLO

Após as repetições feitas e as médias calculadas para cada amostra de solo, os valores do pH foram sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado das análises de pH do solo

9 pontos			18 pontos			36 pontos		
Coordenadas UTM X(m)	Y(m)	pH	Coordenadas UTM X(m)	Y(m)	pH	Coordenadas UTM X(m)	Y(m)	pH
614396	7453031	4,90	614591	7453128	4,86	614298	7453128	5,15
614591	7453031	4,29	614591	7453031	4,29	614396	7453128	5,32
614591	7452836	4,59	614493	7453031	4,96	614493	7453128	5,19
614591	7452641	5,31	614298	7453031	5,78	614591	7453128	4,86
614591	7452446	5,30	614298	7452933	4,67	614591	7453031	4,29
614786	7452446	4,92	614493	7452933	4,58	614493	7453031	4,96
614396	7452446	5,59	614591	7452933	4,84	614396	7453031	4,90
614396	7452641	4,95	614591	7452738	5,44	614298	7453031	5,78
614396	7452836	4,78	614493	7452738	5,85	614298	7452933	4,67
			614396	7452738	4,97	614396	7452933	4,57
			614396	7452641	4,95	614493	7452933	4,58
			614493	7452641	5,09	614591	7452933	4,84
			614591	7452641	5,31	614688	7452836	5,62
			614688	7452641	4,86	614396	7452836	4,78
			614688	7452543	5,43	614396	7452738	4,97
			614591	7452543	4,94	614396	7452641	4,95
			614493	7452543	4,82	614396	7452543	5,34
			614493	7452348	5,52	614396	7452446	5,59
						614396	7452348	5,49
						614493	7452348	5,52
						614493	7452446	4,89
						614493	7452543	4,82
						614493	7452641	5,09
						614493	7452738	5,85
						614493	7452836	4,60
						614679	7452933	4,66
						614688	7452738	5,15
						614688	7452641	4,86
						614688	7452543	5,43
						614688	7452446	4,93
						614786	7452446	4,92
						614591	7452446	5,30
						614591	7452543	4,94
						614591	7452641	5,31
						614591	7452738	5,44
						614591	7452836	4,59

Fonte: Dados da pesquisa da autora.

O pH do solo do talhão estudado variou de 4,29 a 5,85. Isso representa uma grande variação. No entanto, apenas um ponto revelou acidez muito alta. A maior parte das amostras de pH do solo apresentaram acidez alta e média, de acordo com a classificação de Raij et al. (1997), e poucas amostras revelaram acidez baixa. Como o pH ideal para fins agrícolas deve variar entre 5,5 a 6,5 (KIEHL, 1979), os resultados mostraram que pequenas manchas de solo se enquadrariam no ideal para a prática da agricultura. Estas manchas poderão ser observadas na espacialização obtida através dos resultados das interpolações e das reclassificações.

5.2 RESULTADOS DAS INTERPOLAÇÕES

Foram obtidos no total nove mapas¹⁶, em três espaçamentos diferentes utilizando três interpoladores distintos. Os espaçamentos foram com 9, 18 e 36 pontos amostrais. Os interpoladores utilizados foram o TREND, o TIN e a Krigagem.

5.2.1 TREND

A análise de superfície de tendência resultou em todos os espaçamentos, mapas mostrando a mesma direção tendenciosa: na porção Nordeste valores menores em relação à porção Sudoeste da área de estudo, com valores maiores. Desta forma, a tendência foi aumentando e diminuindo à medida que os valores de pH do solo aumentaram ou diminuíram.

Em determinadas áreas alguns valores de pH foram mascarados, uma vez que a análise de superfície de tendência raramente passa pelos pontos amostrados. Para que isso ocorra, devem-se ter poucos pontos e estes devem estar distribuídos em uma superfície extensa (BURROUGH; MCDONNELL, 2004).

Pelas interpolações obtidas, se observa que as análises de superfícies de tendências não representaram a variabilidade de pH do solo. Embora os limites dos dados de pH não apresentaram relativa variância entre os espaçamentos de coletas de 9, 18 e 36 pontos amostrais, as escalas geradas pelas interpolações não representam a variação das amostras obtidas, uma vez que nos três casos as escalas não tiveram em seus limites os dados de pH do solo obtidos pelas amostras de campo. Dessa forma, as escalas mostram a tendência gerada, o que valida que o método não foi satisfatório.

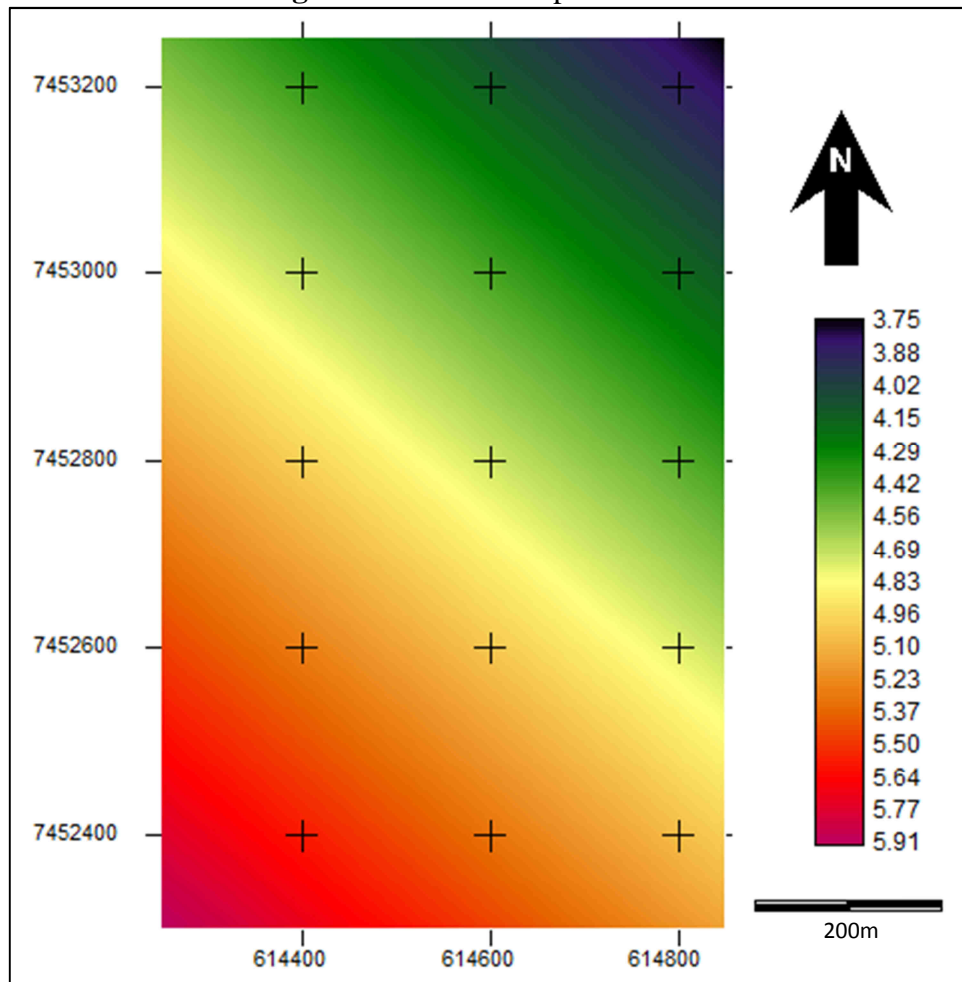
¹⁶ Exceto para krigagem de 9 e 18 pontos onde não ocorreu interpolação e conseqüentemente não pode-se reclassificar e finalizar os mapas.

Neste caso, o modelo negligenciou a variabilidade local. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de que a TREND é um método global de interpolação espacial que remove as características gerais dos dados, não sendo utilizado como interpolador local.

O resultado da interpolação por análise de superfície de tendência com 9 pontos amostrais (Figura 6) não foi satisfatório, não representou a variabilidade espacial, não considerou os dados e sim a tendência. Ao associar a interpolação aos pontos distribuídos espacialmente, verificou-se que o método TREND não passou pelos pontos amostrais, uma vez que os valores de pH dos pontos amostrados não coincidiram com os interpolados.

No entanto os valores obtidos pela interpolação por 9 pontos mostraram-se próximos aos limites dos dados de campo e seguiram o mesmo sentido da tendência.

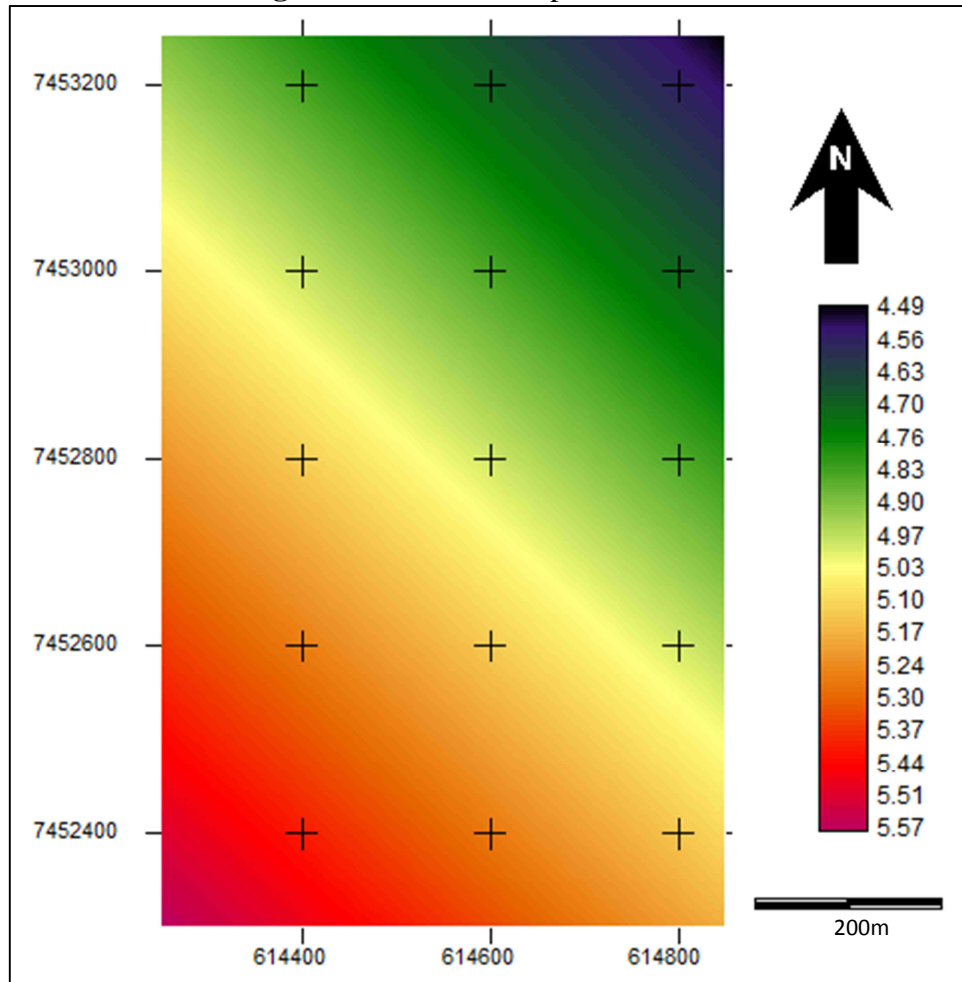
Figura 6. TREND - 9 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

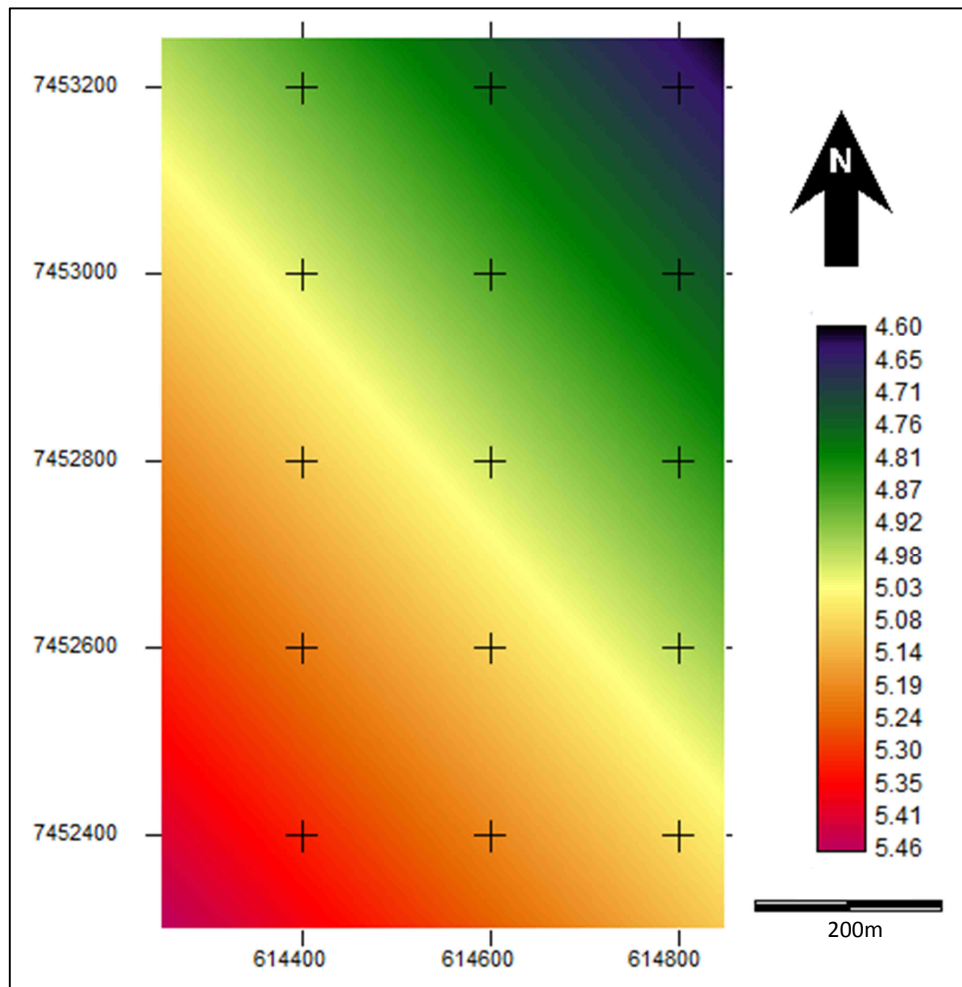
A interpolação por análise de superfície de tendência com 18 pontos (Figura 7) foi menos satisfatória que a de 9 pontos amostrais, uma vez que a tendência não considerou nem os limites dos dados obtidos em campo.

Figura 7. TREND - 18 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

A interpolação por análise de superfície de tendência com 36 pontos (Figura 8) também não apresentou resultado satisfatório, pois apesar de apresentar maior número de pontos (dados de pH distintos) distribuídos espacialmente, estes não foram considerados na tendência interpolada.

Figura 8. TREND - 36 pontos amostrais

Fonte: Elaboração da autora.

Assim, se pode inferir que em casos onde o número de dados amostrais seja baixo e a área a ser analisada tenha grandes dimensões, TREND pode ser uma opção para este tipo de interpolação. Já para casos onde o número de dados é maior e a área for de pequenas dimensões, este método não é indicado por não agregar informações na proporção do aumento dos dados amostrais.

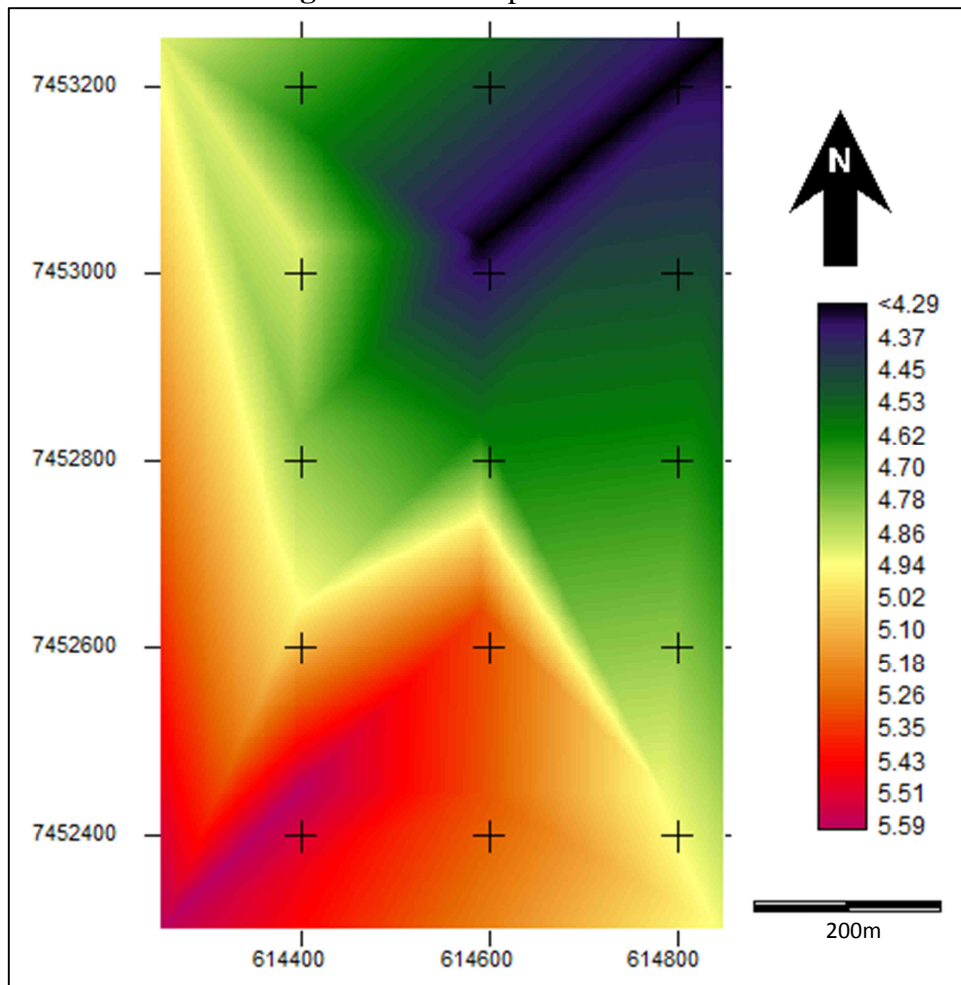
5.2.2 TIN

As redes irregulares triangulares mostraram uma melhor representação da variabilidade de pH do solo em relação à análise de superfície de tendência. As escalas foram fiéis aos dados obtidos em campo, isto é, a variação das escalas seguem a variação dos dados de pH do solo para cada conjunto de pontos amostrados. Por se tratar de um método matemático, é possível observar também que os pontos coletados em campo coincidem, em alguns pontos, com os eixos da triangulação.

Dessa forma, a interpolação por TIN apresenta os valores reais e próximos aos valores de pH do solo validando a precisão do método. Além disso, embora as superfícies representadas por TIN apresentaram contornos angulares, não devendo serem usadas quando se deseja um mapa com contornos suaves, as marcas da triangulação não impedem a análise e a acurácia dos mapas.

A interpolação por redes irregulares triangulares com 9 pontos (Figura 9) apresentou uma certa variabilidade com algumas restrições quando comparadas às outras interpolações com mais pontos. Estas restrições podem ter ocorrido devido a pouca quantidade de pontos de amostragem que apresentou menor variação das classes interpoladas, isto é, das manchas de solo. No entanto, a interpolação por redes irregulares triangulares com 9 pontos foi tão precisa aos dados de pH do solo quanto as demais.

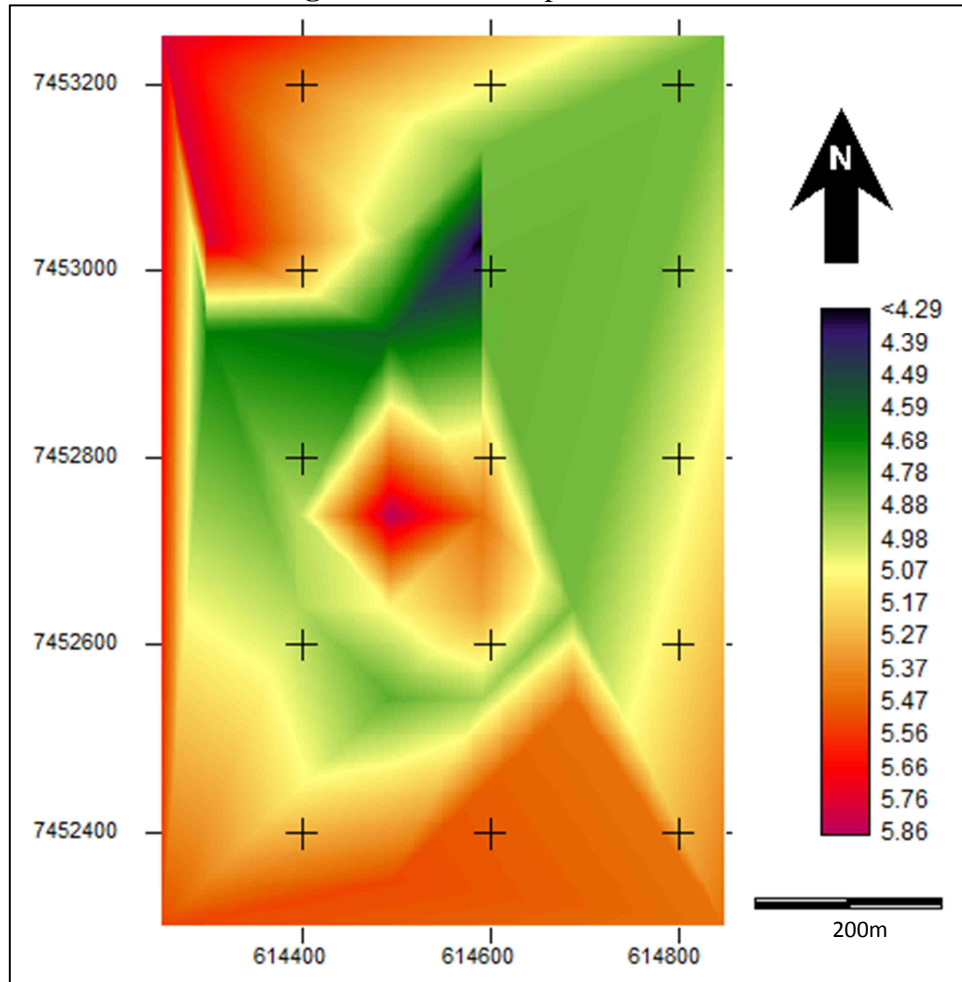
Figura 9. TIN - 9 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

Na interpolação por TIN com 18 pontos (Figura 10) foi possível observar maior variabilidade de pH no talhão, representada por manchas distribuídas espacialmente. Por mais que a malha de 18 pontos tenha sido um pouco irregular, a interpolação por este método apresentou um resultado bem semelhante ao de 36 pontos amostrais.

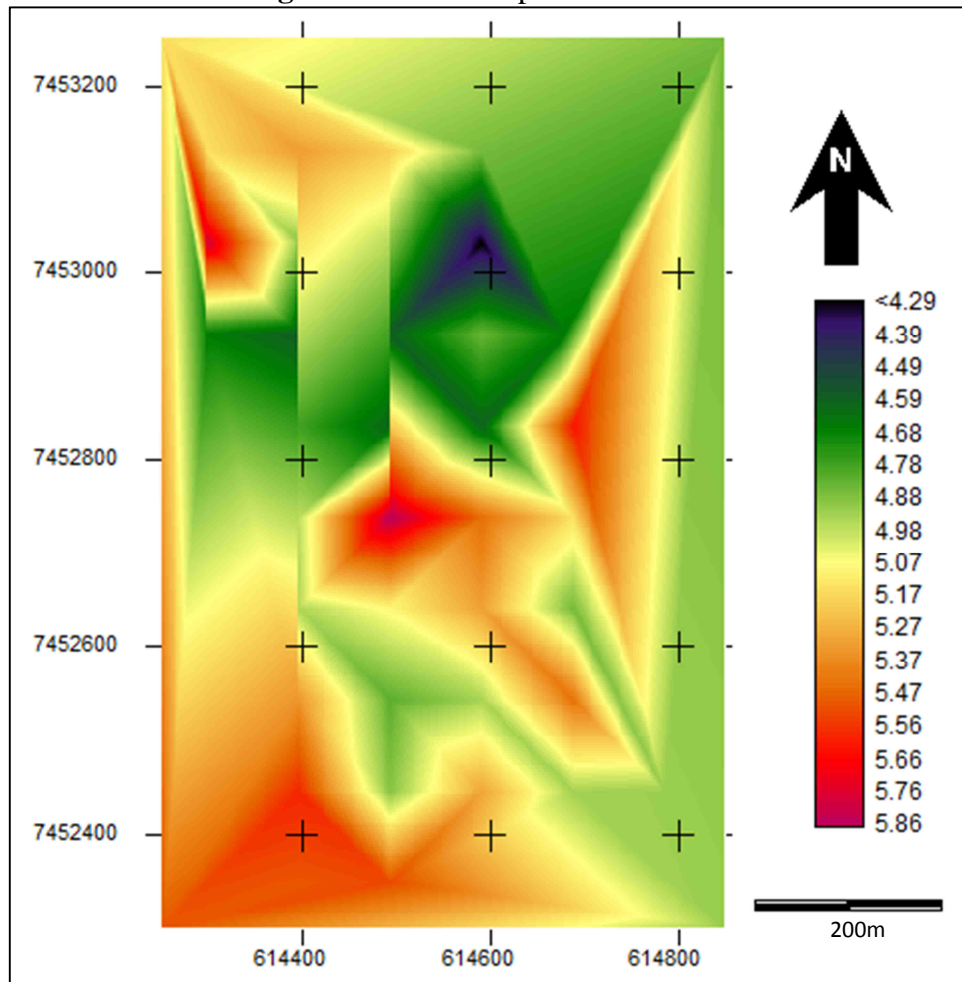
Figura 10. TIN - 18 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

Na interpolação por TIN com 36 pontos (Figura 11) o resultado é considerado satisfatório uma vez que as manchas apresentam maior variabilidade de pH do solo na área agrícola. Além disso, este resultado foi semelhante ao da krigagem com a mesma quantidade de pontos, em relação à distribuição espacial das manchas de pH.

Figura 11. TIN - 36 pontos amostrais



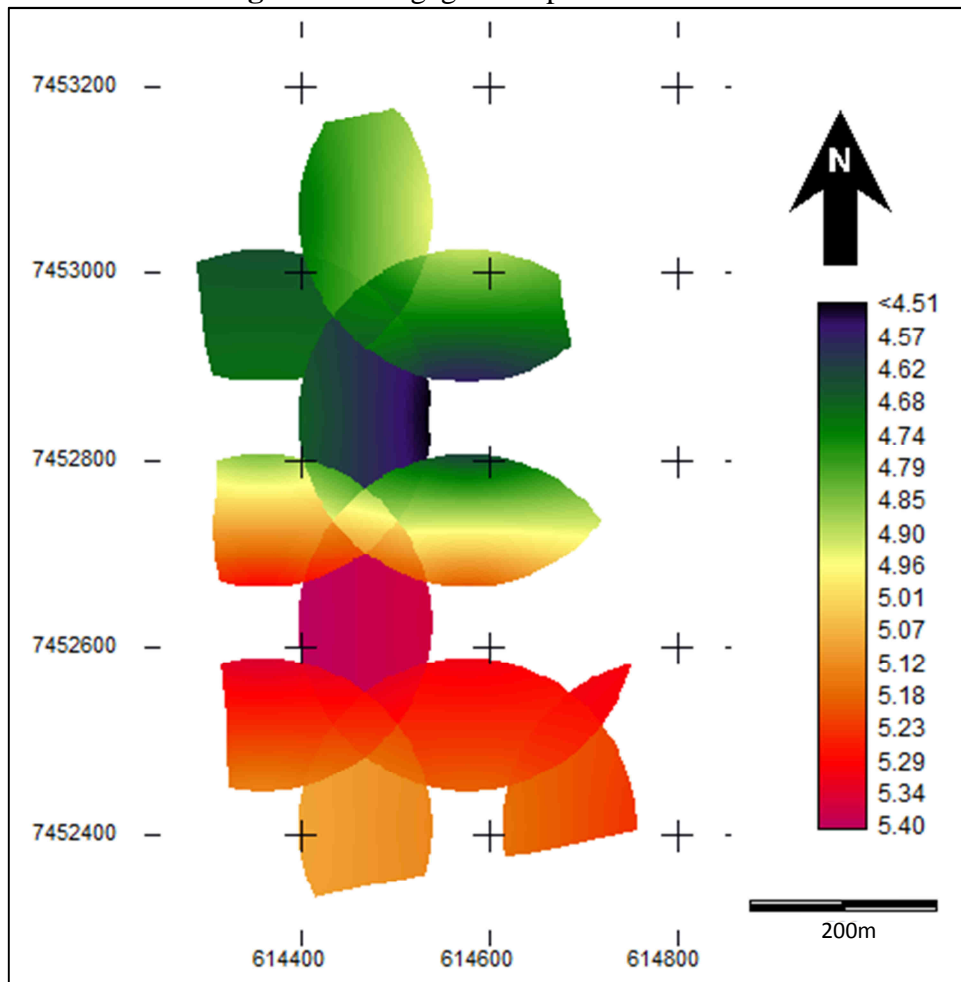
Fonte: Elaboração da autora.

5.2.3 Krigagem

O método da krigagem foi aplicado para todas densidades de pontos amostrais (9, 18 e 36), mas forneceu resultado adequado apenas para a interpolação de 36 pontos, uma vez que interpolações com poucos pontos não são satisfatórias e as distâncias entre as amostras é um dos fatores determinantes. Isso foi validado e pode ser observado pelos resultados obtidos.

Na interpolação por krigagem com 9 pontos amostrais (Figura 12) não foi possível determinar a variabilidade de pH do solo na área de estudo. Mesmo ao tentar aumentar as distâncias (*lags*) no processo de interpolação por krigagem, não foi possível obter resultado, isto é, não gerou interpolação. A escala também não foi satisfatória, pois variou de 4,51 a 5,40, não considerando a variação real dos dados amostrados para 9 pontos.

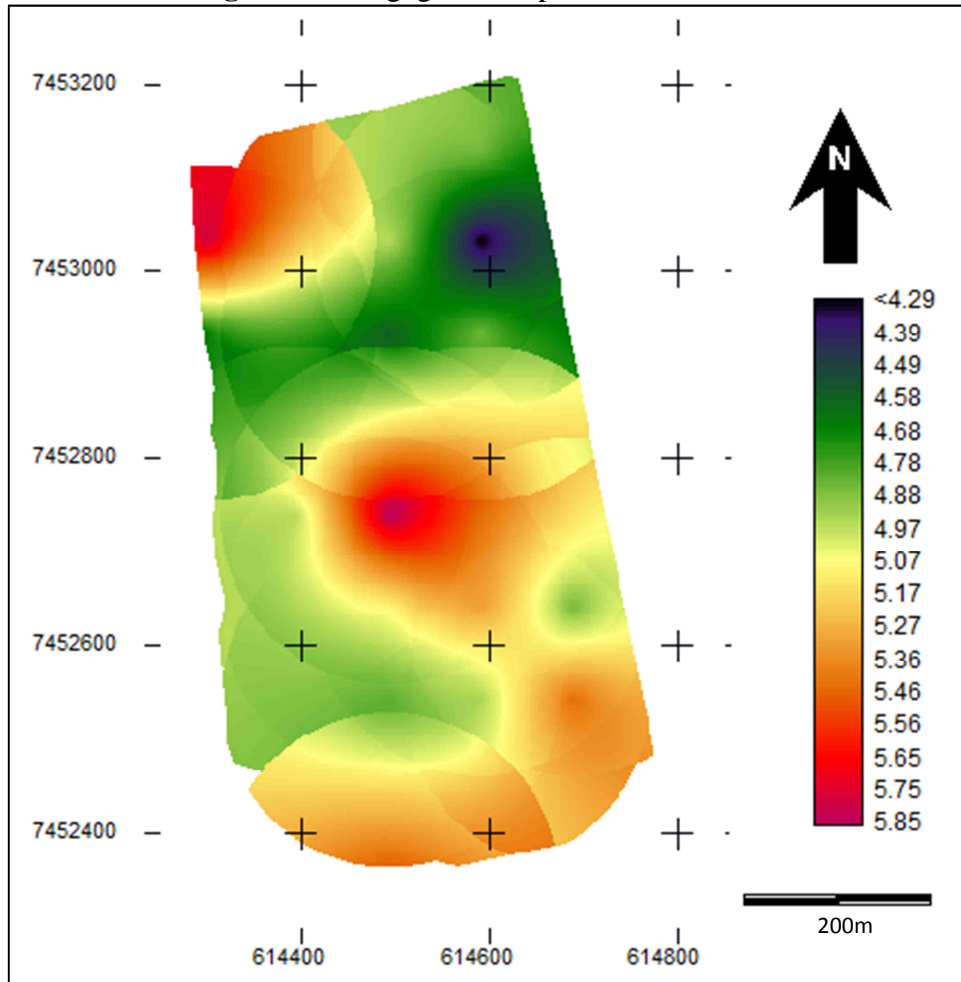
Figura 12. Krigagem - 9 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

Na interpolação por krigagem com 18 pontos (Figura 13) também não se obteve um bom resultado a ser comparado, pois notam-se as falhas da interpolação e não alcance de toda a área de estudo. No entanto, a escala apresentou-se satisfatória, pois sua variação considerou a variação real dos dados amostrados para 18 pontos.

Figura 13. Krigagem - 18 pontos amostrais

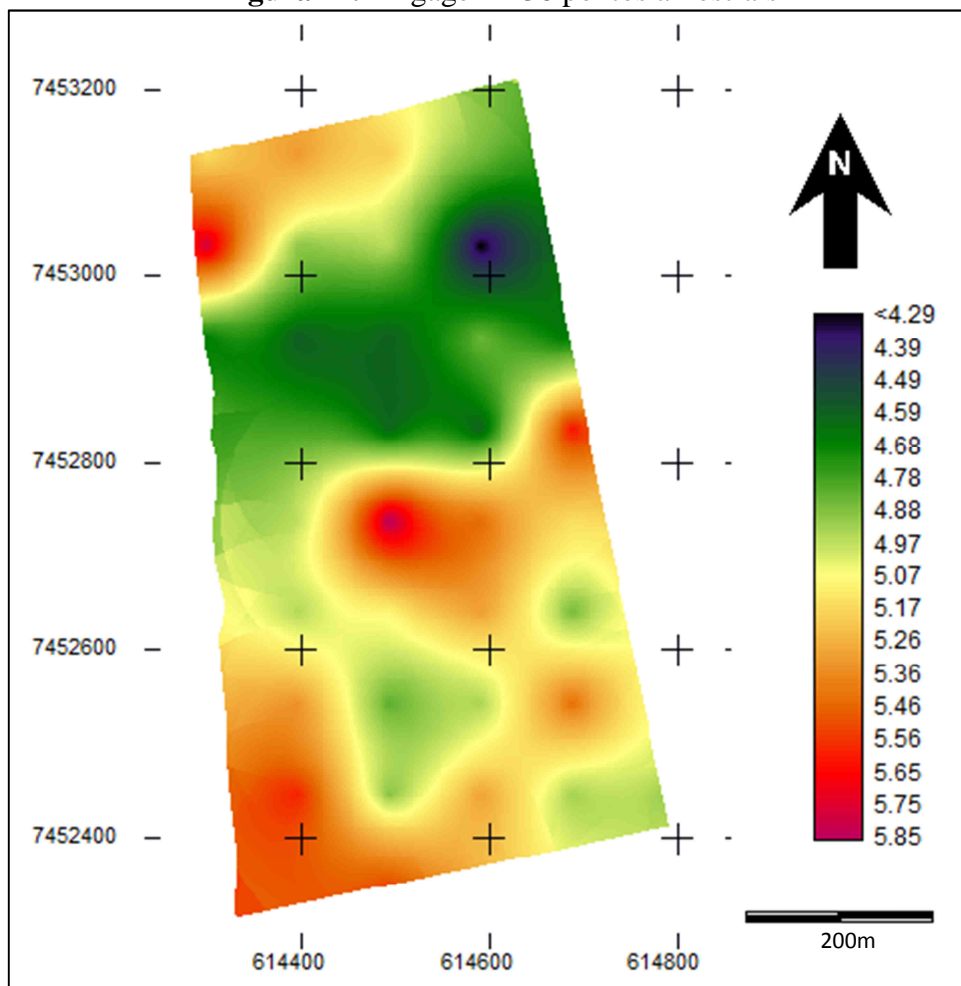


Fonte: Elaboração da autora.

Já a interpolação por krigagem com 36 pontos (Figura 14), feita a partir do semivariograma ajustado “a sentimento”, forneceu resultado satisfatório. A krigagem mostrou o melhor resultado frente aos demais métodos, quando realizado com 36 pontos de amostragem. Isso se deve a variabilidade espacial presente no método geoestatístico.

Além disso, a escala foi satisfatória, por coincidir com o intervalo das amostras de solo coletadas para o conjunto de 36 pontos; o resultado foi fiel aos dados de campo, uma vez que a interpolação sempre passa pelos pontos amostrados e, as manchas da variabilidade do solo foram suavizadas.

Figura 14. Krigagem - 36 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

Vale ressaltar que, pelas análises efetuadas, não há um método de interpolação melhor que o outro, cada um se ajusta melhor em cada situação de análise de dados.

5.3 MAPAS TEMÁTICOS DE pH DO SOLO

5.3.1 *TREND*

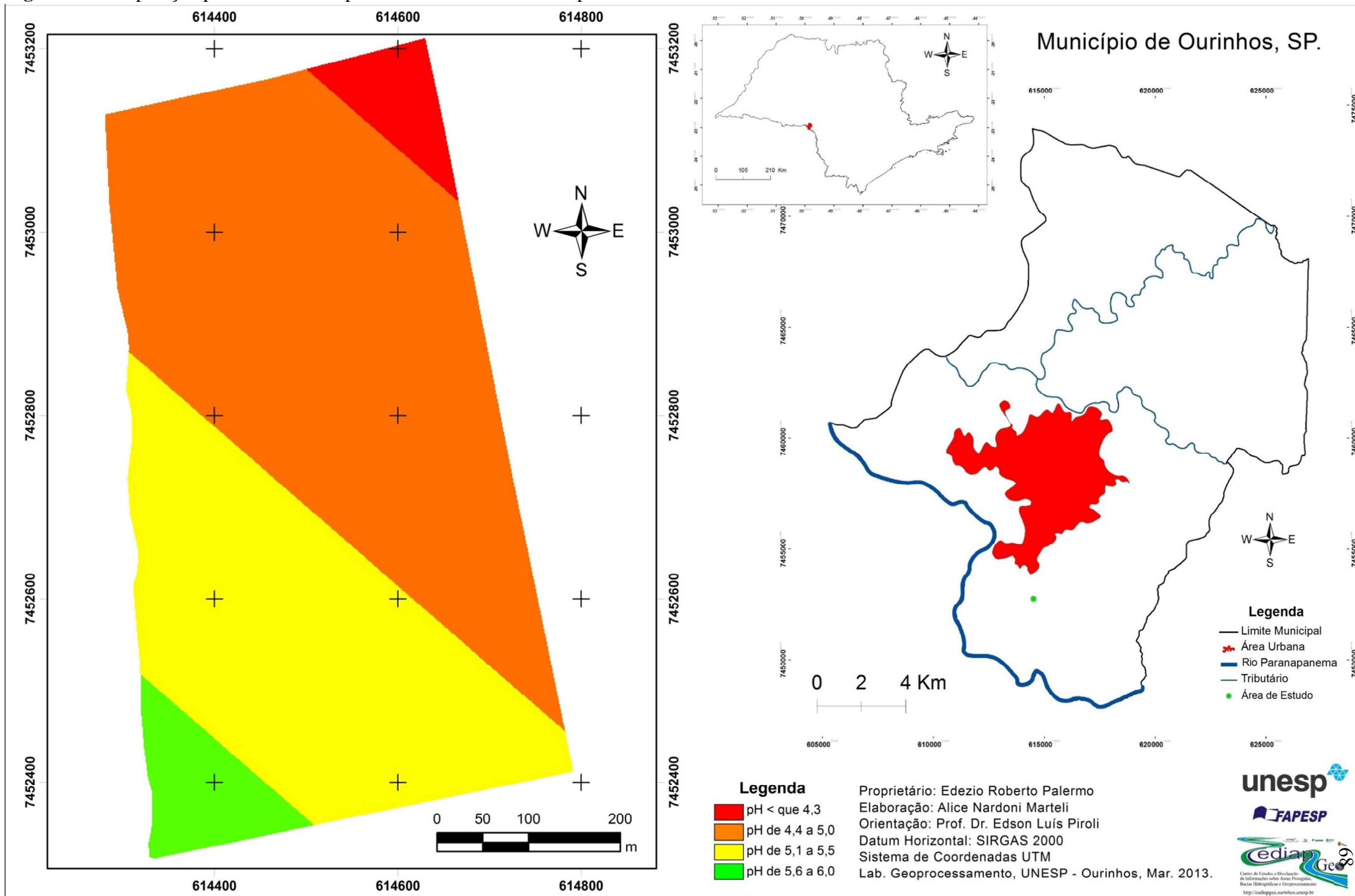
Para os três espaçamentos e quantidades de pontos amostrais, a Análise de Superfície de Tendência não foi satisfatória. Em todos os casos, esse método mascarou os resultados reais obtidos em campo. Porém, foi possível elaborar os mapas para validar os resultados.

A reclassificação da interpolação por análise de superfície de tendência com 9 pontos amostrais (Figura 15) mascarou ainda mais os resultados, pois seguiu a direção da tendência, e validou a informação de que o método raramente passa pelos pontos amostrais, uma vez que a interpolação e a reclassificação não coincidem com dados coletados em campo, apenas chegando a valores próximos.

A reclassificação da interpolação por análise de superfície de tendência com 18 pontos amostrais (Figura 16) não levou em conta os limites da variabilidade dos dados de pH do solo em campo e não considerou as reais classes de pH e sim a tendência criada pela interpolação, o que não representa a realidade.

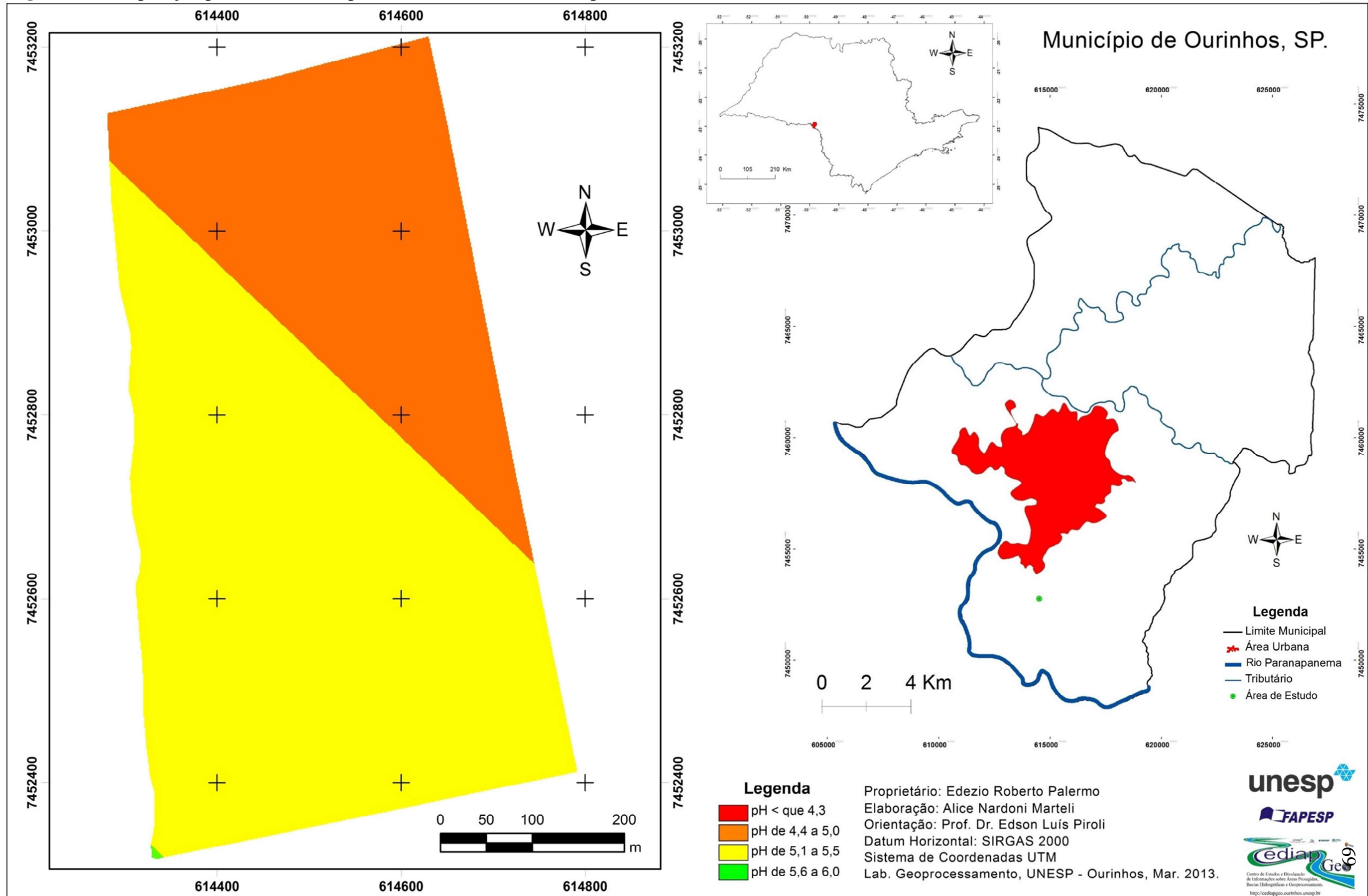
Na reclassificação da interpolação por análise de superfície de tendência com 36 pontos amostrais (Figura 17) esperava-se que, por ter mais pontos e maior variabilidade entre as amostras de solo, a interpolação e a reclassificação iriam apresentar mais classes distintas de pH do solo. No entanto, a reclassificação apresentou apenas duas classes. O maior número de dados para este interpolador foi desnecessário para analisar os resultados, uma vez que o mapa de 36 pontos foi semelhante ao de 18 pontos amostrais.

Figura 15. Interpolação por Análise de Superfície de Tendência com 9 pontos amostrais



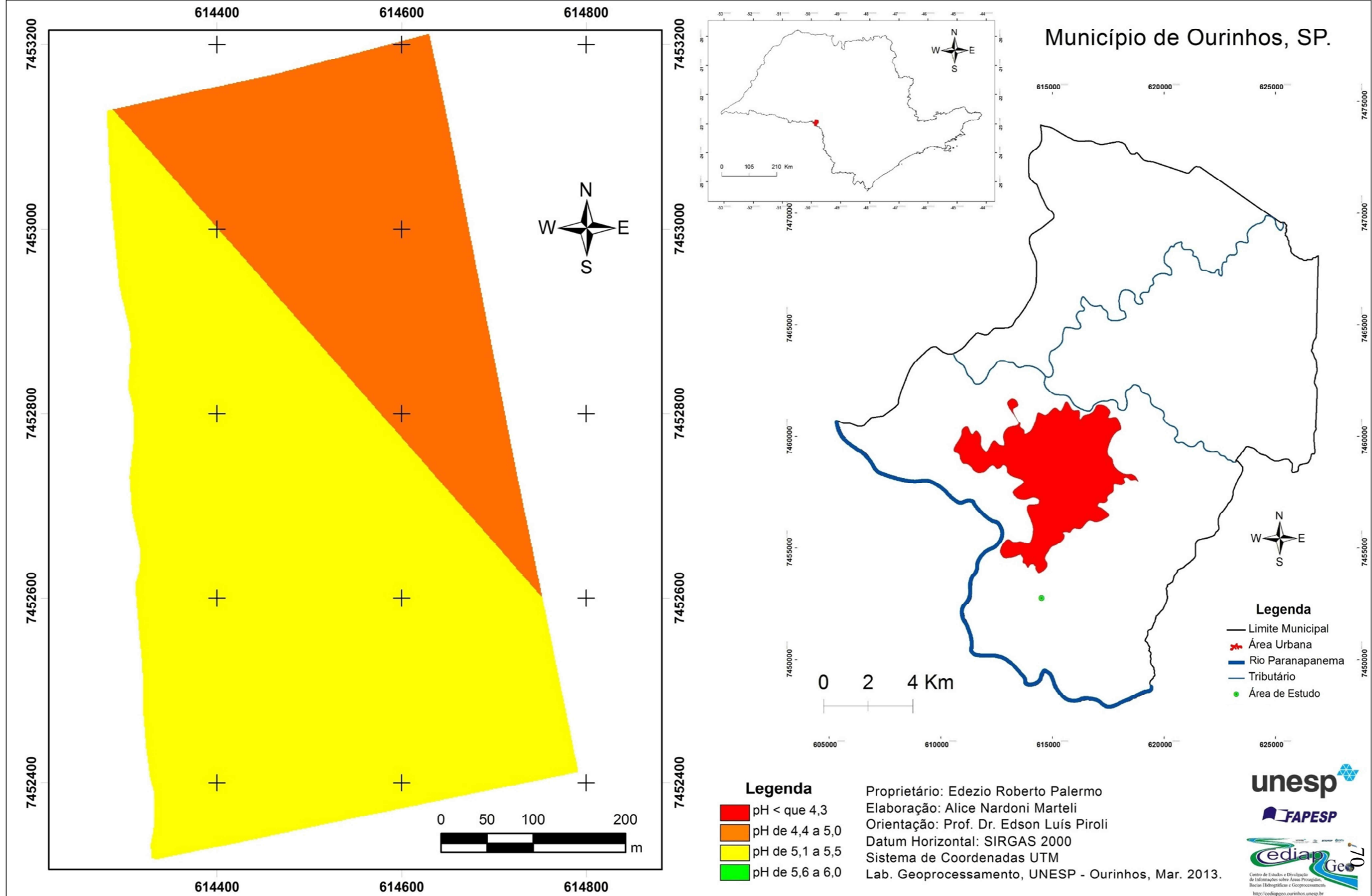
Fonte: Elaboração da autora.

Figura 16. Interpolação por Análise de Superfície de Tendência com 18 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

Figura 17. Interpolação por Análise de Superfície de Tendência com 36 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

5.3.2 TIN

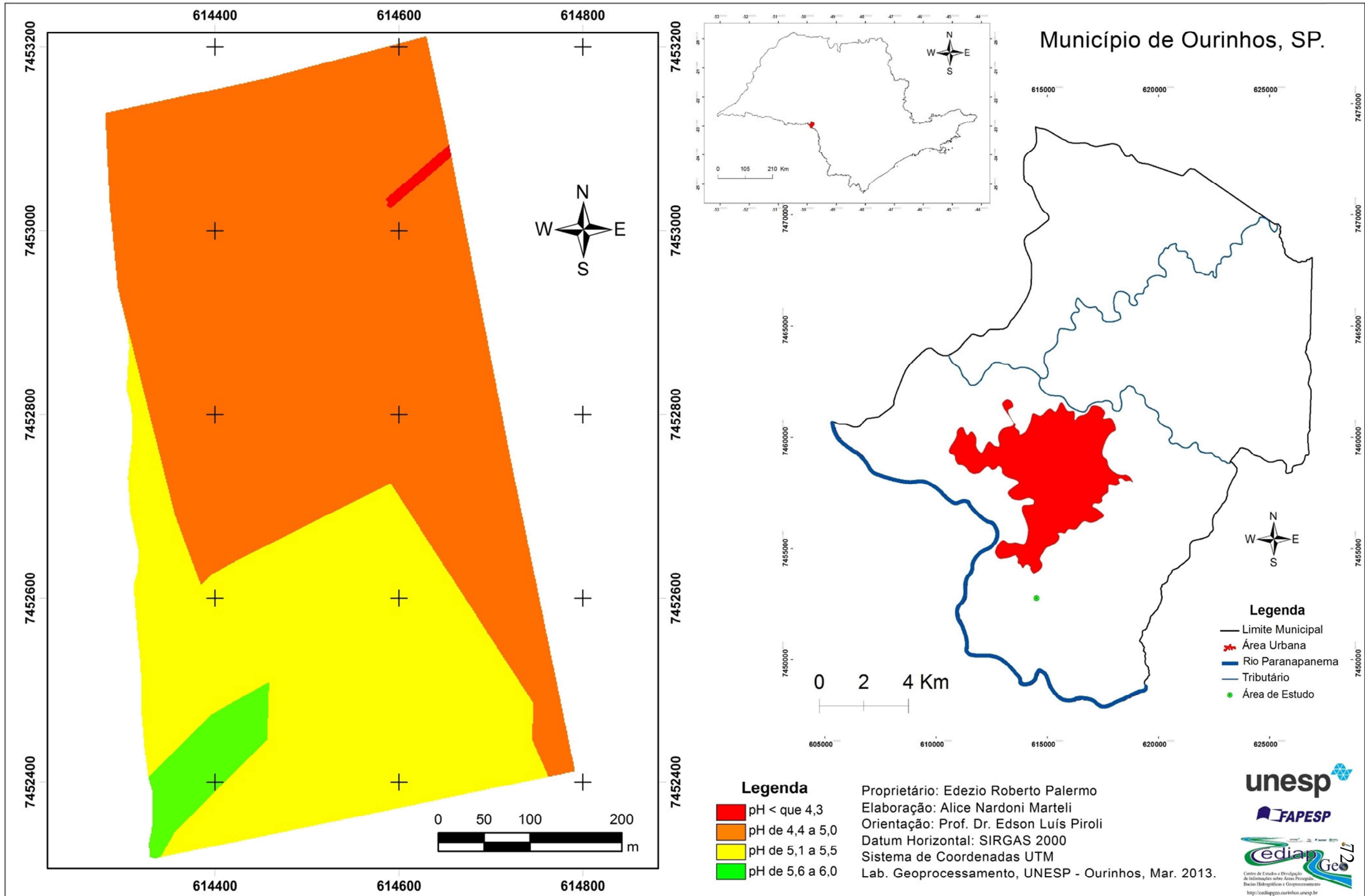
Para as três distribuições de pontos amostrais, as redes irregulares triangulares foram satisfatórias. Assim, foi possível reclassificar as interpolações para melhor compreensão dos resultados.

A reclassificação da interpolação por redes irregulares triangulares com 9 pontos (Figura 18) manteve-se fiel aos dados interpolados e aos pontos coletados em campo. Porém, a quantidade de amostras coletadas restringiu a análise da variabilidade do pH do solo a poucas manchas distribuídas espacialmente.

A reclassificação da interpolação por redes irregulares triangulares com 18 pontos (Figura 19) permitiu observar maior variabilidade de pH do solo no talhão, representada por mais manchas distribuídas espacialmente em relação ao mapa de 9 pontos amostrais.

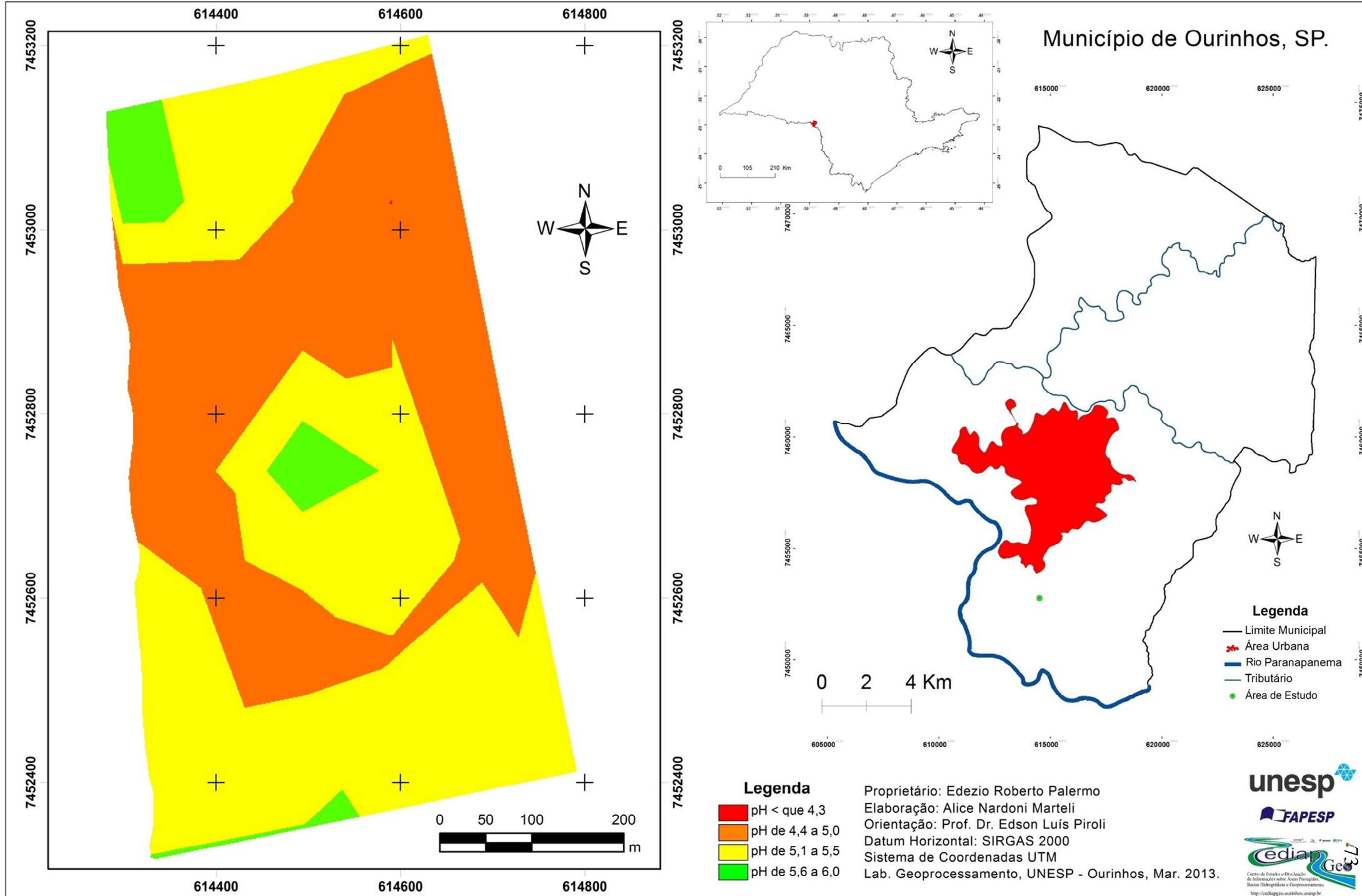
A reclassificação da interpolação por redes irregulares triangulares com 36 pontos (Figura 20) obteve melhor resultado. As manchas distribuídas espacialmente apresentaram a variabilidade de pH do solo na área agrícola de forma mais detalhada. No entanto, com menos pontos (mapa de 18 pontos amostrais) foi possível obter um resultado cartográfico semelhante. Além disso, independente da quantidade de pontos, a estrutura TIN representa a superfície com o mesmo nível de acurácia (FAZAN et al., 2010).

Figura 18. Interpolação por Redes Irregulares Triangulares com 9 pontos amostrais



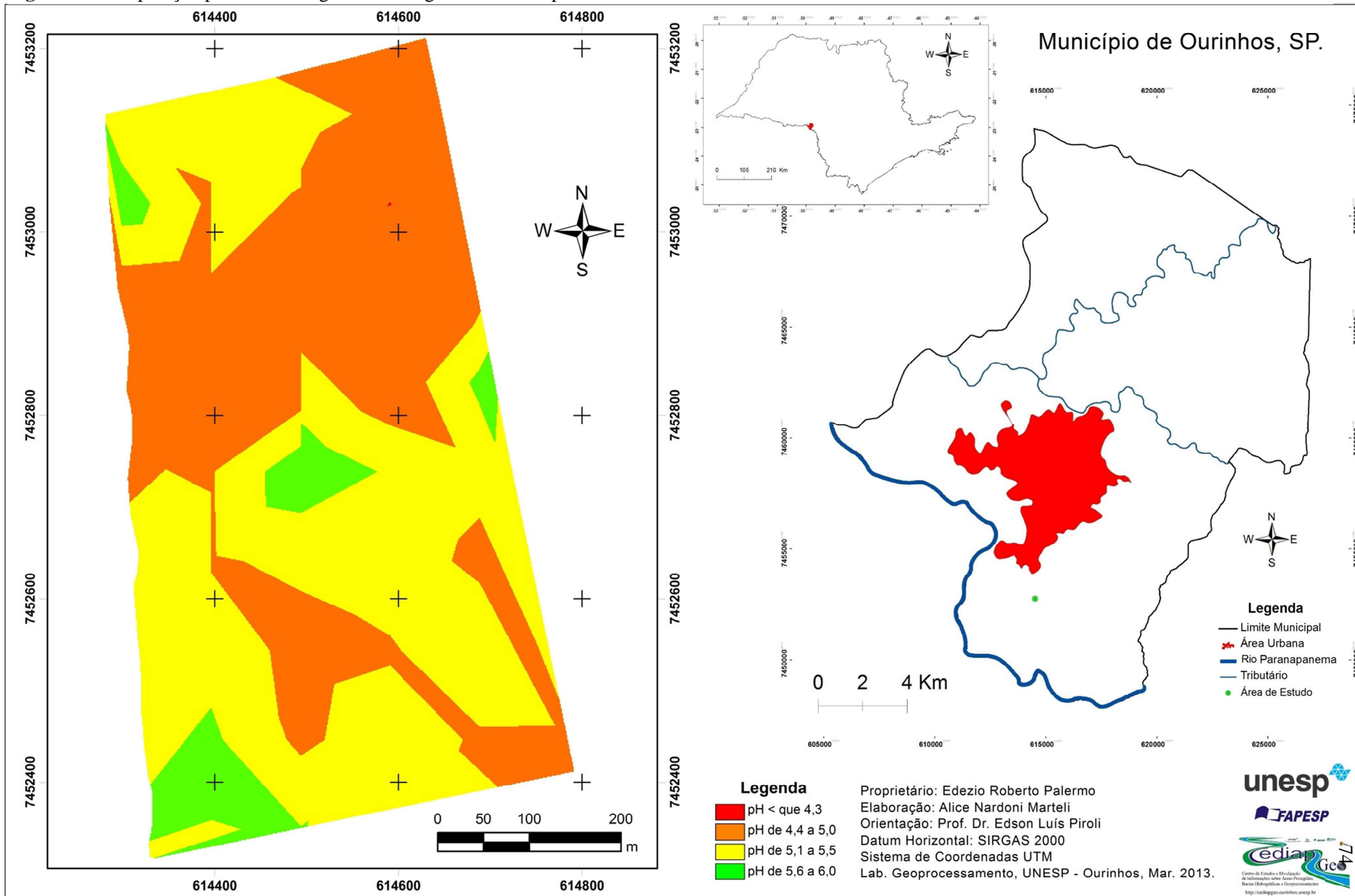
Fonte: Elaboração da autora.

Figura 19. Interpolação por Redes Irregulares Triangulares com 18 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

Figura 20. Interpolação por Redes Irregulares Triangulares com 36 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

5.3.3 Krigagem

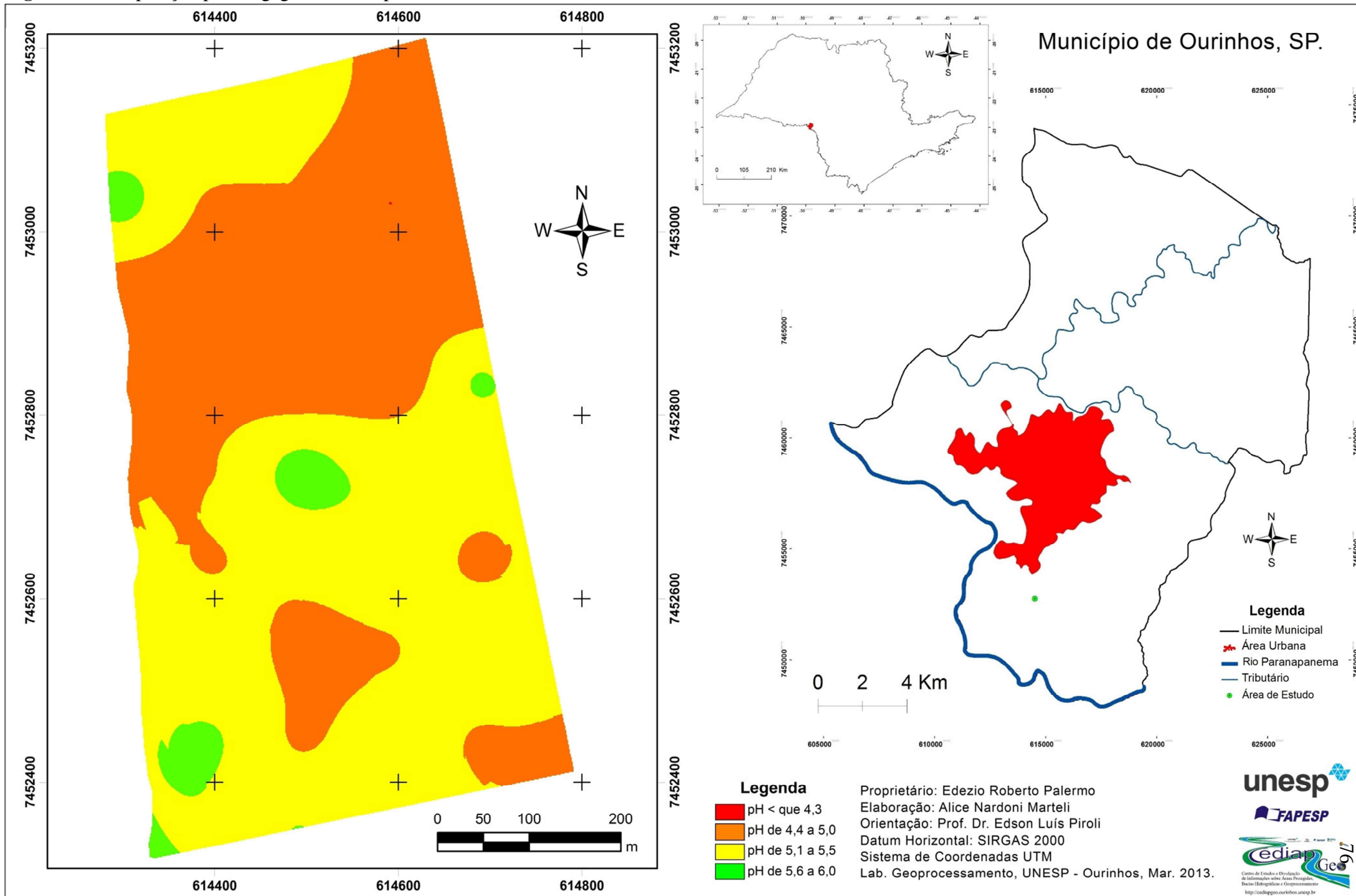
Entre as três distribuições de pontos amostrais, apenas aquela com 36 pontos possibilitou a geração da interpolação (Figura 21). Dessa forma, só houve um mapa como resultado da aplicação do método de krigagem.

Isso ocorreu devido o método da krigagem necessitar de um número maior de pontos para gerar resultados adequados. Por isso, pode-se afirmar que com menos de 30 pontos amostrais não é possível gerar interpolação (LANDIM, 2013b), mesmo que as distâncias (*lags*) exigidas pelo modelo sejam aumentadas.

Nesse sentido, quanto mais pontos, maior é a acurácia da interpolação por krigagem, desde que haja dependência espacial, pois as distâncias entre as amostras são um dos fatores importantes neste método. Assim, poucos pontos amostrados não gera um resultado confiável, uma vez que a krigagem passa sempre pelos pontos amostrados.

Além disso, a krigagem suavizou as manchas das classes de pH do solo, melhorando o caráter visual da interpretação e da variabilidade espacial. A krigagem também dá uma visão global da tendência, e sua vantagem sobre outros métodos de interpolação deve-se principalmente à análise prévia da continuidade espacial (VALENCIA et al., 2001).

Figura 21. Interpolação por Krigagem com 36 pontos amostrais



Fonte: Elaboração da autora.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DOS MAPAS PELO ÍNDICE KAPPA E A EXATIDÃO GLOBAL

Através de novas análises de amostragem de pH do solo (Tabela 4), foi possível obter os dados para a verdade terrestre. Estes foram usados como base para criar a matriz de confusão e, conseqüentemente, a estatística Kappa e a exatidão global.

Tabela 4. Verdade terrestre

Coordenadas UTM		pH
X (m)	Y (m)	
614359	7453063	4,64
614576	7453063	5,04
614576	7452845	4,47
614576	7452627	5,35
614576	7452409	5,14
614794	7452409	5,25
614359	7452409	5,07
614359	7452627	5,41
614359	7452845	4,72

Fonte: Dados da pesquisa da autora.

A partir dos resultados extraídos da matriz de confusão no Idrisi Taiga, foi possível analisar os mapas e avaliar a qualidade dos interpoladores e das classificações produzidas. As validações pelo índice Kappa e pela exatidão global apresentaram resultados semelhantes quanto à acurácia dos mapas (Tabela 5). No entanto, essas validações não coincidiram, em termos de representações cartográficas, aos resultados obtidos pelos interpoladores avaliados.

Os mapas obtidos por análise de superfície de tendência não apresentaram a variabilidade do pH do solo no campo, mas apresentaram um índice Kappa bom e muito bom e uma exatidão global de 77,7 (para 18 e 36 pontos de amostragem) e 88,8% (para 9 pontos de amostragem). Isso ocorreu devido ao fato de que as análises de superfícies de tendência apresentaram-se em grandes faixas na reclassificação e não em pequenas áreas com manchas homogêneas que representam, por sua vez, informações semelhantes. Isso se deu porque este método de interpolação dificilmente passa pelos pontos amostrais, não considerando todos os dados de campo ao resultado interpolado. Dessa forma, ao utilizar a estatística Kappa, estes resultados da interpolação coincidiram com os dados da verdade de campo e, conseqüentemente, a matriz de confusão avaliou essa tendência homogênea na área, validando os acertos pelo método da exatidão global.

Já os mapas de 18 e 36 pontos amostrais de TIN e o de krigagem foram satisfatórios em relação aos resultados espacializados, mas apresentaram Kappa razoável e exatidão global de 66,6%. Nestes casos, a variabilidade do pH do solo foi representada de forma fiel por ambos os interpoladores, mas não coincidiu com os dados da verdade de campo porque a probabilidade desses dados verdadeiros coincidir com os dados interpolados é menor, devido a maior precisão do TIN e da Krigagem em relação à TREND.

Tabela 5. Resultado do Índice Kappa e Exatidão Global

		Erro (%)	Kappa	Concordância	Exatidão Global (%)
9	TREND	0,1111	0,8000	Muito Bom	88,88
	TIN	0,2222	0,5909	Bom	77,77
18	TREND	0,2222	0,5714	Bom	77,77
	TIN	0,3333	0,3721	Razoável	66,66
36	TREND	0,2222	0,5714	Bom	77,77
	TIN	0,3333	0,4000	Razoável	66,66
	Krigagem	0,3333	0,4000	Razoável	66,66

Fonte: Dados da pesquisa da autora.

Não foi possível calcular o índice Kappa e a exatidão global para a interpolação por Krigagem com 9 e 18 pontos amostrais pois estas interpolações não foram realizadas.

Após as análises efetuadas, observou-se que a avaliação estatística dos interpoladores não demonstrou resultados satisfatórios da qualidade das classificações e interpolações realizadas, uma vez que os resultados obtidos apontam divergências entre os índices extraídos da matriz de confusão e a análise visual das interpolações espaciais. Neste caso, talvez seja necessário aumentar o número de amostras para o cálculo do índice Kappa e da exatidão global, para que a análise estatística da acurácia dos interpoladores seja melhor avaliada.

No entanto, alguns resultados das representações cartográficas das interpolações coincidiram com a verdade de campo, validando que estes mapas se adequaram aos resultados. Isto é observado em determinadas regiões interpoladas por TIN, onde os vértices dos triângulos representaram os pontos amostrais, e os lados destes triângulos representaram linearmente uma tendência gradativa (média) entre esses valores, o que valida que o método não altera os valores originais das amostras.

Por isso, recomenda-se usar o método que fornecer a resposta mais coerente com a verdade de campo, isto é, aquele que representar a variabilidade do pH do solo no campo, obtido através da análise dos produtos cartográficos. Neste caso, por mais relevantes que são os recursos geoestatísticos para análise da variabilidade espacial, das características físicas e

químicas do solo, o que melhor satisfaz os resultados, propostos por esta pesquisa, foi o modelo digital do terreno TIN.

A representação TIN é então um modelo que pode ser utilizado para trabalhos de mapeamento para agricultura de precisão, voltado ao atendimento de agricultores familiares, uma vez que é rápido de ser processado e fácil de ser compreendido. O modelo TIN também demonstrou que não necessita de grande quantidade de dados, o que diminui os custos. Além disso, embora as superfícies representadas pelas redes irregulares triangulares apresentaram contornos angulares, as marcas da triangulação não impedem a análise e a acurácia dos mapas.

Desta forma, vale ressaltar que não há um método melhor que o outro, cada um se ajusta melhor a cada situação. Ao aplicar o modelo TIN, embora necessite de um técnico especializado, não exige que este tenha conhecimento de tratamento geoestatístico para fazer as operações de mapeamento.

Além disso, ainda cabe ser destacado que atualmente não há um programa completo para trabalhos de agricultura de precisão. A escolha do SIG Idrisi foi devido ao fato deste ser de fácil manuseio. Entretanto, para a elaboração destes mapas há a necessidade de um técnico com conhecimentos de SIG's e Geoprocessamento. Por isso, é interessante pensar em outros programas que sejam mais acessíveis, como os *softwares* livres.

5.5 RECOMENDAÇÕES PARA MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DO SOLO PARA AGRICULTURA FAMILIAR

A partir das dificuldades encontradas, é preciso destacar algumas recomendações que auxiliem trabalhos futuros. Dentre estas dificuldades, o que merece maior destaque foi a elaboração das malhas de pontos amostrais e as coletas de amostras.

Para a elaboração de malhas, quando o objetivo for de comparar espaçamentos amostrais em modelos ou interpoladores, devem-se elaborar estas malhas com coordenadas geográficas em comum. Isso é necessário para que os valores da variável estudada, no caso o pH do solo, sejam os mesmos. Se os valores desta variável forem distintos entre as malhas de pontos amostrais, não há como realizar uma comparação precisa.

Neste sentido, vale esclarecer o porquê da grade de 18 pontos amostrais, apresentada na Figura 2, não ser tão regular quanto as de 9 e 36 pontos. As malhas elaboradas apresentavam distribuições espaciais regulares, no entanto, não apresentavam coordenadas

geográficas em comum. Além disso, durante as coletas desta pesquisa, houve dias de chuvas que impossibilitaram a continuidade das amostragens. E, após os dias chuvosos foi necessário aguardar alguns dias para realizar as coletas, uma vez que não há como coletar com trado tipo “Holandês” em solos muito úmidos e encharcados, devendo-se então aguardar o momento ideal.

Isso ocasionou variações nos resultados das amostras de pH do solo, que só foram observadas quando se realizaram as interpolações e verificou-se que não havia como comparar os mapas. Por não ter a possibilidade de coletar novamente e refazer todos os procedimentos de análise das amostras, foi necessário adequar e padronizar todas as amostras para os três espaçamentos.

Dessa forma, a malha de 36 pontos amostrais permaneceu como base para elaborar as demais e assim, padronizar os dados de pH. Para se obter a nova malha de 9 pontos foram retirados 27 pontos e, para se obter a nova malha de 18 pontos foram retirados 18, as quais foram representadas na figura de distribuição dos pontos de coletas (Figura 2).

Para criar essas novas malhas de pontos, seguiu-se a distribuição anterior, de modo que os pontos que permaneceram nas novas malhas estavam localizados próximos aos pontos das malhas anteriores. Mesmo assim, a malha de 18 pontos não ficou muito bem distribuída na área de estudo, fato que é justificado pela adequação feita durante o desenvolvimento deste trabalho.

Além disso, recomenda-se que as coletas das amostras de solo sejam realizadas de forma única, isto é, devem ser todas coletadas no mesmo dia, pois conforme observado nesta pesquisa, na mesma semana pode haver mudanças no comportamento dos solos, das culturas, da relação de matéria orgânica, umidade, dentre outros fatores físicos, químicos e biológicos que interferem nos solos agrícolas.

Nesse sentido, cabe ressaltar ainda a necessidade de associar outros elementos que contribuem para o desenvolvimento de tecnologias e metodologias de baixo custo destinadas a pequenos agricultores. Para tal, podem ser pesquisados dados sobre a utilização de insumos em relação à necessidade da área agrícola. Estes dados podem ser computados em planilhas eletrônicas que calculam os gastos financeiros com insumos e a quantidade necessária que deve ser aplicada na área.

Do mesmo modo, é necessário o diálogo com os proprietários para se ter o histórico da propriedade e validar com análises químicas e físicas de solo se os métodos de correção

usados estão sendo suficientes para aumentar a qualidade dos solos e a produtividade agrícola, observando e comparando ao longo do tempo os resultados destas amostragens.

Assim, devem ser pensados e pesquisados a relação custo–benefício: o quanto o investimento diminui nos custos e aumenta na produção. A qualidade dos solos e o lucro do agricultor devem ser estruturados e planejados. E para isso, não há necessidades de programas sofisticados.

É preciso um acompanhamento técnico e programas de capacitação a estes pequenos agricultores, pois mesmo com os avanços no desenvolvimento de máquinas e implementos que permitem o manejo localizado, a agricultura de precisão no Brasil ainda é recente e as tecnologias necessitam de adaptações ao sistema produtivo (WERNER, 2004).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este breve estudo, voltado ao atendimento de pequenas propriedades que se enquadram na categoria de agricultura familiar, pode ser visto como uma utopia, pois as tecnologias da agricultura de precisão ainda estão distantes da realidade do campo brasileiro. Contudo, metodologias e tecnologias devem ser adaptadas e barateadas para que pequenos agricultores possam melhorar a qualidade dos seus solos, da sua produção, a sua renda e conseqüentemente a demanda de oferta de alimentos, uma vez que são estes pequenos agricultores que abastecem o mercado interno.

A partir desta pesquisa, foi possível determinar as diferenças entre os usos dos interpoladores para análise química do solo e a espacialização que melhor atende esta proposta. A análise de superfície de tendência demonstrou-se pouco eficaz e por conta disso, não é recomendada para ser usada como um interpolador para estudo dos atributos do solo, uma vez que estima valores acima e abaixo dos amostrados e, dependendo da quantidade de pontos, extrapola os limites da área amostrada. Por isso, pode ser usada para um “pré-processamento” em outros tipos de análise geográfica.

As redes irregulares triangulares mostraram uma melhor representação da variabilidade de pH do solo, uma vez que foram fiéis aos dados originais das amostras, preservando os valores de pH do solo obtidos. Isso ocorreu em todas as distribuições aqui propostas, pois a triangulação mantém os valores de cada ponto estimado.

Quanto à krigagem, concluiu-se que poucos pontos não realizam a interpolação e que quanto mais pontos, mais confiável é o resultado da espacialização cartográfica, desde que haja dependência espacial. Contudo, a krigagem é um método de interpolação que demanda um conhecimento técnico sobre geoestatística. Isso, no entanto, encarece os resultados quando o objetivo é diminuir custos para que sejam acessíveis aos agricultores familiares.

Em relação às análises de solo da propriedade estudada, os valores do pH variaram bastante, apresentando manchas de solo com acidez alta e média. Como na propriedade nunca foram adotadas práticas de manejo de correção do solo, pode-se avaliar que estes solos não se encontram em situação crítica.

Mesmo assim, este solo deve ser corrigido aplicando-se doses de calcário nas áreas de pH mais baixo para nivelar as manchas de acidez. Isso, no entanto, não foi aprofundado e nem será discutido, uma vez que o objetivo desta pesquisa foi a análise do desempenho dos interpoladores para a elaboração de mapas destinados à agricultura familiar.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. **Agroecologia: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável**. 5. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 117 p.
- ALVES, E. **Agricultura familiar prioridade da Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. 55 p. Disponível em: <<http://www22.sede.embrapa.br/unidades/uc/sge/texto9.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2012.
- AL ZAHER, C. **Análise da estrutura agrícola, fundiária e da gestão da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) nas Microbacias do Córrego Fundo e do Pinho – Água do Jacu e Mundo Novo quanto à agricultura familiar no município de Ourinhos/SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Ourinhos, 2012.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2010. 165 p.
- ANTUNIASSI, U. R.; BAILO, F. H. R.; SHARP, T. C. Agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 6., 2007, Uberlândia. **Palestras**. Uberlândia: Embrapa Algodão, 2007. 21 p. Disponível em: <<http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/cba6/palestras/1622.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2013.
- ASMUS, R. M. F. **Qualidade de vida na agricultura familiar**. Tese (Doutorado em Política e Gestão Ambiental) - Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.unbuds.pro.br/publicacoes/RosaAsmus.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2012.
- BERNARDI, J. V. E.; FOWLER, H. G.; LANDIM, P. M. B. **Um estudo de impacto ambiental utilizando análises estatísticas espacial e multivariada**. *Holos Environment*, v. 1, n. 2, 2001. Disponível em: <<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/holos/article/view/1625/1387>>. Acesso em: 12 fev. 2013.
- BOLFE, E. L.; GOMES, J. B. V. **Geoestatística como subsídio à implantação de agricultura de precisão**. Pesquisadores da Embrapa Tabuleiros Costeiros. 2005. Disponível em: <<http://www.ruralsoft.com.br/manejo/manejoExibe.asp?id=70>>. Acesso em: 07 mar. 2012.
- BRASIL. Lei nº 4.504, de 30 de Novembro de 1964. **Estatuto da Terra**. Brasília, DF: Congresso nacional, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 1964. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L4504.htm>. Acesso em: 13 dez. 2011.
- BRASIL. Lei nº 11.326, de 24 de Julho de 2006. **Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais**. Brasília, DF: Centro de Documentação e Informação, 2006. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2006/lei-11326-24-julho-2006-544830-normaatualizada-pl.pdf>>. Acesso em: 4 nov. 2012.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press Inc., 2004. 333 p.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação. In.: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J. S. (Ed). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap2-conceitos.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2013.

CARFAN, A. C. **Análise de conforto térmico em áreas abertas no município de Ourinhos – SP**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 166 p. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisponiveis%2F8%2F8135%2Fde-08022012-160622%2Fpublico%2F2011_AnaClaudiaCarfanVCorrigida.pdf&ei=WVWjUdKDMaeD0QGLh4CoAQ&usg=AFQjCNFFJ4QE6bIDX6wyFilRc5TNUd-HXw&sig2=x64Zc6TIwWzKp9uncTq0Xw&bvm=bv.47008514,d.dmQ>. Acesso em: 27 maio. 2013.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R.; MORAN, R. C. P. **Como Avaliar Similaridades entre Mapas de Produtividade**. Relatório Técnico. Campinas: Embrapa, 2001. 24 p. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/7111/1/RELATORIOTECNICO10int.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2013.

COORDENADORIA DE ASSITÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL - CATI. **Microbacias II – Acesso ao mercado**. Anexo I - Informações Gerais da Agropecuária no Estado de São Paulo. São Paulo: CATI, 2011. Disponível em: <<http://www.cati.sp.gov.br/microbacias2/arquivos/Anexo1.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2013.

COORDENADORIA DE ASSITÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL - CATI. **Plano de Microbacia Hidrográfica do Córrego do Pinho – Água do Jacu e Mundo Novo**. Ourinhos: CATI, 2007. 51 p.

CELINSKI, V. G. **Desenvolvimento de sensor elétrico de contato e correlações com atributos do solo visando à agricultura de precisão**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008. 121 f. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bla/33004064021P7/2008/celinski_vg_dr_botfca.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2012.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI. **Clima dos Municípios Paulistas**. Campinas: UNICAMP, 2013. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 28 abr. 2013.

COELHO, A. M. Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In.: CURI, N. et. al. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, v. 3, p. 249-90.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão em sistemas agrícolas. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. (Ed.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. cap. 35, p. 1063-80. Disponível em: <http://simposio.cpac.embrapa.br/simposio/projeto/palestras/capitulo_35.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2013.

DAMASCENO, G. F. et al. Representação cartográfica do uso e ocupação do solo e avaliação de propriedades físicas e químicas dos horizontes superficiais de perfis pedológicos do lado direito do Parque Ecológico Municipal “Bióloga Tânia Mara Netto Silva”, Ourinhos/SP. In: ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS, 16., 2010, Porto Alegre. **Anais Eletrônicos...** Porto Alegre, AGB, 2010, p. 1-10. Disponível em: <<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0OCCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.agb.org.br%2Fevento%2Fdownload.php%3FidTrabalho%3D3390&ei=mH2nUYGyJ6yB0QG02YGQDg&usq=AFQjCNFyC7bOeIhFrGc-PPMpUNe6g52hBQ&sig2=OPmVUpTysdK82JiZO5iguQ&bvm=bv.47244034,d.dmQ>>. Acesso em: 29 maio. 2013.

DELLAMEA, R. B. C. et al. Agricultura de precisão voltada à melhoria da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Anais Eletrônicos...** Gramado, Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppgcs/congressos/CBCS_Gramado/Arquivos%20trabalhos/Agricultura%20de%20precis%E3o_Ricardo%20B.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2013.

DENARDI, R. A. Agricultura familiar e políticas públicas: alguns dilemas e desafios para o desenvolvimento rural sustentável. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v.2, n.3, p.56-62. jul. / set. 2001. Disponível em: <http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/241/_Agricultura.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2012.

DRUZINA, A. G. S. **Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo modelo digital de elevação**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ppgsr/publicacoes/Dissert_AlineDruzina.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2013.

EASTMAN, J. R. **Idrisi for Windows** - Manual do usuário: introdução e exercícios tutoriais. Editores da versão em português, Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Recursos Idrisi, 1998. 240 p. Disponível em: <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/arquivos/downloads/Tutorial_Idrisi_for_Windows_2.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2013.

ELIAS, A. R.; PIROLI, E. L. Técnicas de posicionamento GPS para agricultura de precisão. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 2, n.1, p. 7 – 11. jan. / abr. 2009. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/view/422/572>>. Acesso em: 24 mar. 2012.

FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P.; OLIVEIRA, F. F. Separação de telhados de edifícios a partir de TIN/laser e análise de componentes conexos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife.

Anais Eletrônicos... Recife: UFPE, 2010. p. 1-7. Disponível em:

<http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/Todos_Artigos/A_183.pdf>.

Acesso em: 12 fev. 2013.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E PESCA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - FAERJ. **Fazenda Legal**. Versão revisada e atualizada do conjunto de cartilhas do Programa Fazenda Legal, para o ano-safra 2008/2009, Rio de Janeiro, 2008. 56 p.

Disponível

em:<http://www.fajerj.com.br/TELAS/FazLegal/downloads/Cartilha%20funduario_atualizada.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2011.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica de terreno. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V; MEDEIROS, J. S. (Ed). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 2004. Disponível em:

<<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf> >. Acesso em: 12 fev. 2013.

FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A.; MORAIS, A. R. Exatidão na classificação de fragmentos de matas em imagem do satélite Cbers-CCD, no município de Lavras, MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis.

Anais Eletrônicos... Florianópolis: INPE, 2007. p. 887-94. Disponível em:

<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.14.40/doc/887-894.pdf>>.

Acesso em: 30 maio. 2013.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais Eletrônicos...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 5755-62.

Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.13.17.35/doc/5755-5762.pdf>>. Acesso em: 30 maio. 2013.

GIMENEZ, L. M. **Análise de dados gerados em agricultura de precisão e investigação dos possíveis agentes causadores de variabilidade espacial na aplicação de insumos**. Relatório de estágio em Engenharia Agrônômica. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 2000. 85 f. Disponível em:

<<http://www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/estagio/LeandroGimenez.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2013.

GOMES, M. P.; VITAL, H.; MACEDO, J. W. P. Aplicação da geoestatística na filtragem de dados batimétricos e altimétricos na Bacia Potiguar. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 20, n. 2, p.243-54, 2007. Disponível em:

<http://www.revistadegeologia.ufc.br/documents/revista/2007/19_2007.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2012.

GOMES, V. S. et al. Levantamento florístico de árvores e arbustos na fazenda Matas do Lageadinho, no município de Ourinhos – SP. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DAS FACULDADES INTEGRADAS DE OURINHOS, 11., 2012, Ourinhos.

Anais Eletrônicos... Ourinhos: FIO, 2012, p.1-15. Disponível em:

<http://fio.edu.br/cic/anais/2012_xi_cic/PDF/Bio/01.pdf>. Acesso em: 29 maio. 2013.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia- Departamento Nacional de Produção Mineral, 1988, 145p.

HESPANHOL, A. N. Políticas públicas, modernização e crise da agricultura brasileira. **Revista Faz Ciência**, Francisco Beltrão, v.1, n.1 p.38 – 49, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Agricultura Familiar: Primeiros Resultados - Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro: IBGE, 267p. 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/agri_familiar_2006/familia_censoagro2006.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades@ 2013**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 18 abr. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Mapa geológico do estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. Escala 1:500.000.

KERSTING, J. et al. Filtragem de modelos digitais de superfície derivados da varredura a laser usando a Triangulação de Delaunay. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 1., 2004, Recife. **Anais Eletrônicos...** Recife: SIMGEO, 2004. v. 1, p. 1-10. Disponível em: <<http://people.ufpr.br/~centeno/publications/download/2004/f023.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2013.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**: relações solo – planta. São Paulo: CERES, 1979, 262p.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e Agricultura de Precisão**: fundamentos e aplicações. Guaíba: Agropecuária, 2001, 118 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. São Paulo: UNESP, 2003. 253 p.

LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados**. DGA, IGCE, UNESP, Rio Claro, Texto Didático 15, 229 p., 2010. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/MULTIVAR.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2013.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. DGA, IGCE, UNESP, Rio Claro, Lab. Geomatématica, Texto Didático 02, 20 p., 2000. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/interpo.pdf>>. Acesso em: 26 maio. 2013.

LANDIM, P. M. B. <plandim@rc.unesp.br>. Webinar Geoestatística Aplicada em Ciências LANDIM Agrárias. 20 de Maio de 2013a. E-mail para: Alice Nardoni Marteli <alicenmart@gmail.com>.

LANDIM, P. M. B. **Webinar**: Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias. MundoGEO, 2013b. Disponível em: <<http://mundogeo.com/webinar/sgea3/arquivos.html>>. Acesso em: 19 maio 2013.

MACHADO, P. L. O. A. et al. Variabilidade de Atributos de Fertilidade e Especialização da Recomendação de Adubação e Calagem para a Soja. In.: MACHADO, P. L. O. A.;

BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004, p.115-129. Disponível em:

<http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/publicacoes/publicacoes-interessantes-sobre-ap/Livro_AP_2004.pdf#page=72>. Acesso em: 17 jan. 2013.

MANZIONE, R. L. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em Araguari-MG**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002, 141 f. Disponível em:

<http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bla/33004064021P7/2002/manzione_rl_m_e_botfca.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2013.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.367-374, maio, 2003. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n2/v7n2a31.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: O gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: o autor, 2001. 83 p.

MOLIN, J. P. et al. Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.6, n.3, p. 309-324, 2007. Disponível em:

<<http://www.leb.esalq.usp.br/download/APP%202007.03.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

OLIVEIRA, G.S. R. **Avaliação da qualidade de resultados obtidos através dos métodos de classificação supervisionada - máxima verossimilhança e redes neurais**. Monografia (Pós-Graduação em Geoprocessamento) - Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. 35 f. Disponível em:

<<http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/graziela2003.pdf>>. Acesso em: 30 maio. 2013.

OLIVEIRA, J. B. et al. **Mapa pedológico do estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: EMBRAPA, 1999. Escala 1:500.000.

PIROLI, E. L. **Disciplina de geoprocessamento: práticas em Idrisi – versão Taiga**. Ourinhos: Unesp/Campus Experimental de Ourinhos, 2010. 56 p. Disponível em:

<http://vampira.ourinhos.unesp.br:8080/cediap/material/praticas_idrisi_taiga.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2013.

POLIZEL, S. P. **Análise de superfícies de tendência com dados SRTM: estudo de caso - Delta do Rio Doce (ES)**. São José dos Campos: INPE, 2012. Disponível em:

<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDwQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwiki.dpi.inpe.br%2Flib%2Fexe%2Ffetch.php%3Fid%3Dcronograma_das_apresentacoes_2012%26cache%3Dcache%26media%3Dmonografia_geoprocessamento_-_silvia_polizel.pdf&ei=KWUaUe65JIT-9Qsf_YHIBQ&usq=AFQjCNFk09CSc41zBWPpH3okbEGx5OveY5Q&sig2=NagHOaj_03IvADFzlx43eQ&bvm=bv.42261806,d.eWU>. Acesso em: 12 fev. 2013.

PORTUGAL, A. D. **O desafio da Agricultura Familiar**. Brasília, DF: Embrapa, 2004. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2002/artigo.2004-12-07.2590963189/>>. Acesso em: 3 nov. 2012.

QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; MANTOVANI, E. C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A. et al. (Org). **Agricultura de Precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 467 p.

RAIJ, B. et al. (Org.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico: 2001. 285p.

RAIJ, B. et al. (Org.). **Boletim Técnico 100**: Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285p.

RODRIGUES, J. B. T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos de solo e produtividade na agricultura de precisão**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bla/33004064021P7/2002/rodrigues_jbt_me_botfca.pdf>. Acesso em 7 ago. 2012.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Embrapa: Campinas, 2010. Disponível em: <http://www.cnpm.embrapa.br/publica/download/bpd_8.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2012.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1997. Escala 1:500.000.

ROSIM, S. et al. Uma Ferramenta baseada em Grafos para Gestão de Recursos Hídricos no Brasil. **HARPIA-Revista de Divulgação Científica e Cultural do Isulpar**, Curitiba, v.1, n. 1, p. 218-230, 2010. Disponível em: <http://www.isulpar.edu.br/publicacoes/anexo/revista2010/SERGIO_ROSIM.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2013.

SAQUET, M. A. Agricultura Familiar: elementos teóricos de abordagem. **Revista Faz Ciência**, Francisco Beltrão, v.1, n.1 p. 90 – 8, 1997.

SAQUET, M. A. **Colonização italiana e agricultura familiar**. Porto Alegre: EST, 2002. 112p.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: BORÉM, A. et al. (org). **Agricultura de Precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 109-45. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT190_principios_em_agricultura_de_precisao/livros/Capitulo_6.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2013.

SCHMITZ, H.; MOTA, D. M. Agricultura familiar: elementos teóricos e empíricos. **Revista Agrotrópica**. Itabuna, v.19, p.21-30, 2007. Disponível em: <http://www.cultura.ufpa.br/cagro/pdfs/AA_selecao/2010/schmitz_e_mota_2007.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2012.

SCHNEIDER, S. Teoria social, agricultura familiar e pluriatividade. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, São Paulo, v.18, n. 51, p.99-122, fev./2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcsoc/v18n51/15988.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2012.

SILVA, A. R. et al. Extração da cobertura vegetal de áreas urbanas utilizando imagens do satélite GeoEye-1. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais Eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2011. p.1576-83. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1432.pdf>>. Acesso em: 30 maio. 2013.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.8, n.1, p.51-58, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v8n1/v8n1a08.pdf>>. Acesso em: 06 fev. 2013.

TRABACHINI, A. et al. Definição de unidades de manejo baseado em mapas de produtividade. **Revista Sapere**, Tatuí, v. 1, n. 1, 8 p., 2009. Disponível em: <http://www.revistasapere.inf.br/download/agricultura_de_precisao_mapas_de_produtividade_unidades_de_manejo.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2012.

VALENCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S. P.; BETTINI, C. Geoestatística aplicada à Agricultura de Precisão. In.: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 37-56. Disponível em: <http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/publicacoes/publicacoes-interessantes-sobre-ap/Livro_AP_2004.pdf#page=72>. Acesso em: 17 jan. 2013.

VALENCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S.; FUKS, S. D. Métodos geoestatísticos para análise e avaliação de riscos em agricultura de precisão. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, 3., 2001, Rio de Janeiro. **Anais Eletrônicos...** Fortaleza: SBC, 2001. Disponível em: <<http://www.geoinfo.info/geoinfo2001/papers/138ivanluis.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2013.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **Topodata**: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE. 2010. Disponível em: <<http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2013.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1- 54.

WERNER, V. **Utilização de recursos de agricultura de precisão na geração de mapas de atributos, mapas de produtividade e aplicação de insumos a taxas variáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004. 125 f. Disponível em: <<http://coralx.ufsm.br/ppgea/admin/dissertacoes/Valmir%20Werner.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

ZANI, H.; ASSINE, M. L. Análise de superfícies de tendência com dados SRTM: estudo de caso na bacia sedimentar do Pantanal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 14. 2009, Natal. **Anais Eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 3403-3410. Disponível em:
<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.12.45/doc/3403-3410.pdf>>.
Acesso em: 12 fev. 2013.