

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN - RS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA:  
AGRICULTURA E AMBIENTE**

**Osmar Henrique de Castro Pias**

**EFICIÊNCIA DE GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO NA  
ACERTIVIDADE DA CORREÇÃO E FERTILIZAÇÃO EM ÁREA DE  
AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA**

**Frederico Westphalen, RS  
2016**

**Osmar Henrique de Castro Pias**

**EFICIÊNCIA DE GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO NA  
ACERTIVIDADE DA CORREÇÃO E FERTILIZAÇÃO EM ÁREA DE  
AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

**Orientador: Prof. Dr. Claudir José Basso**

**Frederico Westphalen, RS  
2016**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pias, Osmar Henrique de Castro  
Eficiência de grades amostrais e zonas de manejo na  
acertividade da correção e fertilização em área de  
agricultura de precisão consolidada. / Osmar Henrique de  
Castro Pias.-2016.  
85 f.; 30cm

Orientador: Claudir José Basso  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, CESNORS-FW, Programa de Pós-Graduação em Agronomia -  
Agricultura e Ambiente, RS, 2016

1. Agricultura de precisão. 2. Amostragem de solo 3.  
Malhas amostrais 4. Unidades de gerenciamento  
diferenciado 5. Viabilidade econômica I. Basso, Claudir  
José II. Título.

---

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Osmar Henrique de Castro Pias. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: henriquepias@yahoo.com.br

**Osmar Henrique de Castro Pias**

**EFICIÊNCIA DE GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO NA  
ACERTIVIDADE DA CORREÇÃO E FERTILIZAÇÃO EM ÁREA DE  
AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

**Aprovado em 17 de fevereiro de 2016:**

---

**Claudir José Basso, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/ Orientador)

---

**Jackson Ernani Fiorin, Dr. (UNICRUZ)**

---

**Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)**

Frederico Westphalen, RS  
2016.

*À Minha família,  
meus pais Osmar (in memoriam) e Sirlei,  
meus irmãos Adriana e Rodrigo,  
minha esposa Aline e meu filho Pedro Henrique.*

**DEDICO...**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde, e pelas oportunidades que tem me proporcionado as quais tem possibilitado a realização de meus sonhos.

Aos meus pais Osmar da Silva Pias (*in memoriam*) e Sirlei de Castro Pias pelos exemplos de vida dados a mim, pelo amor, incentivo e apoio para que eu seguisse a caminhada em busca dos meus objetivos.

A minha esposa Aline Belmonte, pelo carinho e companheirismo. Ao meu filho Pedro Henrique Belmonte Pias por ser a maior inspiração em minha vida.

A todos os demais familiares, em especial: meus irmãos Celso Rodrigo de Castro e Adriana de Castro, meu padastro João Araujo, meus avós Joana e Sebastião de Castro (*in memoriam*), João e Olivia dos Santos, pelo apoio concedido a mim e por acreditarem nas minhas potencialidades.

A Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia Agricultura e Ambiente pela oportunidade de aprendizado e qualificação profissional.

Aos professores Claudir José Basso e Antônio Luis Santi orientador e co-orientador, respectivamente, pela confiança, amizade e conhecimentos repassados.

A todos os integrantes do Grupo LapSul pela ajuda na realização dos trabalhos a campo, pela amizade e convivência.

A todos aqueles não citados, familiares, colegas, amigos, professores que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

A todos vocês, **Muito Obrigado!**

``Education is the most powerful weapon  
which you can use to change the world``

(Nelson Mandela)

## RESUMO

### EFICIÊNCIA DE GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO NA ACERTIVIDADE DA CORREÇÃO E FERTILIZAÇÃO EM ÁREA DE AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA

AUTOR: Osmar Henrique de Castro Pias  
ORIENTADOR: Claudir José Basso

A amostragem de solo a partir de grades amostrais é atualmente a principal ferramenta de agricultura de precisão utilizada no Brasil. Porém, ainda se tem dúvidas sobre a viabilidade econômica da utilização de grades com alta densidade de pontos. Novas tecnologias como o uso de zonas de manejo (ZM) para orientar amostragens de solo têm sido estudadas, visando reduzir o número de amostras e consequentemente os custos de amostragem, mantendo a qualidade das informações obtidas. Porém, tal metodologia carece de informações científicas sobre a sua eficiência. Objetivou-se com este estudo avaliar a eficiência técnica (capítulo I) do mapeamento dos atributos químicos do solo e a viabilidade econômica (capítulo II) das recomendações de fertilizantes e corretivos a partir dos parâmetros obtidos através da amostragem convencional, grades amostrais e ZM delimitadas por distintas metodologias. O estudo foi realizado em Boa Vista das Missões - RS, em uma área de 118,9 ha. A amostragem de solo foi realizada em 2015 através de uma grade amostral de 0,5 ha. A partir da eliminação sistemática de pontos amostrais, simulou-se a utilização de grades de 1, 2, 3 e 4,5 ha. As ZM foram delimitadas com base em dados altimétricos da área e de mapas de produtividade. Para o capítulo I utilizou-se os dados de P, K e pH os quais foram submetidos à análise estatística descritiva. Os dados coletados em grade amostrais foram submetidos à análise geoestatística. A acurácia dos mapas temáticos foi avaliada a partir da correlação linear de Pearson e coeficiente de desvio relativo. Para o capítulo II utilizou-se os teores de P, K e índice SMP para gerar as recomendações de  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  e calcário, respectivamente. Calcularam-se os erros de recomendação em relação à grade referencia (0,5 ha) em área de aplicação (ha), kg de fertilizante e em reais (R\$). Posteriormente os custos de amostragem foram comparados com os custos totais de erros de recomendação. O aumento da dimensão da grade amostral resultou em perdas de informações sobre a variabilidade espacial dos atributos e consequentemente elevou os desvios nas recomendações tanto de fertilizantes quanto de corretivo. Para uma adequada aferição da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e uma acurada prescrição de insumos recomenda-se a utilização de grade amostral de 0,5 ha.

**Palavras-chaves:** Agricultura de precisão. Amostragem de solo. Malhas amostrais. Unidades de gerenciamento diferenciado. Viabilidade econômica.

## ABSTRACT

### EFFICIENCY OF SAMPLE GRIDS AND MANAGEMENT ZONES IN THE ASSERTIVENESS OF CORRECTION AND FERTILIZATION IN CONSOLIDATED PRECISION AGRICULTURE AREA

AUTHOR: Osmar Henrique de Castro Pias  
ADVISOR: Claudir José Basso

Soil samples from sampling grids is currently the leading precision farming tool used in Brazil. But it still has doubts about the economic feasibility of using grids with high density points. New technologies such as the use of management zones (MZ) to guide soil samples have been studied in order to reduce the number of samples and consequently the sampling costs while maintaining the quality of the information obtained. However, this method lacks scientific information about its efficiency. The aim of this study was to evaluate the technical efficiency (chapter I) mapping chemical attributes of soil and economic viability (chapter II) of the recommendations of fertilizers and from the parameters obtained by conventional sampling, sample grids and MZ delimited by different methodologies. The study was carried out in Boa Vista Missões - RS, on an area of 118,9 ha. The soil sampling was carried out in 2015, using a sample grid of 0.5 ha. From the systematic elimination of sample points simulated the use grids; 1, 2, 3 and 4.5 ha. The MZ were defined based on data altimetry of the area and the yield maps. To Chapter I used the data of P, K and pH which were submitted to descriptive statistical analysis. Data collected in sampling grid was submitted to geostatistical analysis. The accuracy of thematic maps was evaluated from the Pearson correlation and coefficient of relative deviation. For chapter II we used the P, K and SMP index to generate recommendations of  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  and lime, respectively. The recommendation of errors were calculated in relation to the reference grid (0.5 ha) in application area (ha) kg of fertilizer and in real (R\$), later smpling costs were compared with the total cost of errors recommendation. The increase in the size of the sampling grid resulted in loss of information on the spatial variability of attributes and concenquentemente raised the deviations in both fertilizer and corrective recommendations. For a proper assessment of the spatial variability of soil chemical attributes and an accurate prescription of inputs recommends the use of sampling grid of 0.5 ha.

**Keywords:** Precision agriculture. Sampling soil. Sample grids. Unit of differentiated management. Economic viability.

## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO I

- Figura 1 – Detalhes da localização da área de estudo, Boa Vista das Missões – RS, Brasil. ....22
- Figura 2 - Mapas temáticos de produtividade de grãos utilizados para delimitação das zonas de manejo, Boa Vista das Missões – RS, Brasil. ....243
- Figura 3 – Mapa temático da altitude da área experimental com a subdivisão das zonas de manejo, Boa Vista das Missões – RS, Brasil. ....25
- Figura 4 – Área experimental com as grades amostrais e os pontos utilizados na amostragem convencional, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.....26
- Figura 5 – Área experimental com os pontos utilizados para simular a amostragem convencional e convencional simplificada, Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....26
- Figura 6 – Mapas temáticos de fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) determinados pela amostragem convencional, convencional simplificado, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil. ....37
- Figura 7 – Mapas temáticos de potássio ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) determinados pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil. ....38
- Figura 8 – Mapas temáticos de pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) determinados pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil. ....39

### ARTIGO II

- Figura 1 – Desvios absolutos da recomendação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da amostragem de solo realizada nos esquemas de amostragem: grade amostral de 1 ha (a), 2 ha (b), 3 ha (c) e 4,5 ha (d), zonas de manejo em função da produtividade (e) e altitude (f), amostragem convencional (g) e convencional simplificada (h) em relação a recomendação fornecida pela grade amostral de 0,5 ha .....56
- Figura 2 – Mapas temáticos da recomendação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em função da amostragem de solo realizada pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....57

- Figura 3 – Desvios absolutos na recomendação de  $K_2O$  em função da amostragem de solo realizada nos esquemas de amostragem grade amostral de 1 ha (a), 2 ha (b), 3 ha (c) e 4,5 ha (d), zonas de manejo em função da produtividade (e) altitude (f), amostragem convencional (g) e convencional simplificada (h) em relação a grade amostral de 0,5 ha, Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....61
- Figura 4 – Mapas temáticos da recomendação de  $K_2O_5$  em função da amostragem de solo realizada pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....62
- Figura 5 – Desvios absolutos na recomendação de calcário em função da amostragem de solo realizada nos esquemas de amostragem grade amostral de 1 ha (a), 2 ha (b), 3 ha (c) e 4,5 ha (d), zonas de manejo em função da produtividade (e), altitude (f), amostragem convencional (g) e convencional simplificada (h) em relação à grade amostral de 0,5 ha, Boa Vista das Misões – RS, Brasil .....66
- Figura 6 – Mapas temáticos da recomendação de calcário em função da amostragem de solo realizada de forma convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....67
- Figura 7 – Ponto de equilíbrio entre o custo total (erros de recomendação + custo de amostragem)  $ha^{-1}$  e do saldo de diferentes esquemas de amostragem com relação à amostragem referência (grade de 0,5 ha) com a quantidade de  $kg ha^{-1}$  de soja a ser produzidos, Boa Vista das Missões - RS, Brasil .....70
- Figura 8 – Ponto de equilíbrio entre o custo total (erros de recomendação superiores + custo de amostragem)  $ha^{-1}$  e do saldo de diferentes métodos de amostragem com relação à amostragem referência (grade de 0,5 ha) com a quantidade de  $kg$  de soja a ser produzidos, Boa Vista das Missões - RS, Brasil .....72

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO I

- Tabela 1 – Histórico de culturas e de aplicação de fertilizantes e corretivos no talhão, Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....22
- Tabela 2 – Análise estatística descritiva dos dados de fósforo, potássio e pH amostrados de forma convencional (Conv), convencional simplificado (Simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitadas pela produtividade (Prod) de grãos e altitude (Alt) da área, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.. .....29
- Tabela 3 – Análise geoestatística dos dados de fósforo, potássio e pH amostrados em diferentes grades amostrais, Boa Vista das Missões – RS, Brasil. ....32
- Tabela 4 – Correlação linear de Pearson dos dados de fósforo, potássio, e pH amostrados de forma convencional (Conv), grades amostrais e zonas de manejo delimitadas por pela atitude e produtividade (Prod) com a grade de 0,5 ha, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.. .....35
- Tabela 5 – Coeficiente de desvio relativo dos mapas de fósforo, potássio e pH oriundos de amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt) com a grade amostral referência de 0,5 ha, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.. .....36

### ARTIGO II

- Tabela 1 – Faixas de interpretação de P, K e índice SMP e suas respectivas recomendações de  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  e calcário para elevar os teores do solo ao nível crítico desejado, Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....51
- Tabela 2 – Análise econômica dos desvios na recomendação de  $P_2O_5$  a partir dos parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simpl), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) em relação à amostragem referência (grade 0,5 ha), Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....53
- Tabela 3 – Análise econômica dos desvios na recomendação de  $K_2O$  a partir dos teores de K amostrados de forma convencional (Conv), convencional simplificado (Simpl), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) em relação a amostragem referência (grade 0,5 ha), Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....59

Tabela 4 –	Análise econômica dos desvios na recomendação de calcário a partir de parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv.), convencional simplificada (simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da altitude (Alt) e produtividade (Prod), Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....	64
Tabela 5 –	Análise econômica dos desvios totais (R\$) das recomendações de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O e calcário a partir de parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simpl), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) e dos custos de amostragem, Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....	68
Tabela 6 –	Análise econômica dos desvios de recomendações de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O e calcário realizados a partir de parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) superiores a recomendação realizada com base na amostragem referência (grade 0,5 ha) Boa Vista das Missões – RS, Brasil .....	71

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>ARTIGO I.....</b>	<b>17</b>
	<b>MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO UTILIZANDO AMOSTRAGEM CONVENCIONAL, GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO EM ÁREA COM AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA .....</b>	<b>17</b>
2.1	RESUMO .....	17
2.2	ABSTRACT.....	18
2.3	INTRODUÇÃO.....	18
2.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	21
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
2.5.1	Análise exploratória dos dados.....	28
2.5.2	Análise geoestatística dos dados amostrados em grades.....	31
2.5.3	Correlação e similaridade dos mapas temáticos .....	34
2.6	CONCLUSÕES.....	41
2.7	AGRADECIMENTOS.....	41
2.8	REFERÊNCIAS .....	41
<b>3</b>	<b>ARTIGO II.....</b>	<b>46</b>
	<b>VIABILIDADE ECONÔMICA DE AMOSTRAGEM DE SOLO EM GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO EM ÁREA COM AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA .....</b>	<b>46</b>
3.1	RESUMO .....	46
3.2	ABSTRACT.....	47
3.3	INTRODUÇÃO.....	47
3.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	50
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
3.5.1	Desvios nas recomendações $P_2O_5$ .....	53
3.5.2	Desvios nas recomendações de $K_2O$ .....	58
3.5.3	Desvios nas recomendações de calcário.....	63
3.5.4	Análise dos desvios totais de recomendações em relação a referência.....	68
3.5.5	Análise dos custos totais de fertilizantes recomendados e de amostragem ...	70
3.5.6	Discussão .....	73
3.6	CONCLUSÕES.....	74
3.7	AGRADECIMENTOS.....	75
3.8	REFERÊNCIAS .....	75
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é um dos grandes responsáveis pelo produto interno bruto (PIB) do Brasil. Nos últimos anos, tem se observado uma crescente elevação da produtividade das culturas, principalmente da soja e do milho que são as mais cultivadas (CONAB, 2016). Dentre os vários fatores responsáveis por tais avanços, o manejo da fertilidade a partir das técnicas de agricultura de precisão (AP) detém um papel fundamental (SANTI et al., 2012).

A partir de inúmeros estudos científicos detectou-se que os atributos químicos do solo apresentam elevada variabilidade espacial dentro de um talhão (NANNI et al., 2011; MONTANARI et al., 2012; CHERUBIN et al., 2014, 2015; SOUZA et al., 2014), sendo assim, a amostragem convencional que não considera tal variabilidade, resulta em informações menos acuradas que podem super ou subestimar os reais níveis dos atributos no solo (MONTANARI et al., 2012). As principais causas da variabilidade espacial dos atributos estão associadas a fatores intrínsecos do solo, tais como: clima, topografia, material de origem, vegetação, processos pedológicos; e induzidas pelo uso do solo e práticas de manejo adotadas (CAMBARDELLA et al., 1994; MALLARINO, 1996; CAVALCANTE et al., 2007).

A AP pode ser descrita sucintamente como sendo uma ferramenta de gerenciamento do sistema solo-planta-atmosfera que leva em consideração a variabilidade espacial e temporal de cada fator envolvido no sistema produtivo (MONTANARI et al., 2012). A amostragem georreferenciada de solo a partir da utilização de grades amostrais é atualmente a ferramenta de AP mais utilizada no Brasil (CHERUBIN et al., 2015; SOARES FILHO e CUNHA, 2015). Contudo, ainda não se tem definido um protocolo sobre as metodologias que devem ser utilizadas no planejamento e coleta das amostras de solo (OLIVEIRA et al., 2015). Em alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil visando definir o tamanho ideal das grades amostrais constatou-se a necessidade de coletar pelo menos uma amostra por hectare (SOUZA et al., 2014; CHERUBIN et al., 2015), implicando em um investimento financeiro considerável que em muitas situações torna-se uma barreira à adoção da AP (SOUZA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015).

Em áreas manejadas a longo tempo com AP tem se observado que muitos produtores tem passado a utilizar outras técnicas para a amostragem de solo, visando reduzir o número de amostras e, conseqüentemente, os custos do manejo

georreferenciado de solo, dentre essas merece destaque a utilização de zonas de manejo (ZM) (PETERS e LABOSKI, 2013). Existem várias metodologias utilizadas para delimitar as ZM, contudo, a mais utilizada no Brasil consiste no uso de mapas de colheita (MOLIN, 2002; SANTI et al., 2013) de forma isolada ou em conjunto com outros parâmetros como atributos químicos e físicos do solo, imagens de satélite, fotos aéreas, reflectância do dossel vegetativo, etc. (PETERS e LABOSKI, 2013). No entanto, alguns estudos como o de Colvin et al. (1997) e Mallarino e Wittry (2001) mostraram que nem sempre os mapas de colheita são eficientes, pois muitas vezes há uma variação muito grande entre os mapas (variabilidade temporal) dificultando a delimitação das ZM.

Outra metodologia passível de ser utilizada para a delimitação de ZM, baseia-se no uso de informações topográficas do terreno (DINKINS e JONES, 2008), sendo que em geral, as áreas mais planas localizadas nas porções superiores e inferiores tendem a ser mais produtivas do que as mais declivosas localizadas nas encostas, as quais estão mais propensas a ter perdas de nutrientes por erosão, principalmente (GELDERMAN et al., 2006; ALBA et al., 2011). Comparando-se a utilização de grade amostral com ZM delimitadas utilizando dados altimétricos, e séries de levantamentos de tipos de solo em 10 áreas, Mallarino e Wittry (2004) observaram que ambos os métodos de amostragem tiveram reduzida eficiência para os atributos com maior variabilidade espacial, e apesar da amostragem em grade ser mais eficaz na maioria das áreas, houve áreas em que a utilização de ZM gerou resultados mais acurados.

No Brasil não se tem estudos disponíveis na literatura investigando a eficiência da utilização de ZM para orientar as coletas de amostragem de solo. No que tange à dimensão da grade amostral, ainda são poucos os estudos realizados em solos brasileiros (NANNI et al., 2011; SOUZA et al., 2014; BOTTEGA et al., 2014; CHERUBIN et al., 2015). Além disso, não se tem conhecimento de nenhum estudo que avaliou o impacto econômico das diferentes recomendações geradas a partir do reconhecimento da variabilidade espacial utilizando diferentes grades amostrais, o que pode ser essencial para auxiliar a tomada de decisão frente a melhor estratégia de amostragem de solo a ser utilizada.

Diante desse cenário, onde não existe uma metodologia universal para investigar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, trabalhos que avaliem e comparem a eficiência técnica e econômica das diferentes metodologias

existentes, buscando reduzir custos ou aumentar a precisão nas determinações apresentam elevada relevância (SIQUEIRA et al., 2014).

A hipótese testada neste trabalho é de que a utilização de ZM pode ser uma técnica com eficiência equivalente e mais viável economicamente que a amostragem em grades e convencional para orientar amostragens georreferenciada de solo em áreas com histórico de uso das ferramentas de AP no manejo da fertilidade do solo. Objetivou-se com este estudo avaliar a eficiência técnica do mapeamento dos atributos químicos do solo e a viabilidade econômica das recomendações de fertilizantes e corretivo a partir dos parâmetros obtidos através da amostragem convencional, grades amostrais e ZM delimitadas por distintas metodologias.

## 2 ARTIGO I

### MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO UTILIZANDO AMOSTRAGEM CONVENCIONAL, GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO EM ÁREA COM AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA

#### 2.1 RESUMO

A grade amostral é a metodologia de amostragem georreferenciada de solo mais difundida no Brasil. Contudo, metodologias alternativas, como a amostragem de solo em zonas de manejo (ZM) têm sido estudadas, visando reduzir o número de amostras e conseqüentemente os custos de amostragem, mantendo a qualidade das informações obtidas. Objetivou-se com este estudo comparar a eficiência técnica do mapeamento dos atributos químicos do solo através da amostragem convencional, convencional simplificado (CS), grades amostrais e ZM delimitadas por distintas metodologias. O estudo foi realizado em uma área de 118 ha, localizada no município de Boa Vista das Missões - RS. A amostragem de solo foi realizada em 2015 utilizando uma grade amostral de 0,5 ha. A partir da eliminação sistemática de pontos amostrais simulou-se a utilização de grades de 1, 2, 3 e 4,5 ha. As ZM foram delimitadas com base em dados altimétricos da área e de mapas de produtividade. Os dados de P, K e pH foram submetidos à análise estatística descritiva. Adicionalmente, os dados coletados em grade amostrais foram analisados por meio da geoestatística. A acurácia dos mapas temáticos foi avaliada a partir da correlação linear de Pearson e coeficiente de desvio relativo. O aumento da dimensão da grade amostral resultou em perdas de informações sobre a variabilidade espacial dos atributos. A amostragem em grade mostrou-se mais eficiente do que a amostragem em ZM. Nenhuma das formas de delimitação das ZM mostrou-se eficaz para orientar amostragem georreferenciada de solo, sendo os seus níveis de acerto inferiores aos da amostragem convencional e equivalentes aos da amostragem CS. Para a realização de um correto mapeamento dos atributos químicos do solo recomenda-se a utilização de grades amostrais com dimensão máxima de 1 ha.

**Palavras-chave:** Amostragem de solo. Agricultura de precisão. Malhas amostrais. Unidades de gerenciamento diferenciado.

## 2.2 ABSTRACT

The sampling grid is georeferenced sampling methodology of more widespread soil in Brazil. However, alternative methods, such as soil sampling in management zones (MZ) have been studied in order to reduce the number of samples and consequently the sampling costs while maintaining the quality of the information obtained. The aim of this study was to compare the technical efficiency of the mapping chemical properties of soil through conventional sampling, conventional simplified (CS), sample grids and MZ bounded by different methodologies. The study was conducted on an area with 118 ha in the city of Boa Vista Missões - RS, Brazil. The soil sampling was carried out in 2015 using a sample grid of 0.5 ha. From the systematic elimination of sample points simulated the use grids of 1, 2, 3 and 4.5 ha. The MZ were defined based on data altimetry of the area and the yield maps. The data of P, K and pH were submitted to descriptive statistical analysis. In addition, data collected in sampling grid underwent geostatistical analysis. The accuracy of thematic maps was evaluated from the Pearson correlation and coefficient relative deviation. Increasing the size of the sampling grid resulted in loss of information on the spatial variability of attributes. The grid sampling was more efficient than sampling ZM. None of the forms of delimitation of ZM was effective to guide georeferenced soil sampling, it is yours accuracy levels below those of conventional sampling and equivalent to the CS sample. For achieving a correct mapping of soil chemical attributes recommends the use of sampling grids with maximum size of 1 ha.

**Keywords:** soil sampling, precision agriculture, sample grid, unit of differentiated management.

## 2.3 INTRODUÇÃO

Historicamente o manejo da fertilidade do solo foi realizado com base na amostragem de solo “convencional”, a qual consiste na divisão da área em talhões que apresentam similaridades de tipo de solo, manejo e topografia (MALLARINO e WITTRY, 2001) com tamanho máximo de 30 ha. Em cada talhão procede-se a coleta de várias subamostra, as quais irão compor uma amostra composta que representará a sua média (CQFS - RS/SC, 2004). Com a modernização da

agricultura, a partir dos anos 2000, iniciou-se a implementação das ferramentas de agricultura de precisão (AP) no Brasil. Após os estudos iniciais rapidamente evidenciou-se que a fertilidade natural do solo, as quantidades de nutrientes extraídos e as perdas de nutrientes para o sistema não são uniformes em toda a lavoura (FERRAZ et al., 2012). Sendo assim, a amostragem georreferenciada de solo para reconhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo e as aplicações de fertilizantes e corretivos a taxa variada passaram a ter elevada relevância (SOARES FILHO e CUNHA, 2015), pois propiciam a otimização do uso dos recursos, aumento da produtividade das culturas, resultando em maior lucratividade para os produtores e redução dos impactos ambientais gerados pela agricultura (MALLARINO e WITTRY, 2004; FERRAZ et al., 2012).

É amplamente reconhecido na literatura a existência de elevada variabilidade espacial de alguns nutrientes do solo, principalmente P e K (MALLARINO e WITTRY, 2004; CHERUBIN et al., 2014, 2015), os quais são manejados mais intensamente ao longo do tempo (BOTTEGA et al., 2014). A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo é resultado da interações entre os fatores intrínsecos do processo de formação desse solo (material de origem, relevo, clima, organismos e tempo) associados aos fatores extrínsecos, relacionados ao uso e práticas de manejos (MALLARINO e WITTRY, 2004).

A metodologia mais difundida para a amostragem georeferenciada de solo é a utilização de grades amostrais (amostragem sistemática) (CHERUBIN et al., 2015; SOARES FILHO e CUNHA, 2015). Contudo, algumas questões metodológicas relacionadas ao seu uso ainda não foram totalmente respondidas (OLIVEIRA et al., 2015). Uma delas, bastante discutida na literatura refere-se à intensidade de amostragem ideal (dimensão da grade amostral) (NANNI et al., 2011; MONTANARI et al., 2012; SOUZA et al., 2014; CHERUBIN et al., 2015).

Nos Estados Unidos da América (EUA), estudos da década de 90, já demonstravam a necessidade da utilização de grades inferiores a 1 ha, sendo que grades com dimensão superior a 1,5 ha já eram considerados inapropriados (GELDERMAN et al., 2006). No Brasil, estudos realizados por Nanni et al. (2011), Souza et al. (2014) e Cherubin et al. (2015) obtiveram resultados semelhantes aos previamente obtidos sob solos americanos. A dificuldade na definição da dimensão da grade amostral ideal ocorre devido aos atributos apresentarem diferentes escalas de variabilidade espacial dentro do talhão e entre talhões, sendo assim, não

é possível generalizar um tamanho de grade amostral ideal para todas as lavouras (MALLARINO e WITTRY, 2004; DINKINS E JONES, 2008; MONTANARI et al., 2012).

Alternativamente ao uso de grades amostrais, outra metodologia passível de ser utilizada em áreas manejadas com AP é a amostragem de solo em zonas de manejo (ZM) (MALLARINO e WITTRY, 2001; PETERS e LABOSKI, 2013; MOLIN et al., 2015), as quais podem ser definidas como sendo subáreas do talhão com características semelhantes, o que possibilita a realização de um manejo de forma igualitária em cada ZM (MOLIN, 2002). ZM podem ser delineadas utilizando dados de solo, relevo, produtividade, imagens espectrais, entre outros, de forma isolada ou conjunta (MALLARINO e WITTRY, 2001; DINKINS e JONES, 2008). Essa metodologia tem sido recomendada principalmente para áreas com um elevado histórico de uso de AP, pois devido as aplicações a taxa variada há uma tendência de toda a área estar com níveis de fertilidade elevados, sendo assim ocorre conseqüentemente uma redução da eficiência de uso de grades amostrais densas, devido ao seu elevado custo

Dentre as várias metodologias passíveis de serem utilizadas para delimitar as ZM, o uso de mapas de produtividade das culturas tem sido aplicado em maior escala (MOLIN, 2002; SANTI et al., 2013). A premissa básica dessa metodologia basea-se no fato da produtividade ser um parâmetro que reflete a resposta de uma gama de fatores que estão atuando de forma conjunta durante todo o ciclo das plantas (MOORE, 1998). O sucesso da delimitação das ZM depende da consistência espacial e temporal dos mapas (MALLARINO e WITTRY, 2001; MOLIN, 2002; SANTI et al., 2013), sendo recomendado pelo menos o uso de mapas de produtividade de três safras, preferencialmente com diferentes culturas (SANTI et al., 2013). Associados com dados de solo, ou considerados isoladamente, dados altimétricos também têm sido utilizados como referencia para delimitar ZM (MALLARINO e WITTRY, 2004; GELDERMAN et al., 2006) contudo, para sua eficiência a área deve apresentar significativas diferenças de elevação (ALBA et al., 2011).

Alguns estudos realizados nos EUA em que compararam a utilização de grades amostrais com ZM delimitadas por levantamentos do tipo de solo observaram que a grade amostral apresentou maior eficiência, possibilitando identificar a variabilidade espacial dos atributos do solo com maior acurácia (FRANZEN e PECK,

1995; MALLARINO e WITTRY, 2004). No Brasil apesar das ZM estarem consistentemente suportadas na teoria (MOLIN, 2002; SUSZEK et al., 2011; SANTI et al., 2012; 2013; MOLIN et al., 2015), ainda não existem estudos de campo comprovando sua eficiência para orientar amostragens de solo.

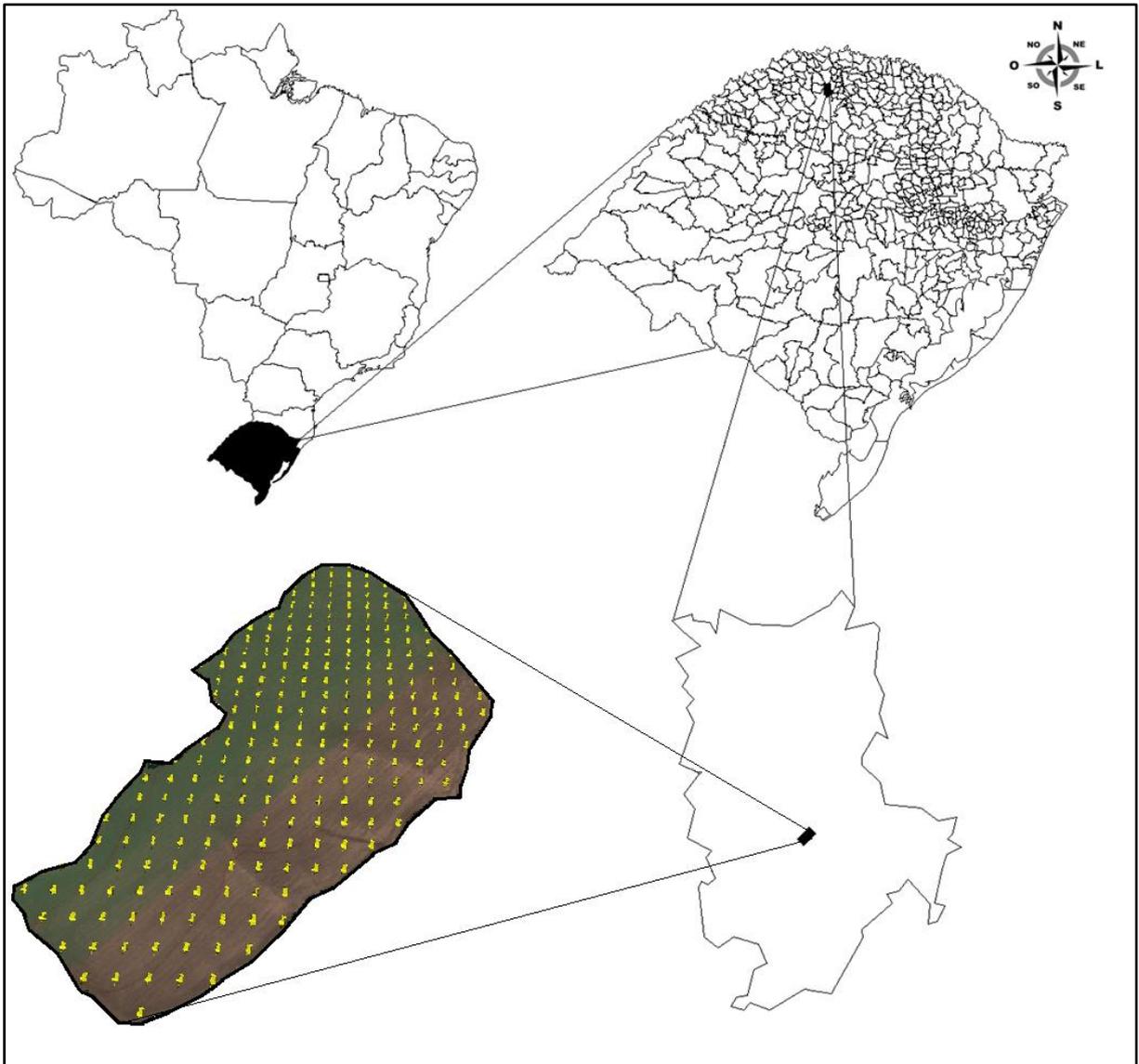
Estima-se que dos erros de aplicação de insumos na agricultura, em torno de 80 a 85% estão relacionados a problemas no planejamento e execução das amostragens de solo (SIQUIERA et al., 2010). Sendo assim, é essencial o estudo de diferentes metodologias passíveis de serem utilizadas para o levantamento da variabilidade espacial dos atributos do solo. A hipótese testada neste trabalho é de que a utilização de ZM pode ser uma técnica com eficiência equivalente a amostragem em grades e convencional para orientar amostragens georreferenciada de solo em áreas com histórico de uso das ferramentas de AP no manejo da fertilidade do solo. Objetivou-se com este estudo avaliar a eficiência técnica do mapeamento dos atributos químicos do solo através da amostragem convencional, grades amostrais e ZM delimitadas por distintas metodologias.

## **2.4 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi conduzido em uma área irrigada de 118 ha, localizada no município de Boa Vista das Missões - RS, entre as coordenadas 27°72'55" S e longitude: 53°33'13" O (Figura 1). O clima da região é subtropical de primavera úmida (ST PU) com temperatura média anual de 18,1 °C e precipitação pluvial anual de 1.919 mm ano<sup>-1</sup> (MALUF, 2000).

O solo em toda a área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013), com textura argilosa (> 60%), o relevo predominante da região é suave ondulado. A área experimental é manejada sob sistema plantio direto (SPD) há mais de 20 anos, sendo utilizado algumas ferramentas de AP como a amostragem georreferenciada de solo, piloto automático, aplicação de fertilizantes e corretivos a taxa variada plena e monitoramento da produtividade há 8 anos. Um breve histórico das doses médias de fertilizantes aplicados, das culturas e suas respectivas produtividades são apresentados na Tabela 1.

Figura 1 – Detalhes da localização da área de estudo, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



A partir das informações obtidas previamente no talhão foram delimitadas ZM utilizando duas metodologias, sendo elas em função da produtividade de grãos e da altitude. Cada ZM foi representada pela média dos valores de 5 pontos amostrais. A delimitação das ZM a partir da produtividade de grãos foi efetuada com as seguintes culturas: Aveia (2010), soja (2010/11), trigo (2013) e soja (2014/15), tais culturas e seus respectivos anos foram escolhidos em função de estes mapas não terem sofrido perdas no momento do armazenamento dos dados, e de ser a mesma cultura semeada em todo o talhão (Figura 2). Os dados de produtividade passaram inicialmente por um processo de filtragem para remoção de erros, tais como pontos

com coordenadas erradas e/ou repetidas e dados com produtividades improváveis, tal como descrito em Santi et al. (2013).

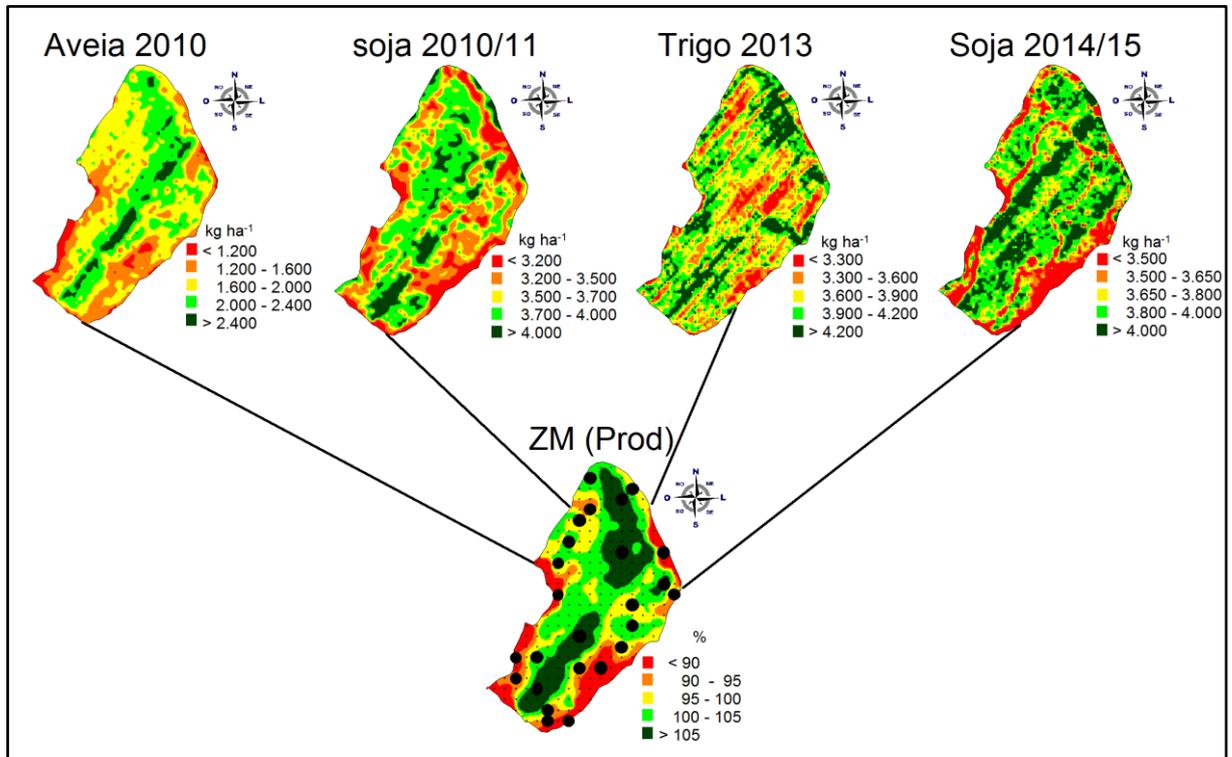
Tabela 1 – Histórico de culturas e de aplicação de fertilizantes e corretivos no talhão, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

Ano	Cultura	Dose média de fertilizantes e corretivo kg ha <sup>-1</sup>	Prod kg ha <sup>-1</sup>
-----Inverno-----			
2008	Aveia preta	5000 kg de calcário	-
2009	Aveia branca	120 kg 11-52-00 + 100 kg 45-00-00	1.680
2010	Aveia branca	90 kg 05-20-20	2.120
2011	Aveia preta	Sem adubação	-
2012	Aveia branca	Sem adubação	-
2013	Nabo + Trigo	110 kg 18-46-00 + 100 kg 00-00-60 + 200 kg 45-00-00	3.060
2014	Aveia preta	300 kg 01-18-00	-
2014	Aveia preta + Nabo	300 kg 01-18-00	-
-----Verão-----			
2008	Milho	180 kg 11-52-00 +100 kg 00-00-60 + 280 kg 30-00-20	6.420
2009	Soja	330 kg 02-25-15	3.660
2010	Soja	155 kg 11-52-00 + 100 kg 00-00-60	4.080
2011	Soja	120 kg 18-46-00 + 100 kg 00-00-60 + 4000 kg calcário	2.160
2012	Milho	140 kg 18-46-00 + 130 kg 00-00-60 + 200 kg 45-00-00	7.500
2013	Soja	150 kg 11-52-00 + 130 kg 00-00-60	3.660
2014	Soja	150 kg 11-52-00 + 200 kg 00-00-60	3.720
2014	Milho	200 kg 11-52-00 + 200 kg 00-00-60 + 600 kg 45-00-00	12.300

A altitude da área foi obtida a partir do DGPS integrado na colhedora Case<sup>®</sup>. A área experimental apresentou altitude variando de 518 a 560 m, sendo a sua amplitude dividida em quatro ZM (Figura 3).

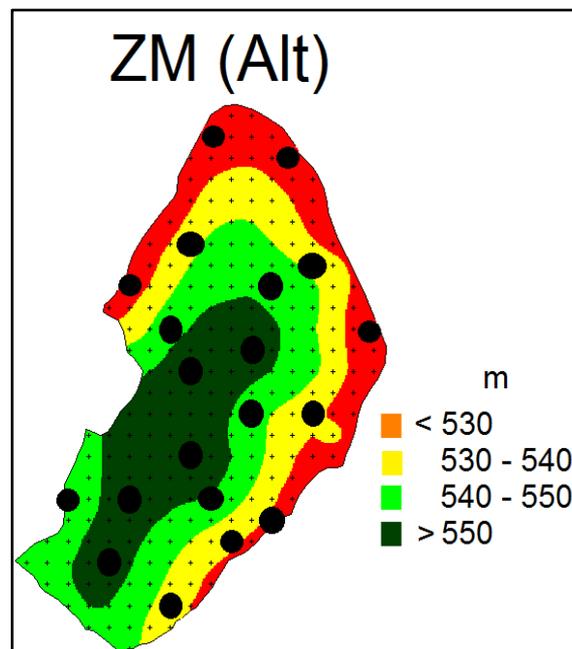
Para realizar a amostragem georreferenciada usando grade amostral, a área experimental foi inicialmente vetorizada a partir da demarcação do perímetro da mesma, utilizando um aparelho de GPS (Garmin<sup>®</sup>, modelo Legend) de navegação portátil. Na sequência, foi sobreposta sobre a área uma grade amostral de 0,5 ha onde se procedeu a coleta das amostras de solo em maio de 2015. As amostras foram coletadas com um quadríciclo equipado com trado de rosca impulsionado por acionamento hidráulico, em uma profundidade de 0,00 – 0,15 m. No perímetro de um raio de 10 m do ponto central de cada célula foram coletadas 14 subamostras para compor uma amostra composta. Após a coleta as amostras foram identificadas e encaminhadas ao laboratório para análise de P, K (Mehlich 1) e pH (água), segundo as metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

Figura 2 – Mapas temáticos de produtividade de grãos utilizados para delimitação das zonas de manejo, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



A partir da grade amostral inicial de 0,5 ha (70,71 m x 70,71 m, 243 pontos), utilizando a técnica de eliminação sistemática de pontos foi simulada as seguintes grades amostrais: 1 ha (141,42 m x 70,72 m, 119 pontos), 2 ha (141,42 m x 141,42 m, 60 pontos), 3 ha (212,14 m x 141,42 m, 42 pontos) e 4,5 ha (212,14 m x 212,14 m, 29 pontos) (Figura 4). Realizou-se a simulação da realização de uma amostragem convencional aonde se dividiu a área em 5 subtalhões (Figura 5), afim de que uma amostra não representa-se mais de 30 ha, em cada subtalhão utilizou-se 5 pontos amostrais para representar a sua média. Ainda simulou-se a realização de uma amostragem convencional simplificada (CS) aonde uma amostra representaria toda a área, para isso 12 pontos amostrais dispostos em um esquema de zigue-zague foram selecionados para compor a amostra composta para representar o talhão (118,9 ha).

Figura 3 - Mapa temático da altitude da área experimental com a subdivisão das zonas de manejo, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

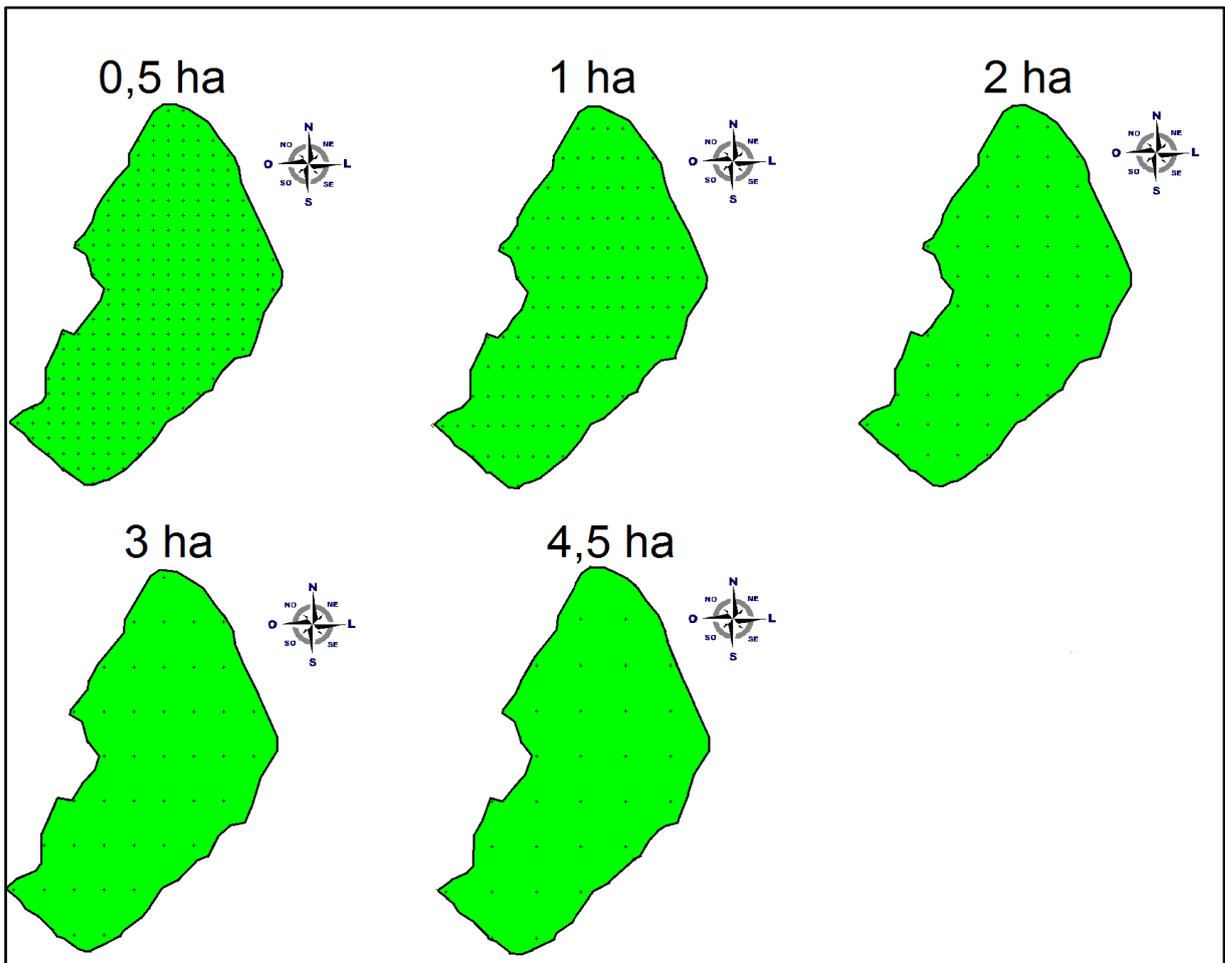


Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística exploratória, obtendo-se medidas de posição (mínimo, média e máximo) e de dispersão (desvio padrão, coeficientes de variação (CV%), simetria e de curtose). Os valores de CV foram classificados como de variabilidade baixa ( $CV < 10\%$ ), média ( $10 < CV < 20\%$ ), alta ( $20 < CV < 30\%$ ) e muito alta ( $CV > 30\%$ ) segundo classificação proposta por Pimentel-Gomes e Garcia (2002). A hipótese de normalidade foi testada pelo teste W a 5% de significância (SHAPIRO e WILK, 1965). As análises estatísticas descritivas e de correlação foram realizadas utilizando o programa computacional *Statistical Analysis System* – SAS 8.0 (SAS Inc, Cary, USA).

Para os dados oriundos da amostragem em grades amostrais realizou-se o ajuste de semivariogramas utilizando-se o programa GS+ (Version 9.0, Gamma Design Software, USA). Para o ajuste dos semivariogramas foram testados os modelos teóricos esférico, exponencial e gaussiano, procedendo-se a escolha entre os modelos baseada no maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e na menor soma de quadrados de resíduos (SQR) obtida pela técnica da validação cruzada, obtendo-se a partir dos modelos os parâmetros geoestatísticos alcance (a), efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ) e patamar (C). O grau de dependência espacial (GDE) dos dados foi verificada a partir da equação  $[(C_0/(C_0+C_1))*100]$  e classificados segundo

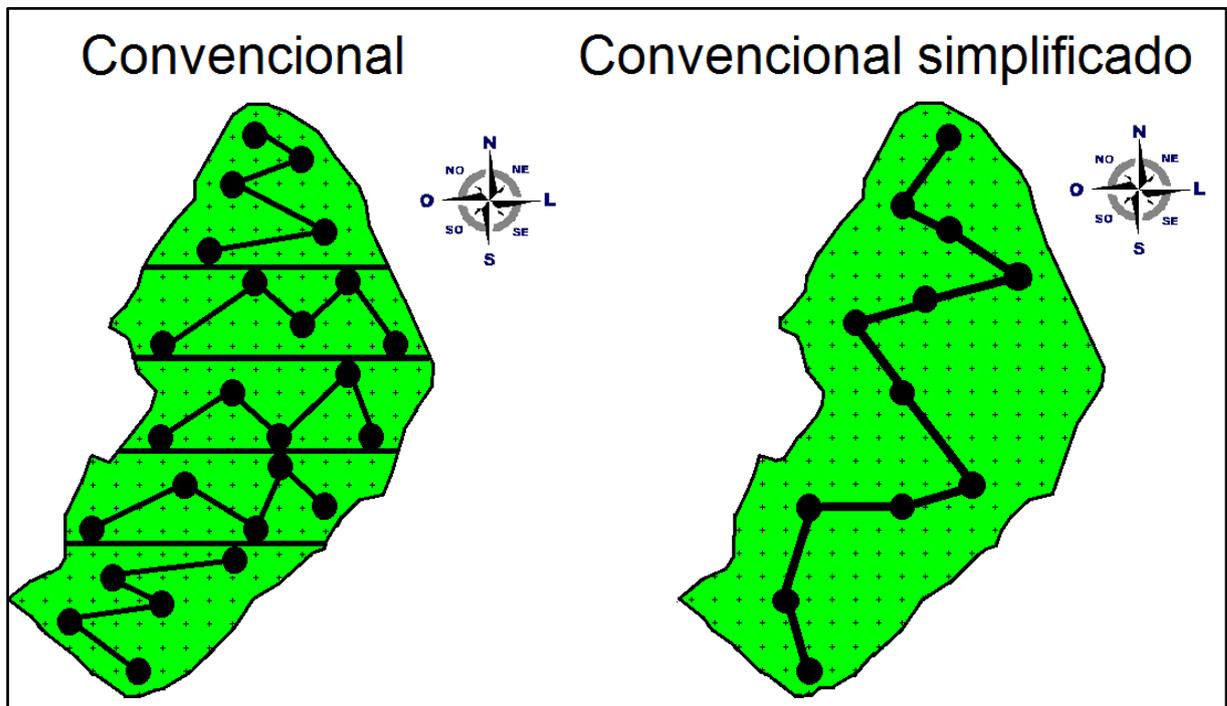
recomendações de Cambardella et al. (1994) como forte, para  $GDE \leq 25\%$ ; moderado, para  $GDE$  entre 25 e 75%, e fraco, para  $GDE > 75\%$ .

Figura 4 – Área experimental com as grade amostrais, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



A confecção dos mapas temáticos foi realizada com o auxílio do programa computacional CR-Campeiro 7 (Departamento de Geomática, Universidade Federal de Santa Maria, RS), utilizando-se como interpolador estocástico a krigagem para os dados com estrutura espacial definida (VIEIRA, 2000), e como interpolador determinístico o inverso ao quadrado da distância para os dados que não obtiveram ajuste satisfatório a nem um dos modelos teóricos testados (efeito pepita puro – EPP). Considerou-se como estrutura espacial definida quando se obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior que 0,60.

Figura 5 – Área experimental com os pontos utilizados para simular a amostragem convencional e convencional simplificada, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



Para avaliar a influência do uso das diferentes grades amostrais na acurácia dos mapas temáticos utilizaram-se dois métodos, sendo eles, a matriz de correlação linear simples de Pearson ( $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ) e o coeficiente de desvio relativo (CDR%). Para a utilização desses métodos identificou-se em cada grade os valores interpolados correspondentes à grade referencia de 243 (0,5 ha) igualando o conjunto de dados ( $n$ ) para todos os mapas gerados. O CDR, expressa a dissimilaridade de dois mapas, em módulo, existente entre os pontos interpolados em cada mapa. O cálculo é realizado por meio da equação utilizada por Coelho et al. (2009) e Cherubin et al. (2015).

$$\text{CDR} = \sum [(T_{ij} - T_{iref}) / T_{iref}] * (100 / n) \quad (1)$$

Onde:  $n$ : Número de pontos interpolados ( $n = 243$  pontos),  $T_{iref}$ : Teor referência do nutriente no ponto  $i$  (teor do nutriente obtido na grade amostral de 0,5 ha);  $T_{ij}$ : Teor do nutriente no ponto  $i$  amostrado nos diferentes métodos de amostragem de solo.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1 Análise exploratória dos dados

Os resultados obtidos na análise estatística descritiva demonstraram comportamentos semelhantes entre P e K, em virtude disso, eles serão discutidos de forma conjunta (Tabela 2). Em todos os esquemas de amostragem avaliados os valores médios foram em torno de  $13 \text{ mg dm}^{-3}$  para P e  $190 \text{ mg dm}^{-3}$  para K, valores nesse classificados como muito altos pelo Manual de Adubação e Calagem (CQFS - RS/SC, 2004). Esse resultado pode estar atrelado ao histórico de manejo da fertilidade do solo utilizando ferramentas de AP, a qual proporcionou a elevação dos teores dos nutriente até o nível desejado na maior parte da área. Esses resultados demonstram que caso o objetivo da amostragem fosse realizar uma aplicação de fertilizante em taxa fixa os diferente esquemas de amostragem não resultariam em diferenças significativas. Peters e Laboski (2013) citaram que quando os atributos médios estão com níveis muito altos como o do presente estudo, o solo é classificado em sua grande parte como não responsivo às adubações, resultando na redução da eficiência de utilização das ferramentas de AP.

No entanto, houve elevada diferença dos valores mínimos e máximos entre os esquemas de amostragem, principalmente entre as amostragens em ZM e convencional com as grades amostrais, havendo redução significativa da amplitude dos dados amostrados de forma convencional, CS e ZM, ficando os valores extremos mais próximos dos valores médios, podendo esse resultado ser explicado pelo pequeno número de amostras coletadas (5 amostras). A redução da amplitude dos dados resulta na subestimação da real variabilidade espacial da área, ocasionando erros de interpretação e, conseqüentemente, das recomendações. Esses resultados foram consistentes aos reportados por Cherubin et al. (2015), onde estudando o impacto de diferentes dimensões de grades amostrais verificaram que grades de menor dimensão possibilitam a identificação de subáreas com valores extremos de P e K, as quais podem ser subáreas que apresentam restrições ao desenvolvimento das culturas.

Tabela 2 - Análise estatística descritiva dos dados de fósforo, potássio e pH amostrados de forma convencional (Conv), convencional simplificado (Simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitadas pela produtividade (Prod) de grãos e altitude (Alt) da área, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

FV	Grade amostral					Zona de manejo		Conv	Conv Simp
	0,5	1	2	3	4,5	Alt	Prod		
N <sup>(1)</sup>	243	119	60	42	29	4	5	5	1
-----Fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )-----									
Mínimo	3,30	5,60	5,60	5,60	5,60	11,70	9,68	10,54	-
Média	12,82	13,11	12,92	12,76	12,91	13,04	11,70	12,85	14,04
Máximo	22,00	22,00	22,00	22,00	20,00	14,06	14,56	16,00	-
DP	3,96	3,95	4,07	3,99	3,84	1,07	2,21	2,15	-
CV	30,90	30,12	31,46	31,27	29,74	8,22	18,91	16,76	-
Cs	0,17	0,28	0,36	0,48	0,05	-	-	-	-
Ck	-0,45	-0,48	-0,37	-0,16	-0,82	-	-	-	-
W <sub>(2)</sub>	0,99 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>ns</sup>	0,97*	0,97*	0,97*	-	-	-	-
-----Potássio (mg dm <sup>-3</sup> )-----									
Mínimo	96,00	102,00	107,00	107,00	115,00	182,20	150,80	158,4	-
Média	194,58	191,05	191,02	190,10	204,59	190,76	184,25	203,88	176,50
Máximo	353,00	338,00	315,00	336,00	338,00	203	199,60	251,8	-
DP	52,71	50,79	52,88	57,38	59,17	10,73	22,50	37,47	-
CV	27,09	26,58	27,69	30,19	28,92	5,62	12,21	18,38	-
Cs	0,58	0,47	0,47	0,66	0,44	-	-	-	-
Ck	0,03	-0,20	-0,45	-0,22	-0,50	-	-	-	-
W	0,97 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	0,96 <sup>ns</sup>	0,95*	0,96*	-	-	-	-
-----pH (água)-----									
Mínimo	4,50	4,80	4,80	4,90	4,80	5,14	5,22	5,26	-
Média	5,31	5,30	5,30	5,27	5,26	5,30	5,33	5,36	5,33
Máximo	6,10	5,70	5,70	5,80	5,60	5,48	5,46	5,44	-
DP	0,22	0,20	0,19	0,22	0,22	0,12	0,11	0,07	-
CV	4,21	3,76	3,68	4,17	4,22	2,27	2,07	1,21	-
Cs	0,00	-0,21	-0,18	0,36	0,04	-	-	-	-
Ck	0,60	-0,28	-0,26	-0,45	-0,68	-	-	-	-
W	0,98 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	0,97*	0,95*	0,93*	-	-	-	-

(1) n: Número de observações (pontos amostrais); DP: Desvio padrão; CV (%): Coeficiente de precisão; Cs: Coeficiente de assimetria; Ck: Coeficiente de curtose; (2) Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (\*) significativo em níveis de  $p < 0,05$  e (ns) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Para P em todos os esquemas de amostragem os CVs foram classificados como muito altos (>30%) (PIMENTEL GOMEZ e GARCIA, 2002), com excessão da grade de 4,5 ha que foi alto (20>CV<30%). Elevada dispersão dos dados de P é amplamente reportado na literatura (NANNI et al., 2011; SANTI et al., 2012; CHERUBIN et al., 2014, 2015), estando atrelado às sucessivas aplicações de fertilizantes na linha de semeadura as quais elevam a variabilidade espacial tanto em macro quanto em micro escala (RODRIGUES et al., 2012; CHERUBIN et al.,

2015). A obtenção de elevados valores de CV são indicativos da existência de alta variabilidade espacial do atributo na área (OLIVEIRA et al., 2015), o que, conseqüentemente, irá exigir a utilização de planos de amostragem com maior número de amostras para reproduzir com fidelidade a variabilidade espacial dos atributos em locais não amostrados (SIQUEIRA et al., 2014).

Para K amostrado em grades os valores de CV variaram de 26,6 a 30,2%, indicando que a dispersão dos dados foi de alta a muito alta (PIMENTEL GOMES e GARCIA, 2002). Rogrigues et al. (2012) observaram valores de CV semelhantes ao do presente estudo, sendo situados de 24 a 36%. A obtenção de CV muito alto para K pode ser explicado pela elevada quantidade desse fertilizante aplicada no solo, pela variabilidade espacial das quantidades absorvida e exportada pelas culturas ao longo da lavoura (RODRIGUES et al., 2012), além da elevada dinâmica que esse nutriente apresenta no solo, podendo se ter subáreas do talhão que favorecem a sua perda para o sistema seja por lixiviação ou erosão, resultando na elevação da variabilidade do elemento.

Nas amostragens em ZM e convencional os dados de P e K apresentaram ampla redução da dispersão, o que se deve ao pequeno número de amostras (4 e 5) nesses esquemas de amostragem. Para a ZM (Alt) os CVs foram classificados como baixos ( $<10\%$ ) já para a ZM (prod) e convencional como médios ( $10 > CV < 20\%$ ). A partir dos valores de assimetria e curtose é possível visualizar o comportamento do conjunto de dados com relação à media, sendo que pelo teste W constatou-se a existencia de normalidade apenas para os dados coletados através das grades amostrais de 0,5 e 1 ha. A existencia de normalidade não é uma exigência para análises geoestatística, no entanto, é altamente desejável pois os parâmetros do semivariograma tendem a ser mais confiáveis nesses casos (WEBSTER e OLIVER, 2007).

Os valores médios de pH em todos os esquemas de amostragem foram próximos de 5,30. Entretanto, constatou-se variações significativas na amplitude dos dados coletados na amostragem realizada na grade de 0,5 ha (variação de 4,5 a 6,1) comparado com os dados coletados em ZM (variação de 5,14 a 5,48). A área de maneira geral, apresentou moderada acidez, necessitando de correções em praticamente toda sua extensão. Mesmo após anos de cultivo utilizando-se as ferramentas de amostragens georreferenciada de solo ainda não se conseguiu atingir os níveis de pH desejados (5,5 - 6,0). Em partes o baixo valor de pH está

atrelado às características intrínsecas dos Latossolos, os quais são predominantemente ácidos (CQFS – RS/SC, 2004). A acidificação dos solos é um processo natural, porém práticas utilizadas na área de estudo como a aplicação de elevadas quantidades de fertilizante nitrogenados e a utilização de irrigação, a qual promove o aumento das lixiviações de bases, elevam a intensidade desse processo (KAMINSKI e RHEINHEIMER, 2000; AMADO e SANTI, 2007; PETERS e LABOSKI, 2013).

A dispersão dos dados de pH foi classificada como baixa ( $CV < 5\%$ ) para todas as estratégias de amostragem. Hansel et al. (2012) estudando a variabilidade espacial e temporal do pH também observaram baixos valores de CV para este atributo. Para o pH, assim como para os demais atributos houve normalidade dos dados apenas para as duas grades com maior número de pontos (0,5 e 1 ha). Observou-se que P e K apresentaram maior variação dos seus dados em relação ao pH, demonstrando, portanto maior potencial de uso das ferramentas de AP nesses atributos (PETERS e LABOSKI, 2013). No entanto, esses parâmetros são os que apresentam maior dificuldade em se definir a sua variabilidade espacial, necessitando conseqüentemente, um maior número de amostras (SCHIMIDT et al., 2002).

### **2.5.2 Análise geoestatística dos dados amostrados em grades**

Observa-se que para os dados de P amostrado nas grades de 0,5, 1 e 4,5 ha, os dados se ajustaram ao modelo exponencial (Tabela 3), já na grade de 2 ha ao modelo gaussiano, diferentemente de Cherubin et al. (2015) onde observaram que todos os dados de P coletados em diferentes grades se ajustaram ao modelo esférico. No presente estudo, não se obteve nenhum modelo predominante. Souza et al. (2014) também observaram que com a redução do número de amostras outros modelos passaram a ter melhores ajustes aos novos conjuntos de dados.

Nenhum modelo se adequou aos dados coletados através da grade de 3 ha, obtendo-se, portanto, efeito pepita puro (EPP) (ausência de dependência espacial). Na prática, tal resultado indica que a utilização da krigagem nesse conjunto de dados não será uma ferramenta eficiente para estimar os valores do atributo em locais não amostrados. A obtenção de efeito pepita puro também foi verificada por Cherubin et al., (2015) nas grades com maiores dimensões. Os autores aliaram tal

resultado ao aumento da distância entre pontos e a conseqüente redução do número de pontos amostrados, gerando número de pares insuficiente para ajustar os dados à um modelo teórico com acurácia.

Para os dados amostrados na grade de 4,5 ha houve dependência espacial, no entanto, esse resultado é distinto do esperado, pois como não observou-se dependência espacial para os dados amostrados na grade de 3 ha poderia se pressupor que o P amostrado na grade de 4,5 ha também não apresentaria estrutura espacial definida. Por outro lado, vários autores citam que para a construção de um semivariograma confiável deve haver pelo menos 50 pontos amostrais para a sua estruturação (WEBSTER e OLIVER, 2007), o que se obteve no presente estudo, apenas até a grade amostral de 2 ha (60 pontos).

Tabela 3 - Análise geoestatística dos dados de fósforo, potássio e pH amostrados em diferentes grades amostrais, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

Parâmetros	Grade amostral				
	0,5	1	2	3	4,5
N	243	119	60	42	29
-----Fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )-----					
EP	4,58	5,00	10,82	EPP	4,55
Patamar	21,23	23,15	23,52	EPP	17,16
Alcance (m)	1404,00	1896,00	1378,71	EPP	927,00
Modelo	Exponencial	Exponencial	Gaussiano	EPP	Exponencial
R <sup>2</sup>	0,99	0,94	0,86	EPP	0,82
IDE (%)	21,57	21,60	46,00	EPP	26,52
GDE	Forte	Forte	Moderado	EPP	Moderado
-----Potássio (mg dm <sup>-3</sup> )-----					
EP	1726,00	1271,00	2085,00	710,00	1490,00
Patamar	3837,00	3827,00	4171,00	4336,00	7090,00
Alcance (m)	1221,10	1694,00	4419,00	1035,00	2625,00
Modelo	Gaussiano	Esférico	Exponencial	Esférico	Esférico
R <sup>2</sup>	0,99	0,98	0,76	0,93	0,99
IDE (%)	44,98	33,21	49,99	16,37	21,02
GDE	Moderado	Moderado	Moderado	Forte	Forte
-----pH (H <sub>2</sub> O)-----					
EP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Patamar	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Alcance (m)	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Modelo	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
R <sup>2</sup>	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
IDE (%)	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
GDE	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP

N: Número de observações (pontos amostrais); IDE: Índice de dependência amostral; GDE: Grau de dependência espacial; EPP: Efeito pepita puro.

Os valores de alcance para P variaram de 1896 m na grade de 1 ha a 927 m na grade de 4,5 ha, o alcance representa a distância limite em que existe dependência espacial entre as amostras (VIEIRA, 2000; WEBSTER e OLIVER, 2007). Alguns autores como Kerry e Oliver (2004), Souza et al. (2014) e Oliveira et al. (2015) indicaram a utilização da metade do valor do alcance como a distância máxima entre pontos, podendo este parâmetro ser utilizado na definição de esquemas de amostragens futuras. Contudo, esse parâmetro não tem apresentado eficiência para todas as situações, assim como no presente estudo em que os valores de alcance foram muito elevados. Cherubin et al. (2015) já citaram a necessidade de cautela no uso dessa recomendação, pois a sua utilização pode resultar na escolha de planos de amostragem com poucos pontos, comprometendo a confiabilidade dos resultados.

Para todos os conjuntos de dados que apresentaram estrutura espacial definida os valores de  $R^2$  foram elevados ( $>0,80$ ), demonstrando que os modelos teóricos escolhidos, obtiveram bons ajustes aos conjuntos de dados. Porém, assim como observado por Bottega et al. (2014) com o aumento da dimensão da grade amostral houve, conseqüentemente, a redução dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ). A dependência espacial foi classificada como forte para as grades de 0,5 e 1 ha e moderado para as grades de 2 e 4,5 ha (CAMBARDELA et al., 1994). Quanto mais forte for a dependência espacial, melhor serão as predições dos nutrientes realizadas pela krigagem em locais não amostrados (KRAVCHENKO, 2003), pois segundo Pautsch et al. (1998) há menores contribuições de componentes aleatórios na variabilidade dos dados.

Em todas as grade amostrais os dados de K apresentaram dependência espacial. Para os dados coletados através das grades de 1, 3 e 4,5 ha o modelo com melhor ajuste foi o esférico, já para a grade de 0,5 ha o modelo ajustado foi o gaussiano e para a grade de 2 ha o exponencial. Os valores de alcances foram bastante elevados ( $>1000$  m), próximos aos obtidos para o P, podendo-se inferir que a variabilidade espacial entre os atributos é semelhante (OLIVEIRA et al., 2015). Em estudos desta natureza, com excessão do trabalho de Souza et al. (2014) em que observaram aumento dos valores de alcance com a elevação da dimensão da grade amostral, não tem sido observado um comportamento padrão dos valores de alcance (NANNI et al., 2011; CHERUBIN et al., 2015). Em todas as grades amostrais obteve-se elevados coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre o modelo teórico e o

conjunto de dados de K ( $>0,76$ ). A dependência espacial foi considerada como moderada para as grades de 0,5, 1 e 2 ha e forte para as de maior dimensões (3 e 4,5 ha).

Independente da grade amostral utilizada, os dados de pH não apresentaram dependência espacial definida, sendo que para todos os conjuntos de dados foi obtido EPP (efeito pepita puro). A obtenção de EPP quando se tem um grande conjunto de dados, nem sempre indica que as amostras são independentes entre si, podendo tal fato ter ocorrido devido à pequena dimensão da variação dos dados, o que torna o método dos momentos utilizado para construção do semivariograma pouco eficiente na captação da variância estruturada dos dados (KERRY e OLIVER, 2008). Nesses casos, quando há ausência de dependência espacial dos dados impossibilita-se a utilização da krigagem para estimar valores em locais não amostrados (CHERUBIN et al., 2015), se fazendo necessário utilizar outros métodos de interpolação, como o inverso ao quadrado da distância, que na maioria dos casos são menos eficientes (COELHO et al., 2009; SOUZA et al., 2010).

### **2.5.3 Correlação e similaridade dos mapas temáticos**

A análise de correlação dos dados obtidos a partir dos diferentes esquemas amostrais com os advindos da grade amostral de 0,5 ha (referência) são apresentados na tabela 4. Observou-se, que mesmo os dados obtidos através da grade amostral de maior dimensão (4,5 ha) obtiveram coeficientes de correlação elevados quando comparado aos advindos dos esquemas de amostragem em ZM e convencional. Para os coeficientes de correlação dos dados amostrados em grades, obteve-se valores significativos ( $p < 0,01$ ) e superiores a 0,50 para todos os atributos. De maneira geral, houve redução dos coeficiente de correlação com o aumento da dimensão da grade amostral. Esses resultados são consistentes aos observados por Siqueira et al. (2014) para a saturação por bases amostrados em diferentes grades amostrais.

Para os dados obtidos pela amostragem em ZM o maior coeficiente de correlação foi de 0,33 o qual ocorreu para o pH na ZM (Alt), no entanto, para P não houve correlação significativa na ZM (Alt), assim como ocorreu para o pH na ZM (Prod). Os dados de P e K obtidos pela amostragem convencional apresentaram maiores correlações com a amostragem referencia do que as ZM. A obtenção de

baixos coeficiente de correlação entre os esquemas de amostragem com a referência (grade de 0,5 ha) podem indicar que o esquema de amostragem não foi eficiente em reproduzir a variabilidade espacial dos atributos (SIQUEIRA et al., 201).

Tabela 4 - Correlação linear de Pearson dos dados de fósforo, potássio, e pH amostrados de forma convencional (Conv), grades amostrais e zonas de manejo delimitadas por pela atitude e produtividade (Prod) com a grade de 0,5 ha, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

Atributos	-----Grade amostral-----				-----Zona de manejo-----		Conv
	1	2	3	4,5	Altitude	Prod	
P	0,93**	0,89**	0,82**	0,78**	0,01 <sup>ns</sup>	0,17*	0,41**
K	0,85**	0,70**	0,55**	0,61**	0,30**	0,34**	0,51**
pH	0,73**	0,59**	0,63**	0,54**	0,33**	0,01 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>

\*\* \*= Significativo ao nível de 1 e 5%, respectivamente. n= 243 pontos.

A partir da análise dos mapas pelo coeficiente de desvio relativo (CDR) (Tabela 5), visualiza-se que os menores desvios foram observados para os mapas gerados a partir dos dados amostrados em grades, estando concentrados os desvios de 8,74 a 15,23% para P, 8,6 a 15,21% para K e 1,53 a 2,16% para pH. Cherubin et al. (2015) em trabalho semelhante a este observaram valores de CDR superiores aos obtidos nesse estudo chegando a 36,2 e 19,4% para mapas de P e K, respectivamente.

Os resultados obtidos no presente estudos estão de acordo com os obtidos por Peters e Laboski (2013) em que citaram que para solos americanos em que os teores de P e K estão muito altos, recomenda-se a utilização de grade amostral variando de 0,8 a 1 ha, já quando os teores estão mais baixos e/ou não se conhece a variabilidade espacial dos atributos recomenda-se utilizar uma grade de 0,5 a 0,7 ha. Para P e K os mapas gerados a partir da amostragem convencional apresentaram CDR inferiores aos mapas obtidos pela amostragem CS e ZM, porém mais elevados que os obtidos para as grades amostrais. Para pH os valores de CDR obtidos pela amostragem convencional, CS e ZM foram semelhantes.

A maior diferença observada entre os resultados obtidos através do CDR e da análise de correlação linear foi de que no CDR os menores desvios foram obtidos para os dados de pH e os maiores para P e K, enquanto na análise de correlação observou-se o inverso. Isso se deve ao pH ter menor variação entre os valores do que os demais atributos, fazendo com que os coeficientes de correlação apresentem

tendência a serem mais baixos. A baixa variação existente nos dados coletados nas ZM devido aos poucos pontos analisados prejudicaram a análise de correlação, sendo portanto essa análise pouco eficiente para avaliar mapas elaborados a partir dessas estratégias de amostragem.

Tabela 5 – Coeficiente de desvio relativo dos mapas de fósforo, potássio e pH oriundos de amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt) com a grade amostral referência de 0,5 ha, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

Atributos	-----Grade amostral-----				----Zona de manejo---		Conv	Conv Simpl
	1	2	3	4,5	Prod	Altitude		
P	8,74	10,19	13,01	15,23	25,01	24,85	20,93	31,61
K	8,60	12,14	16,52	15,21	16,22	16,25	14,73	17,42
pH	1,53	1,98	2,07	2,16	2,54	2,33	2,78	2,39

Nas figuras 6, 7 e 8 são apresentados os mapas temáticos dos atributos P, K e pH, respectivamente. De maneira geral, o comportamento de todos os atributos foram semelhantes, e comprovaram os resultados obtidos no CDR e na correlação de Pearson. O aumento da grade amostral tornou os mapas mais generalista, ocasionando a perda de informações valiosas sobre a variabilidade espacial dos atributos. Cherubin et al., (2015) indicaram que quando pretende-se realizar aplicações a taxa variada plena deve se dar preferencia por grades amostrais mais densas, pois essas possibilitam um maior detalhamento da variabilidade espacial dos atributos do solo. Já as grades amostrais com maiores dimensões podem ser recomendadas quando se pretende realizar aplicações em zonas de manejo e/ou em taxa fixa.

Os mapas gerados com os dados obtidos através das grades de 0,5, 1 e 2 ha são visualmente semelhantes, já os das grades de 3 e 4,5 ha perderam qualidade quando comparados com os mapas referência. Os mapas temáticos gerados com os dados levantados a partir das ZM são totalmente distintos dos obtidos com as grades amostrais, não tendo se destacado nem um tipo de delimitação avaliado. Corroborando com os resultados apresentados neste estudo, Mallarino e Wittry, (2001) comparando diferentes métodos de amostragem também observaram que a utilização de grades amostrais densas tendem a representar melhor a variabilidade espacial dos atributos do solo.

Figura 3 - Mapas temáticos de fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) determinados pela amostragem convencional, convencional simplificado, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

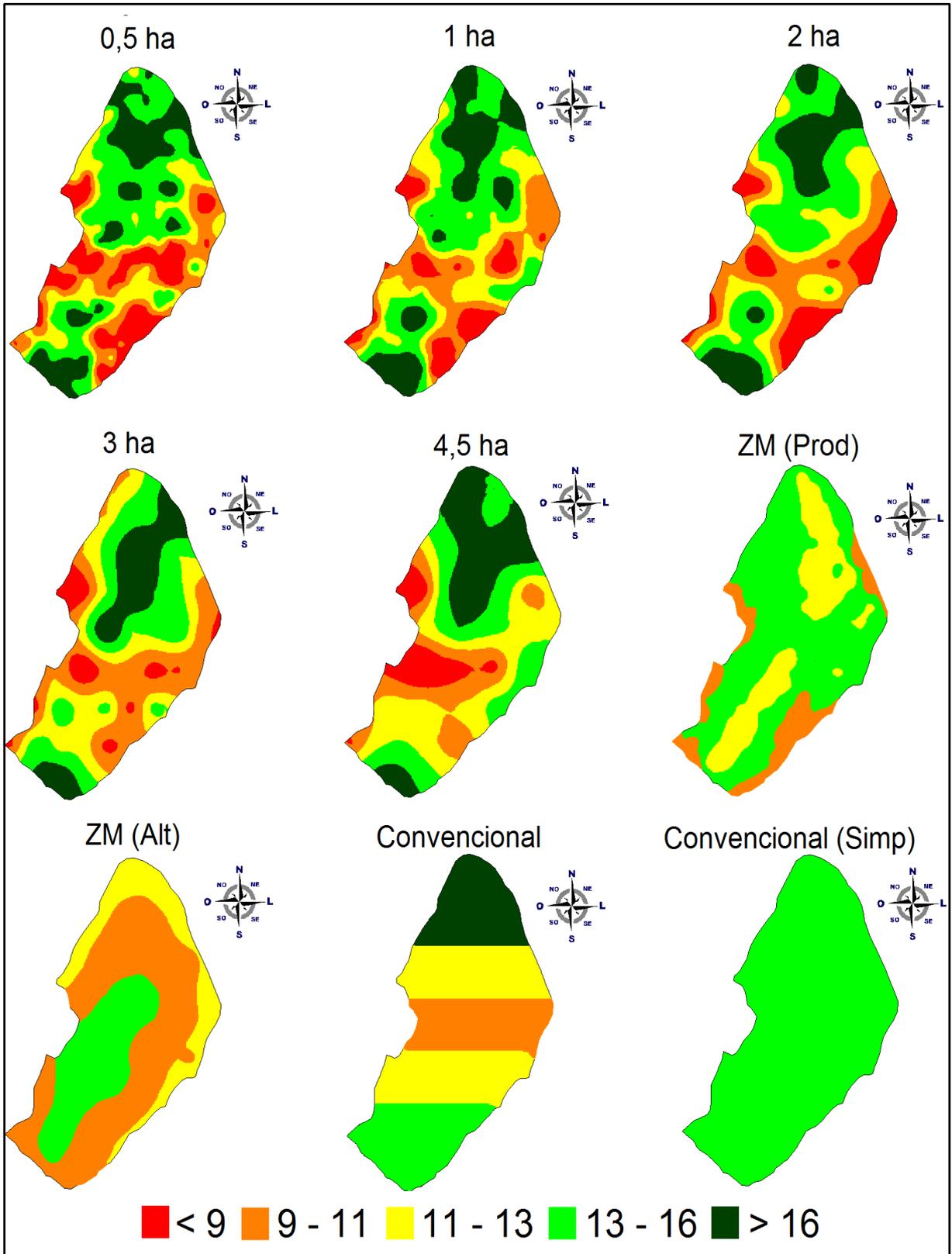


Figura 4 - Mapas temáticos de potássio ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) determinados pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

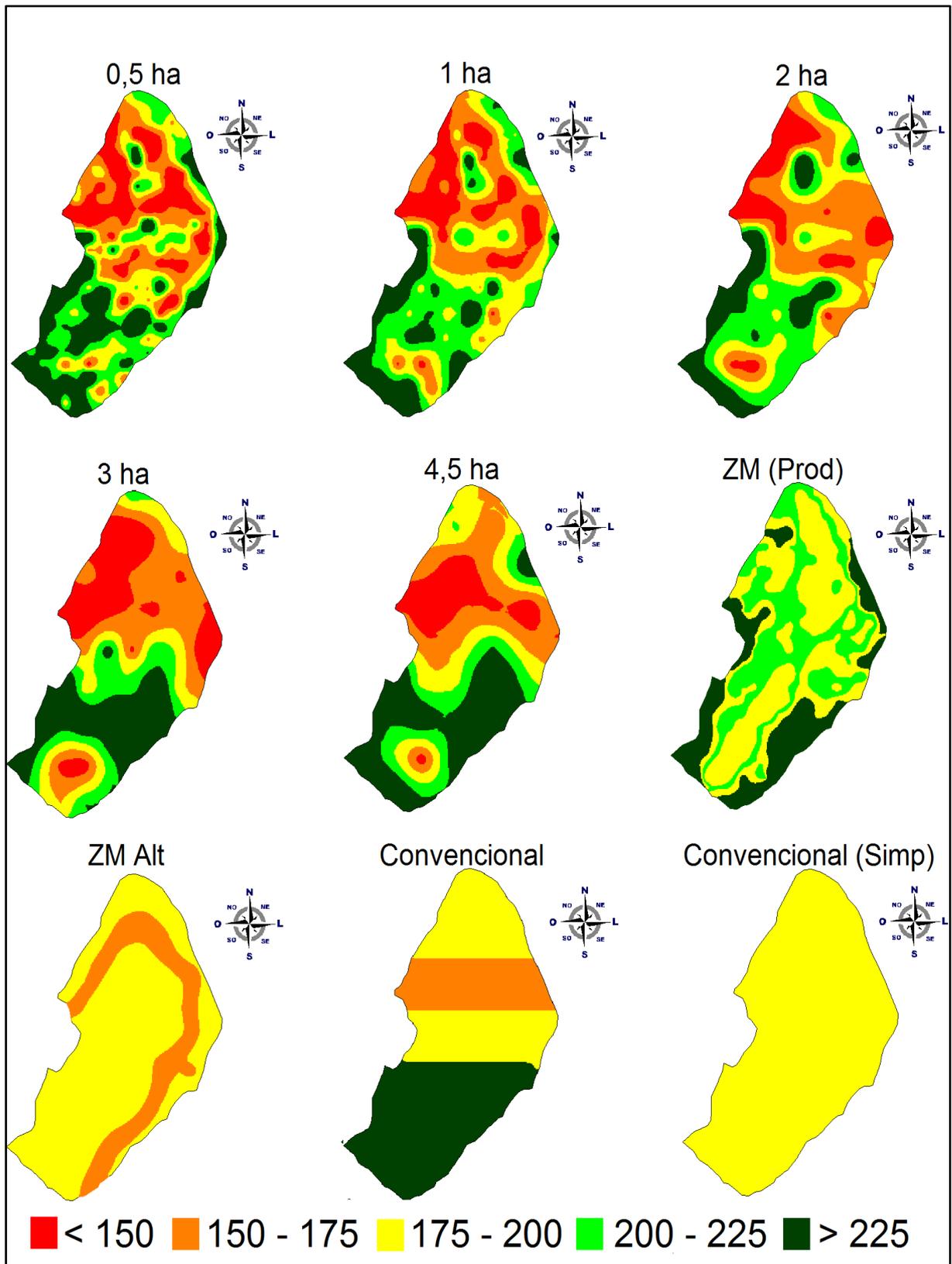
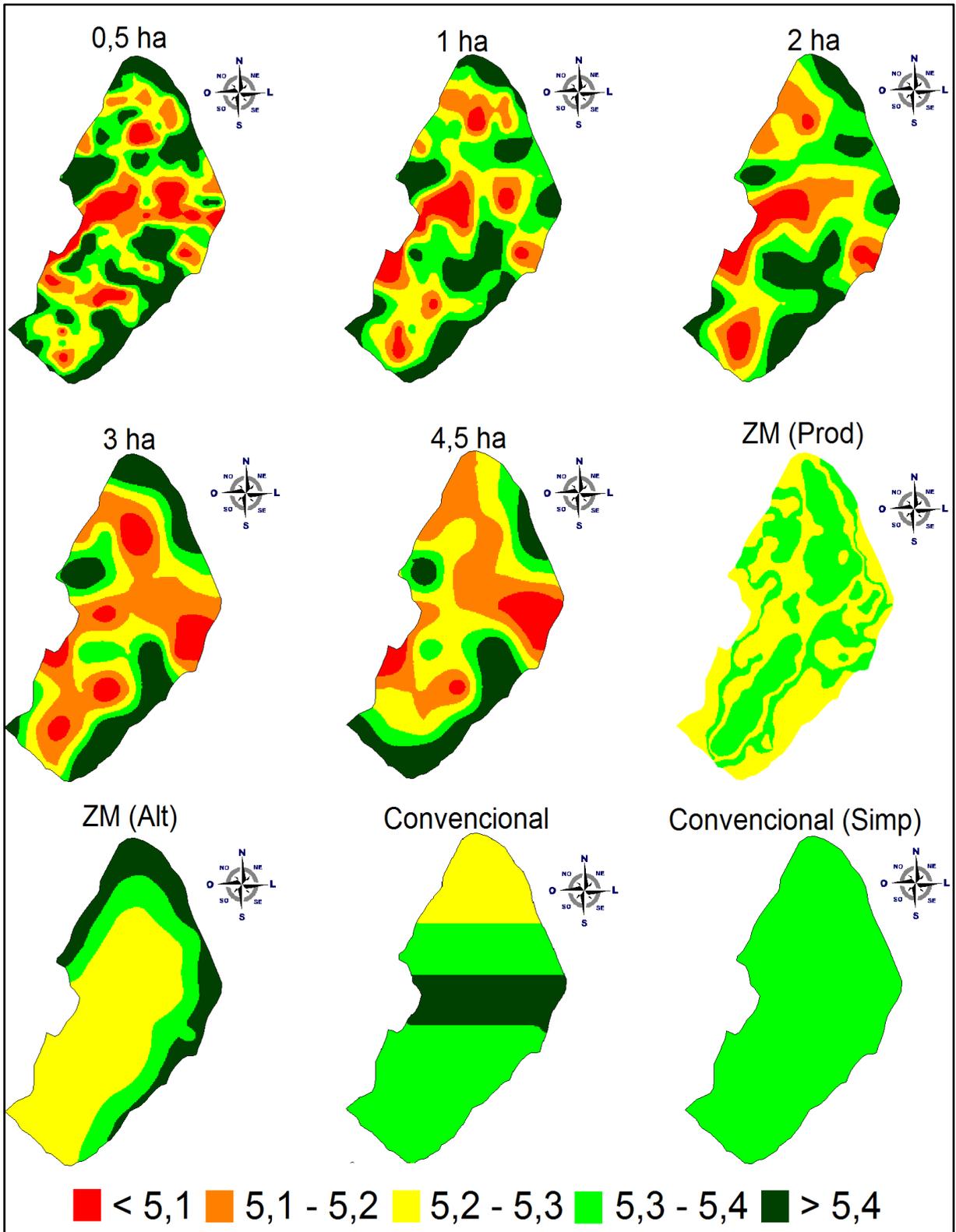


Figura 5 - Mapas temáticos de pH ( $H_2O$ ) determinados pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



Contudo, há, conseqüentemente, um maior custo atrelado a esse método, devendo-se realizar um estudo econômico a fim de compatibilizar a escolha do esquema de amostragem com os objetivos dos produtores, os autores citaram que a utilização de ZM é mais eficiente quando a variabilidade espacial dos atributos são devido ao tipo de solo e a quantidade de nutriente absorvido pelas culturas.

Os mapas gerados com os dados obtidos através das grades de 0,5, 1 e 2 ha são visualmente semelhantes, já os das grades de 3 e 4,5 ha perderam qualidade quando comparados com os mapas referência. Os mapas temáticos gerados com os dados levantados a partir das ZM são totalmente distintos dos obtidos com as grades amostrais, não tendo se destacado nem um tipo de delimitação avaliado. Corroborando com os resultados apresentados neste estudo, Mallarino e Wittry, (2001) comparando diferentes métodos de amostragem também observaram que a utilização de grades amostrais densas tendem a representar melhor a variabilidade espacial dos atributos do solo. Contudo, há, conseqüentemente, um maior custo atrelado a esse método, devendo-se realizar um estudo econômico a fim de compatibilizar a escolha do esquema de amostragem com os objetivos dos produtores, os autores citaram que a utilização de ZM é mais eficiente quando a variabilidade espacial dos atributos são devido ao tipo de solo e a quantidade de nutriente absorvido pelas culturas.

Conforme relatado por Delden et al. (2011) e Cherubin et al. (2015) para se ter eficiência nos levantamentos da variabilidade espacial dos atributos do solo e nas intervenções que serão realizadas, é essencial a utilização de grades amostrais densas que proporcionem a obtenção de elevado nível de detalhamento dos atributos. A utilização de ZM pode ser eficiente quando pretende-se investigar de uma forma mais exploratória possíveis atributos de solo que estejam limitando a produtividade das culturas, pois possibilitam a avaliação de uma ampla gama de potenciais indicadores físicos, químicos e biológicos do solo (SANTI et al., 2012). No manejo da fertilidade do solo utilizando AP, mesmo que se utilize grades amostrais densas, continua-se a utilizar a média da célula para gerar uma recomendação. Sendo assim, uma alternativa para realizar agricultura com um maior nível de precisão poderá ser o uso de sensores em tempo real (espectroscopia) que propiciem a realização de um denso mapeamento de atributos de solo como P, K e pH, aliado a um baixo custo, assim como tem sido utilizado para recomendar as

aplicações em cobertura de fertilizantes nitrogenados nas culturas agrícolas (BRAGAGNOLO et al., 2013).

## 2.6 CONCLUSÕES

O aumento da dimensão da grade amostral resultou na redução da amplitude do conjunto de dados e, conseqüentemente, em perdas de informações sobre a variabilidade espacial dos atributos. Assim, recomenda-se a utilização de malhas amostrais de no máximo 1 ha para obter mapeamento dos atributos químicos do solo com maior acurácia.

A amostragem em grades amostrais mostrou-se mais eficiente do que os demais esquemas de amostragem. Contudo, entre os atributos químicos do solo avaliados a amostragem em ZM, convencional e CS mostraram maior eficiência para o pH em virtude do menor coeficiente de variação.

Nenhuma das formas de delimitação das ZM mostrou-se eficaz para orientar amostragem georreferenciada de solo, sendo os seus níveis de acerto inferiores a amostragem convencional e equivalentes a amostragem CS.

## 2.7 AGRADECIMENTOS

A Fazenda Vila Morena, pertencente ao Grupo Schaedler pela disponibilização da área de estudo. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

## 2.8 REFERÊNCIAS

ALBA, J. P. et al. Agricultura de precisão: Mapas de rendimento e de atributos de solo analisados em três dimensões. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 29-41, 2011.

AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L. Agricultura de precisão aplicada ao aprimoramento do manejo do solo. In: FIORIN, J. E. (Ed.). **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Passo Fundo; Berthier, 2007. Cap. 6, p. 99-144.

BRAGAGNOLO, J.; et al. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: ii - indices of fertilizer efficiency and corn yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 5, v. 37, p. 1299-1309, 2013.

BOTTEGA, E. L. et al. Sampling grid density and lime recommendation in an Oxisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1142-1148, 2014.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.

CHERUBINI, M. R. et al. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 425-432, 2014.

COELHO, E. C. et al. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 1, p. 165-174, 2009.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. Ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

DINKINS, P.; JONES, C. Soil Sampling Strategies. **Mont Guide**, Bozeman v. 4, n. 8, p. 1-4, 2008. Disponível em: <<http://store.msuextension.org/publications/AgandNaturalResources/MT200803AG.pdf>>. Acessado em: 1 jan. 2016.

DELLEN, H. V. et al. Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Iowa, v. 142, n. 1, p. 18-28. 2011.

FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, 2012.

FRANZEN, W. D.; PECK, T. R. Field soil sampling density for variable rate fertilization. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, n. 4, p. 568-574, 1995.

GELDERMAN, R.; GERWING, J.; REITSMA, K. **Recommended Soil Sampling Methods for South Dakota**. South Dakota State University. 2006, 6 p. Disponível em: <[agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS935](http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS935)>. Acessado em: 23 jan. 2016.

HANSEL, F. D. et al. comportamento espacial e temporal do ph em um latossolo vermelho com sistema de plantio direto manejado com ferramentas de agricultura de precisão. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 452-457, 2012.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. A acidez do solo e a nutrição mineral de plantas. In: KAMINSKI, J. (Ed.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas : SBCS/NRS, 2000. cap. 2, p. 21-39.

KERRY, R.; OLIVER, M. A. Average variograms to guide soil sampling for land management. **The International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Netherlands, v.5, n.4, p.307-325, 2004.

KERRY, R.; OLIVER, M. A. Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to krige sparse soil data. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 9, n. 1, p. 33-56, 2008.

KRAVCHENKO, A. N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 67, n. 5, p. 1564-1571, 2003.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. J. Efficacy of Grid and Zone Soil Sampling Approaches for Site-Specific Assessment of Phosphorus, Potassium, pH, and Organic Matter. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 5, n. 2, p. 131–144, 2004.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Management zones soil sampling: a better alternative to grid and soil type sampling? In: 13° THE INTEGRATED CROP MANAGEMENT CONFERENCE. 2001, Ames. **Anais...** Ames: Iowa State Univ. Extension. 2001. Disponível em: <[http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/ICM\\_2001\\_ZoneSampling\\_Publ.pdf](http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/ICM_2001_ZoneSampling_Publ.pdf)>. Acesso em: 1 jan. 2016.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 141-150, 2000.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLACO, A. F. Agricultura de precisão. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p .

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MOORE, M. **An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management**. 1998. 379 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Cranfield University, Cranfield. 1998.

MONTANARI, R. et al. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 13, n. 5, p. 542-552, 2012.

NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, 2011.

OLIVEIRA, I. A. et al. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015.

PAUTSCH, G. R.; BABCOCK, B. A.; BREIDT, F. J. **Optimal Sampling Under a Geostatistical Model**. Iowa: Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University. 1998. 32 p. Disponível em: <[http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1228&context=card\\_workingpapers](http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1228&context=card_workingpapers)>. Acessado em: 1 fev. 2016.

PETERS, J. B.; LABOSKI, C. A. M. **Sampling soil for testing**. Extension Cooperative. 2013. 4 p. Disponível em: <<http://www.soils.wisc.edu/extension/pubs/A2100.pdf>>. Acessado em: 1 fev. 2016.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Soil sampling intensity and spatial distribution pattern of soils attributes and corn yield in no-tillage system **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 852-865, 2012.

SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012.

SANTI, A. L. et al. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

SANTOS, H. G. et al. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SCHMIDT, J. P.; TAYLOR, R. K.; MILLIKEN, G. A. Evaluating the potential for site-specific phosphorus applications without high-density soil sampling. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 66, n. 1, p. 276-283, 2002.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, Cary, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SIQUEIRA, D. S. et al. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232-234, n. 2, p.172-182, 2014.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 689-698, 2015.

SOUZA, G. S. et al. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

SOUZA, Z. M. et al. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261-268, 2014.

SUSZEK, G. et al. Determination of management zones from normalized and standardized equivalent productivity maps in the soybean culture. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 895-905, 2011.

TEDESCO, M. J. et al (Ed.) **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. 2000. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. Cap. 1, p.1-54.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed. Chichester: J. Wiley, 2007. 330 p.

## 3 ARTIGO II

### VIABILIDADE ECONÔMICA DE AMOSTRAGEM DE SOLO EM GRADES AMOSTRAIS E ZONAS DE MANEJO EM ÁREA COM AGRICULTURA DE PRECISÃO CONSOLIDADA

#### 3.1 RESUMO

A amostragem georreferenciada de solo a partir de grades amostrais é atualmente a principal ferramenta de agricultura de precisão utilizada no Brasil. Porém ainda se tem muitas dúvidas sobre a viabilidade econômica da utilização de grades com alta densidade de pontos. Nesse sentido, novas tecnologias como o uso de zonas de manejo (ZM) para orientar amostragens de solo tem sido sugeridas. Objetivou-se com este estudo avaliar a viabilidade econômica de recomendações de fertilizantes e corretivo determinadas a partir da interpretação dos parâmetros de solo mapeados utilizando amostragem convencional, grades amostrais e ZM delimitadas por distintas metodologias. O estudo foi realizado em Boa Vista das Missões - RS, em uma área de 118 ha. A amostragem de solo foi realizada em uma grade amostral de 0,5 ha, no ano de 2015. A partir da eliminação sistemática de pontos amostrais simulou-se a utilização de grades de 1, 2, 3 e 4,5 ha. As ZM foram delimitadas com base em dados, altimétricos e de mapas de produtividade. Ainda simulou-se a utilização da amostragem convencional e convencional simplificada. Utilizou-se os teores de P, K e índice SMP para gerar as recomendações de  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  e calcário, respectivamente. Calcularam-se os desvios de recomendação em relação à grade referência (0,5 ha) em área (ha), kg do insumo e em reais (R\$). Posteriormente os custos de amostragem foram somados com os custos totais dos desvios de recomendação e quantidade total de insumos recomendados. O aumento da dimensão da grade amostral resultou em progressivas elevações nos desvios de recomendação, tanto de fertilizantes quanto de corretivo. As recomendações realizadas com base nos dados obtidos em ZM não foram apropriadas, resultando em desvios maiores que a amostragem convencional e grades amostrais, sendo sua eficiência equiparável à amostragem convencional simplificada. O esquema amostral que mostrou maior viabilidade econômica foi a grade amostral de 0,5 ha.

**Palavras chave:** Custo benefício. Esquemas de amostragem. Malhas amostrais, Unidade de gerenciamento diferenciado.

### 3.2 ABSTRACT

The georeferenced soil sample from sampling grids is currently the tool leading of precision agriculture used in Brazil. But, it still has many doubts about the economic feasibility of using grids with high density points. Accordingly, new technologies such as the use management zone (MZ) to guide soil samples has been suggested. Aimed with this study evaluate the economic viability of fertilizer and corrective recommendations determined from the interpretation of the mapped soil parameters using conventional sampling, sample grids and MZ bounded by different methodologies. The study was conducted in Boa Vista Missões - RS, on an area of 118 ha. The soil sampling was carried out a sample grid of 0.5 ha, in the year of 2015. From the systematic elimination of sample points simulated the use grids 1, 2, 3 and 4.5 ha. MZ were delineated based on data of altimetry and yield maps. Still carried out a simulation the use of the conventional sampling and simplified conventional. It were Used the P, K and SMP index to generate recommendations  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  and lime, respectively. They calculated the recommendation of deviations from the reference grid (0.5 ha) in area (ha) kg of inputs and in real (R\$), later sampling costs were compared to the total costs of recommendation deviations and the total amount of recommended inputs. The increase in the size of the sampling grid resulted in progressive increase in the recommendation of deviations, both of fertilizers as corrective. The recommendations made on the basis of data from MZ were not appropriate, resulting in deviations greater than conventional sampling and sampling grids, and its efficiency comparable to conventional simplified sampling. The sample scheme that showed the greatest economic feasibility was the sampling grid of 0.5 ha

**Key words:** Cost benefit. Sampling grid. sampling Scheme. Differentiated management unit.

### 3.3 INTRODUÇÃO

A amostragem de solo é a maneira mais eficiente de se avaliar o estado nutricional dos solos (GELDERMAN et al., 2006). Quando o manejo da fertilidade é

realizado segundo os princípios da agricultura de precisão (AP), opta-se na maioria dos casos, pelas aplicações de fertilizantes e corretivo a taxa variada (PETERS e LABOSKI, 2013; BOTTEGA et al., 2014). Contudo, a eficiência dessa prática está em grande parte condicionada à qualidade da metodologia de amostragem de solo escolhida (MYLAVARAPU e LEE, 2014). A amostra de solo deve refletir com fidelidade as reais condições do solo, assim como, o resultado dos manejos realizados ao longo do tempo (PETERS e LABOSKI, 2013).

Grades amostrais tem sido a metodologia mais utilizada para a amostragem georreferenciada de solo no Brasil (CHERUBIN et al., 2015; SOARES FILHO e CUNHA, 2015). São vários os fatores que propiciaram a sua popularização, dentre eles destaca-se o desconhecimento prévio das características do solo (SIQUEIRA et al., 2014), a falta de um mapeamento com alta resolução dos tipos de solos (OLIVEIRA et al., 2015), a facilidade de ser realizada a campo, a falta de necessidade de instrumentos de alto custo para sua realização, a existência de empresas especializadas para coleta, realização de amostragens e geração de mapas temáticos.

A utilização de grades amostrais de pequena dimensão (ou seja, pontos amostrais dispostos mais próximos uns dos outros) proporcionam a obtenção de informações detalhadas, resultando na realização de recomendações com maior acurácia (SOUZA et al., 2014; CHERUBIN et al., 2015). Vários trabalhos tem buscado definir qual é a dimensão ideal da grade amostral para os solos brasileiros (NANNI et al., 2011; SOUZA et al., 2014. CHERUBIN et al., 2015), os resultados têm demonstrado a necessidade da realização de amostragens com grades de dimensão inferior a 1 ha. Contudo, na prática as empresas prestadoras de serviço no Brasil tem utilizado grades bem mais elevadas, variando de 1 a 3 ha na Região Sul (CHERUBIN et al., 2014) e de 5 a 10 ha na Região Centro Oeste (BOTTEGA et al., 2011).

Malhas amostrais adensadas resultam na coleta de um grande número de amostras, tornando-se um investimento considerado, muitas vezes como de alto custo, sendo este o principal fator limitante ao uso generalizado de amostragens georreferenciadas de solo (CLAY et al., 2000; SOUZA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015). Porém, em nenhum dos estudos citados acima foi considerado os custos da aplicação de diferentes grades amostrais e os benefícios advindos de sua utilização na melhoria das recomendações de insumos. Considerar estes aspectos

possibilitará conhecer com maior clareza qual é a intensidade amostral que apresenta maior viabilidade econômica aos produtores (PETERS e LABOSKI, 2013).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016) os valores gastos com fertilizantes nas principais culturas do Brasil, soja e milho representam 34 e 47% dos custos variáveis, respectivamente. Já a amostragem georreferenciada de solo em uma grade amostral de 1 ha, considerando todo o processo de coleta, análise, interpretação e geração dos mapas dos atributos e das recomendações representa um custo de 1,5 a 2% desse valor, sendo portanto, um valor relativamente baixo quando visualizado a partir dessa perspectiva e dos potenciais benefícios advindos de sua utilização.

No que tange ao uso das ferramentas de AP, um fator ainda pouco estudado, está relacionado com a avaliação da evolução temporal da fertilidade do solo em áreas manejadas com AP a longo tempo. Nessas áreas, espera-se que os níveis de fertilidade já estejam em boa parte da área, acima dos teores críticos. Sendo assim, haverá, conseqüentemente, uma redução da eficiência da utilização da amostragem georreferenciada de solo (CLAY et al. 2000; SCHIMIDT et al., 2002), podendo as grades amostrais que eram ideais nas primeiras amostragens, passarem a ser inviáveis economicamente para as amostragens subsequentes. Sendo assim, produtores que estão conduzindo suas lavouras a longo tempo com AP tem a tendência de passarem a utilizar zonas de manejo (ZM) para orientar as amostragens de solo.

Existem várias metodologias passíveis de serem utilizadas para delimitar as ZM dentre eles a utilização das informações de tipos de solo, topografia, histórico de adubações e de culturas, produtividade etc. (CLAY et al., 2000; MOLIN, 2002; DINKINS e JONES, 2008; SANTI et al., 2012; 2013). Porém, não se tem estudos no Brasil que comprovem a eficiência dessas tecnologias e/ou indiquem com informações científicas qual a melhor forma de se delimitar as ZM. A nível internacional algumas constatações importantes de quando utilizar grade amostral e ZM são descritas por Ferguson e Hergert (2009) em que citaram que a grade amostral deve ser utilizada quando houver elevadas alterações no manejo prévio da fertilização, em pequenas áreas com diferentes históricos de cultivo e quando pretende-se caracterizar a variabilidade espacial dos atributos. Já as ZM devem ser utilizadas quando se tem disponível um elevado histórico das características e atributos da área afim de tornar possível uma eficiente delimitação das ZM.

No momento da escolha da metodologia a ser utilizada na amostragem de solo, deve-se preconizar pela confiabilidade, precisão e acurácia dos resultados que serão obtido, porém a viabilidade econômica não deve ser deixada de lado (MYLAVARAPU e LEE, 2014). Tendo em vista que não existe um protocolo de amostragem de solo que seja adequado a todas as áreas, ter o conhecimento da resposta de diferentes estratégias é essencial afim de possibilitar a escolha da metodologia que mais se ajuste aos planejamento técnico e financeiro do produtor rural (DINKINS e JONES, 2008). A hipótese testada nesse trabalho foi de que a utilização de ZM para orientar a amostragem de solo pode apresentar maior viabilidade econômica comparado com a utilização de grades amostrais em áreas manejadas a longo tempo com AP.

Objetivou-se com este estudo avaliar a viabilidade econômica das recomendações de fertilizantes e corretivo realizadas a partir da interpretação dos parâmetros mapeados utilizando amostragem de solo convencional, grades amostrais e ZM delimitadas por distintas metodologias.

### **3.4 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado no município de Boa Vista das Missões – RS, em uma área de 118 ha. As características e detalhes da área, a forma de realização das coletas de solo e delimitação das ZM são apresentados na seção material e métodos do capítulo 1. Para este estudo, utilizou-se os dados de índice SMP (Apêndice A) e de P e K apresentados e discutidos no capítulo 1 para gerar as recomendações de calcário,  $P_2O_5$  e  $K_2O$  com base no Manual de Adubação e Calagem para o RS/SC (CQFS - RS/SC, 2004). Toda a área apresentou teores de argila superiores a 60% e CTC potencial (pH 7,0) situada entre 5 e 15  $cmol_c dm^{-3}$ , dessa forma, esses parâmetros auxiliares não foram considerados neste estudo, para interpretação das análises.

Os níveis críticos utilizados neste estudo foram superiores aos recomendados pelo Manual de Adubação e de Calagem (CQFS - RS/SC, 2004), devido aos níveis sugeridos, serem baseados em estudos de calibração realizados entre o final da década de 1960 e meados da década de 1980, em sistema de plantio convencional, em que a amostragem de solo era realizada na camada 0,00 a 0,20 m. Além disso, nos últimos 30 anos houve significativos avanços imprimidos pelo melhoramento

genético nas plantas, os quais possibilitaram a redução do ciclo, modificações na relação entre área foliar e sistema radicular e aumentos de produtividade das culturas gerando, conseqüentemente, a necessidade de maiores concentrações de nutrientes no solo (FIORIN et al., 2012). Diante disso Schlindwein (2003) e Fiorin et al. (2012) citaram que as recomendações do Manual (CQFS - RS/SC, 2004) encontram-se subestimadas, devendo-se utilizar níveis críticos mais elevados quando se almeja a obtenção de elevada produtividade.

Na tabela 1, são apresentadas as doses de fertilizantes e corretivo recomendadas de acordo com cada atributo. Para P e K o objetivo da recomendação foi de elevar os teores ao limite entre as classes de alto e muito alto apresentadas no Manual, as quais correspondem a 12 e 180 mg dm<sup>-3</sup> (CQFS - RS/SC, 2004), respectivamente, através da utilização do poder tampão do solo de 22,5 kg ha<sup>-1</sup> para P e de 2,25 kg ha<sup>-1</sup> para K visando elevar 1 mg dm<sup>-3</sup> dos elementos no solo (CQFS – RS/SC, 2004). Para calcário, em função do índice SMP utilizou-se a metade da dose recomendada para elevar o pH a 6,0, que é o valor ideal para as culturas da soja e milho as quais são as principais culturas semeadas na área (CQFS – RS/SC, 2004).

Tabela 1 – Faixas de interpretação de P, K e índice SMP e suas respectivas recomendações de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e calcário para elevar os teores do solo ao nível desejado, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

P (mg dm <sup>-3</sup> ) Parâmetro	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) Dose	K (mg dm <sup>-3</sup> ) Parâmetro	K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) Dose	Índice SMP Parâmetro	Calcário (Mg ha <sup>-1</sup> ) Dose
< 8	112,50	< 120	157,50	< 5,6	3,4
8 – 9	78,75	120 – 140	112,50	5,6 - 5,7	2,7
9 – 10	56,25	140 – 160	67,50	5,7 - 5,8	2,4
10 – 12	22,50	160 – 180	22,50	5,8 - 5,9	2,1
> 12	0,00	> 180	0,00	> 5,9	1,5

Os dados das recomendações obtidos pelos diferentes esquemas de amostragem foram comparados com a amostragem na grade de 0,5 ha, a qual foi considerada como referência (máxima eficiência técnica). Sendo assim, calculou-se para todos os demais esquemas de amostragem a área em que as doses de fertilizantes e corretivo foram recomendadas de forma correta, acima e abaixo da

recomendação referência. Na sequência, calculou-se a quantidade total em kg de cada fertilizante recomendados de forma equivocada.

A partir da quantidade de insumos recomendado indevidamente calculou-se quanto esses desvios representavam em reais (R\$). Os valores utilizados para calcular esses parâmetros foram os custos de mercado praticados para o superfosfato triplo (41% de  $P_2O_5$ ), cloreto de potássio (58% de  $K_2O$ ) e calcário dolomítico com um PRNT de 75%, calculados para o Estado do RS pela Conab (2016) com valores correspondentes a uma média dos meses de julho a dezembro de 2015. Sendo assim, o kg de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  tiveram um custo de R\$ 3,47 e R\$ 2,50 reais, respectivamente. A tonelada de calcário custou R\$ 170,73 reais. Os custos inerentes a amostragem e análise de solo foram calculados de acordo com o valor médio cobrado por três empresas prestadoras de serviço da Região Norte do RS. Os valores levantados por amostra foram de R\$ 60,00 para a grade de 0,5 ha, R\$ 70,00 para a grade de 1 ha, R\$ 80,00 para a grade de 2 ha, R\$ 85,00 para a grade de 3 ha, R\$ 90,00 para a grade de 4,5 ha, R\$ 150,00 para as ZM, R\$ 150,00 para a amostragem convencional e R\$ 200 para a amostragem convencional simplificada (CS).

Afim de se determinar qual método de amostragem apresentou maior viabilidade econômica foi somado os custos de amostragem de solo com os custos dos desvios de recomendação de insumos em relação à amostragem referência (grade de 0,5 ha). Ainda realizou-se uma segunda simulação utilizando-se os custos de amostragem de solo com o total de insumos recomendados em cada esquema de amostragem. Para melhorar a visualização dos resultados calculou-se o ponto de equilíbrio entre os custos totais de cada método de amostragem com a quantidade em kg de soja necessários a serem produzidos para pagar os custos. O valor do kg de soja considerado foi de R\$ 1,17 reais (R\$ 69,90 reais  $sc^{-1}$ ), calculado pela média dos valores de mercado praticados entre os meses de julho a dezembro de 2015 apresentados pela Conab (2016).

Os mapas temáticos das recomendações de todos os insumos foram realizadas no programa computacional CR - Campeiro 7 (Departamento de Geomática, Universidade Federal de Santa Maria, RS), utilizando-se o inverso da distância ao quadrado como interpolador dos dados.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.5.1 Desvios nas recomendações P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Em todos os métodos de amostragem a área com recomendação correta de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> foi bastante elevada (Tabela 2), estando próxima a 70 ha (59,32%), com excessão da ZM (Alt) que foi a que teve a pior performance para esse fertilizante, e apresentou área com recomendação correta de apenas 37 ha (31,36%). Sendo assim, reforça-se a importância de se realizar análise de solo, pois mesmo a amostragem CS que tem um baixo custo, obteve um desempenho considerável (recomendação correta em 67,5 ha), podendo apresentar benefícios aos produtores que ainda não utilizam essa informação para orientar o manejo da fertilidade do solo.

Tabela 2 – Análise econômica dos desvios na recomendação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a partir dos parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simpl), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) em relação à amostragem referência (grade 0,5 ha), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

FV	Grade amostral					Zona de manejo		Conv	Conv simpl
	0,5	1 há	2 ha	3 ha	4,5 ha	Prod	Alt		
N	243	119	60	43	29	5	4	5	1
ARIR (ha)	-	26,5	23,5	28,5	25,5	46,5	46,0	39	49,5
ARC (ha)	-	76,0	72,0	68,5	72,5	67,0	37,0	56,5	67,5
ARSR (ha)	-	13,0	21,5	20,0	19,0	3,5	34,0	21,5	0,0
QTFR (kg)	2.869	2.234	2.544	2.243	2.091	361	2376	1.068	0
QFRIR (kg)	-	920	866	1.157	1.290	2575	1.932	2.254	2869
QFRSR (kg)	-	285	541	531	512	67	1.439	453	0
CTFRI (R\$)	-	4.181	4.882	5.857	6.253	9.168	11.697	9.393	9.955

N= Número de pontos; ARIR= Área com recomendação Inferior a referência; ARC= Área com recomendação correta; ARSR= Área com recomendação superior a referência; QTFR= Quantidade total de fertilizante recomendado; QFRIR= Quantidade de fertilizante recomendado inferior a referência; QFRSR.= Quantidade de fertilizante recomendado superior a referência; CTFRI= Custo total de fertilizante recomendado incorretamente.

Em todos os esquemas de amostragens houve maiores áreas com recomendação de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> subestimadas do que superestimadas. Clay et al. (2000) comparando a amostragem em grade com a convencional, observaram resultados semelhante. A superestimação dos teores de P em amostragem

convencional e em ZM pode estar relacionado a amplitude dos dados acima do nível crítico ser superior ao dos valores inferiores, sendo assim, pontos com alto teor de P elevam demasiadamente os valores médios (CHERUBIN et al., 2011). A aplicação de doses subestimadas representam maiores prejuízos do que doses superestimadas, pois podem resultar em menor desenvolvimento das culturas, reduzindo a produtividade das mesmas. Já uma dose superior a referência, principalmente de  $P_2O_5$ , que é um elemento em que praticamente não ocorrem perdas por lixiviação (SANTOS et al., 2008), esse ficará armazenado no solo e poderá ser utilizado pela planta em algum momento do seu desenvolvimento ou em cultivos subsequentes. Contudo, a aplicação de doses superestimadas de  $P_2O_5$  apresentam um alto risco quando perdidos por erosão superficial, podendo ser carregados para as vias hídricas e ocasionar o fenômeno denominado eutrofização dos rios, os quais representam um elevado risco para o meio ambiente

Houve elevada diferença dos desvios de recomendação em área (ha) entre as amostragens em grades amostrais e nas ZM. Sendo que na amostragem em grades, as áreas com doses subestimadas foram de aproximadamente 25 ha (21,03%), enquanto nas ZM e amostragem CS foram próximas a 46 ha (38,69%). As áreas com recomendações superiores a referência foram em torno de 20 ha (16,82) para as amostragens em grades, já entre os demais esquemas de amostragem houve áreas com até 34 ha (28,6%). Na amostragem convencional simplificada não houve recomendação com doses superestimadas, pois o valor médio obtido do talhão nesse esquema, estava acima do nível crítico, sendo assim, não houve recomendação de  $P_2O_5$ .

O esquema de amostragem que resultou na recomendação da maior quantidade de  $P_2O_5$  foi a grade de 0,5 ha (referência), sendo de 2.869 kg, nas demais grades amostrais houve uma gradativa redução da quantidade de fertilizantes recomendados. Entre os demais esquemas de amostragem, com exceção da ZM (Alt) as quantidade de fertilizantes recomendada foi muito baixa (<1.100 kg), justificando dessa forma a ocorrência de elevadas áreas com recomendações de doses subestimadas. Para a ZM (alt) a quantidade total de fertilizante recomendada foi próxima a referência (2.376 kg), contudo, 60,5% da quantidade total seria aplicada em locais inadequados quando comparados com a amostragem referência.

Os desvios em kg de  $P_2O_5$  com doses subestimadas (recomendação inferior a referência) foram de 866 a 1.290 kg nas amostragens em grades amostrais. Clay et al. (2000) citaram que a amostragem em grade gera resultados excelentes, porém, as amostras devem ser coletadas a curtas distâncias, caso contrário se perde informações importantes da variabilidade espacial dos atributos, gerando conseqüentemente, erros de recomendação. Nas ZM e amostragem convencional os desvios de recomendações com doses subestimadas variaram de 1.932 a 2.869 kg. Os custos com desvios de recomendação aumentaram gradativamente nas grades amostrais com o aumento da sua dimensão, a grade de 4,5 ha apresentou um custo de R\$ 6.253 reais, que de maneira geral pode ser considerado reduzido ao se comparar com os demais esquemas de amostragens que variaram de R\$ 9.168 a 11.697 reais.

Na figura 1, são apresentados os desvios absolutos das recomendações de  $P_2O_5$  em cada ponto amostral nos diferentes esquemas de amostragem com relação à amostragem referência (grade 0,5 ha). Observa-se que houve recomendações com desvios de doses de até  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  a menos e doses com até  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  a mais que a recomendada pela amostragem referência. Nas amostragens em ZM houve uma elevada quantidade de pontos localizados na extremidade dos gráficos o que indica o aumento da dissimilaridade com a recomendação referência, corroborando com os resultados discutidos anteriormente.

A partir dos mapas temáticos das recomendações de  $P_2O_5$  (Figura 2), é possível visualizar que na recomendação oriunda da amostragem na grade de 0,5 ha que 70,85 ha (60,04%) não necessitavam da aplicação de fertilizante. A amostragem até a grade de 2 ha gerou recomendações visualmente semelhante a grade de 0,5 ha. No entanto, como discutido anteriormente, gerou desvios de recomendação que repercutiram em custos significativos, demonstrando portanto, que a similaridade visual de mapas nem sempre é um bom critério para mensurar a eficiência de diferentes esquemas amostrais.

Figura 1 – Desvios absolutos da recomendação de  $P_2O_5$  ( $kg\ ha^{-1}$ ) em função da amostragem de solo realizada nos esquemas de amostragem: grade amostral de 1 ha (a), 2 ha (b), 3 ha (c) e 4,5 ha (d), zonas de manejo em função da produtividade (e) e altitude (f), amostragem convencional (g) e convencional simplificada (h) em relação a recomendação fornecida pela grade amostral de 0,5 ha.

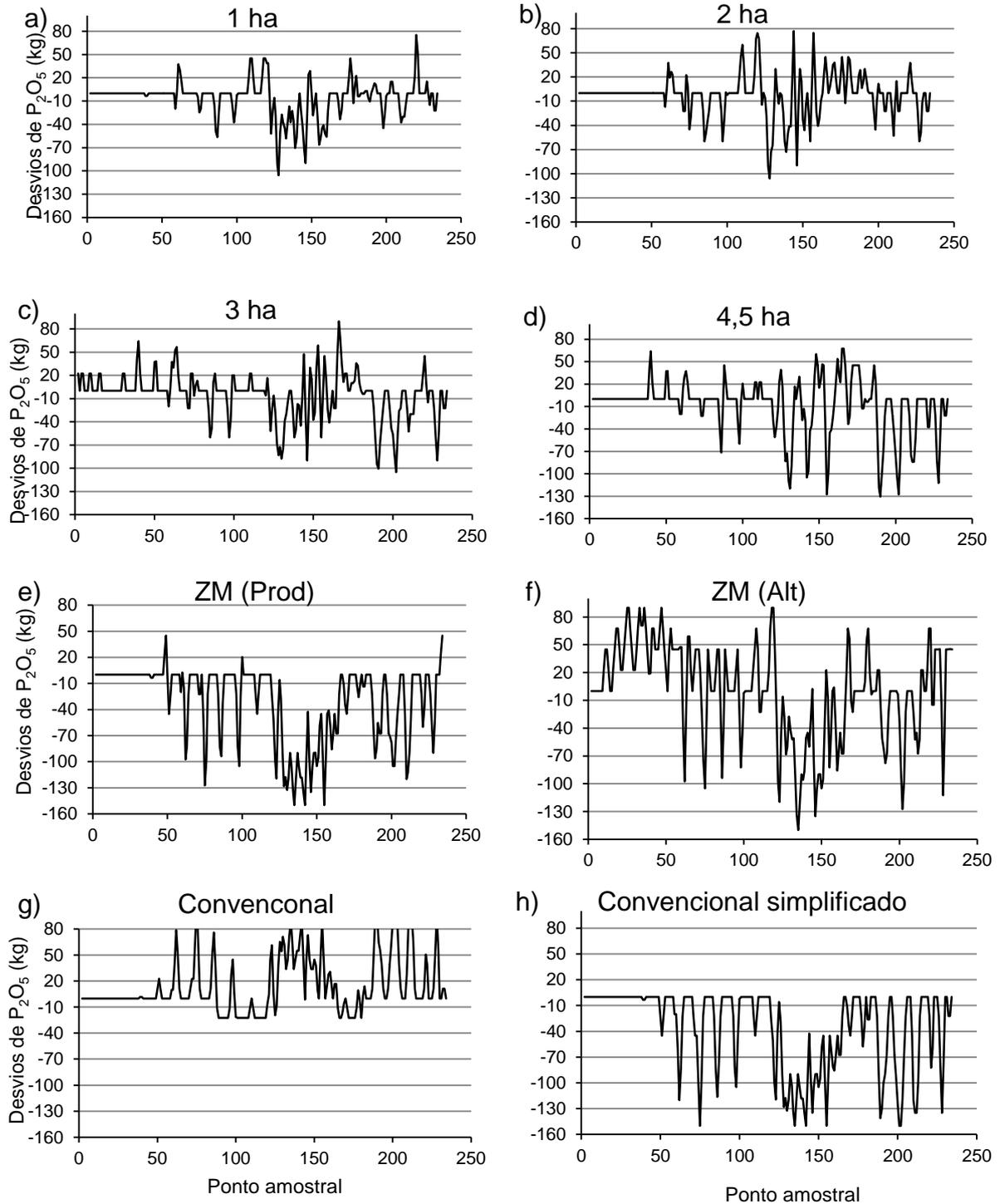
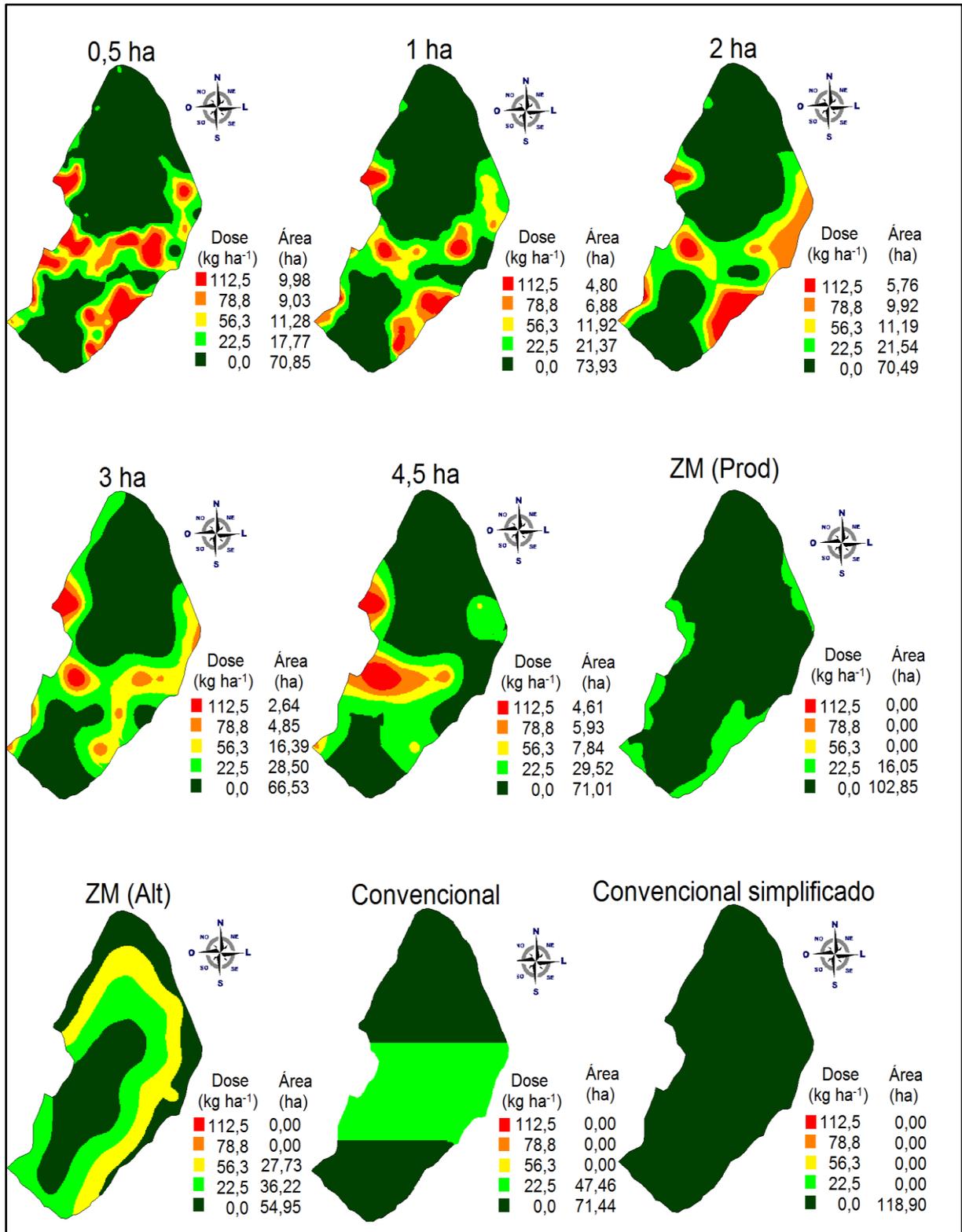


Figura 2 - Mapas temáticos da recomendação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em função da amostragem de solo realizada pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



Peters e Laboski (2013) também observaram que a utilização de grades de 2 ha ou maiores poderão não ser adequadas para descrever a variabilidade espacial dos atributos do solo, gerando erros de recomendação e conseqüentemente reduzindo os benefícios advindo da utilização da AP. De maneira geral, as recomendações obtidas a partir das ZM (Prod), amostragem convencional e convencional simplificada foram semelhantes entre si, porém distintas dos mapas referência. Clay et al. (2000) também observaram semelhança entre os mapas de recomendação de  $P_2O_5$  amostrados em ZM e amostragem convencional.

### 3.5.2 Desvios nas recomendações de $K_2O$

Os desvios das recomendações de  $K_2O$  nos diferentes esquemas de amostragem diferiram do que foi observado para o  $P_2O_5$ , sendo que houve maiores áreas com recomendações de doses superestimadas do que subestimadas. A área com recomendação correta foi em torno de 60 ha (50,85%) nas grades amostrais. nas ZM (Alt) e amostragem convencional, já para a amostragem convencional simplificada a área foi reduzida a apenas 14 ha (11,77%). A amostragem na grade de 0,5 ha foi a que resultou na maior quantidade de  $K_2O$  recomendados, sendo de 2.991 kg, com excessão da grade de 3 ha que foi de 3.962 kg. Para as ZM novamente a quantidade de fertilizante recomendada foi reduzida quando comparada a referência (grade 0,5 ha). Além disso, da quantidade total do fertilizante recomendada, de 42,47 a 58,28% seria aplicado em local indevido.

Amado et al. (2006) comparando a aplicação de fertilizantes a taxa variada com a dose normalmente utilizada pelo produtor, observaram redução de 53% dos custos com fertilizantes, sendo que os autores justificam tal resultado pelo histórico de aplicação de elevadas doses de adubações na área, fazendo com que os níveis de fertilidade estivessem elevados. Contudo, caso a comparação fosse entre a aplicação a taxa variável com a dose recomendada pela amostragem convencional, possivelmente a utilização da taxa variada resultaria no uso de uma maior quantidade de fertilizante, pois a dose recomendada na amostragem convencional seria reduzida, assim como visualizou-se no presente estudo. O importante ao se comparar diferentes métodos de amostragem é avaliar a acurácia da recomendação dos insumos em relação a quantidade correta e ao local a ser

aplicado, e não necessariamente a quantidade total de fertilizante, pois caso contrário, pode-se chegar a conclusões inadequadas.

Tabela 3 – Análise econômica dos desvios na recomendação de  $K_2O$  a partir dos teores de K amostrados de forma convencional (Conv), convencional simplificado (Simpl), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) em relação a amostragem referência (grade 0,5 ha), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

FV	Grade amostral					Zona de manejo		Conv	Conv simpl
	0,5	1 ha	2 ha	3 ha	4,5 ha	Prod	Alt		
N	243	119	60	43	29	5	4	5	1
ARIR (ha)	-	20,0	25,5	21,0	25,5	36,0	39,5	38	31,5
ARC (ha)	-	76,0	61,5	56,0	61,5	49,5	65,5	66	14,0
ARSR (ha)	-	21,0	30,0	40,0	30,0	31,5	12,0	13	71,5
QTFR (kg)	2.991	2.979	3.003	3.962	2.780	2.519	1.872	1588	2.675
QFRIR (kg)	-	809	1.228	948	1.467	1.754	2.330	1.872	2.086
QFRSR (kg)	-	797	1.240	1.919	1.256	1.282	1.211	469	1.770
CTFRI (R\$)	-	4.015	6.170	7.168	6.808	7.590	8.853	5.853	9.640

N= Número de pontos; ARIR= Área com recomendação inferior a referência; ARC= Área com recomendação correta; ARSR= Área com recomendação superior a referência; QTFR= Quantidade total de fertilizantes recomendados; QFRIR= Quantidade de fertilizante recomendado inferior a referência; QFRSR.= Quantidade de fertilizante recomendado superior a referência; CTFRI= Custo total de fertilizante recomendado incorretamente.

De maneira geral, os desvios em kg de  $K_2O$  recomendados indevidamente se elevaram conforme aumentou a dimensão da grade amostral (Figura 3). O desvio de recomendação de  $K_2O$  dos dados amostrados na grade de 3 ha apresentou valores bastante semelhante ao da ZM (prod) e superior a amostragem convencional. Mallarino e Wittry (2004) em um trabalho semelhante a este observaram bom desempenho de ZM para a determinação de K. Os autores justificaram esse resultado à menor variabilidade espacial desse nutriente quando comparado ao P, contudo nesse estudo conforme discutido no artigo 1, a variabilidade espacial foi semelhante entre os dois elementos.

Os custos totais de fertilizantes recomendados incorretamente foram de R\$ 4.015 reais na grade de 1 ha, na sequência os menores custos foram observados para a amostragem convencional (R\$ 5.853 reais). A pior performance entre as metodologias de amostragem para  $K_2O$  ocorreu para a convencional em que os

custos com recomendações indevidas totalizaram R\$ 9.640 reais, sendo esse valor próximo aos obtidos nas ZM.

Na figura 3, são apresentadas as figuras com os desvios absolutos das recomendações realizadas a partir dos diferentes esquemas de amostragem, podendo-se visualizar a maioria dos esquemas de amostragem apresentaram os maiores desvios nos primeiros 100 pontos amostrais, fato este que pode ser confirmado nos mapas temáticos da aplicação de  $K_2O$  (Figura 4), pois na parte sul do talhão não houve necessidade da aplicação de fertilizante (altos teores de K) na recomendação referência.

Esse resultado mostra que áreas mais heterogêneas e de baixos níveis de fertilidade tendem a apresentar maiores desvios (erros) quando se utiliza estratégia de amostragem mais generalistas (grades amostrais pouco adensadas e ZM). Até a grade de 2 ha os mapas temáticos são visualmente semelhantes, já os amostrados em ZM e convencional são totalmente distintos do mapa referência (grade amostral de 0,5 ha) e entre si. Clay et al. (2000) avaliando diferentes metodologias de amostragem também observaram que os mapas de recomendação obtidos a partir de amostragens em ZM também não apresentavam similaridades visuais com os mapas referências (amostragem em grades).

Figura 3 – Desvios absolutos na recomendação de  $K_2O$  em função da amostragem de solo realizada nos esquemas de amostragem grade amostral de 1 ha (a), 2 ha (b), 3 ha (c) e 4,5 ha (d), zonas de manejo em função da produtividade (e) altitude (f), amostragem convencional (g) e convencional simplificada (h) em relação a grade amostral de 0,5 ha, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

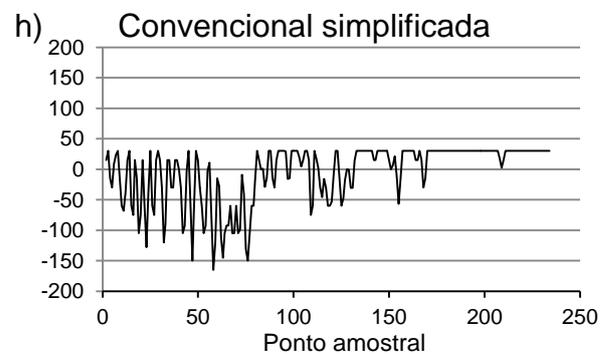
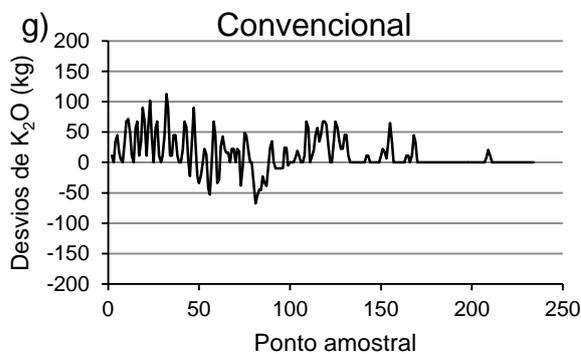
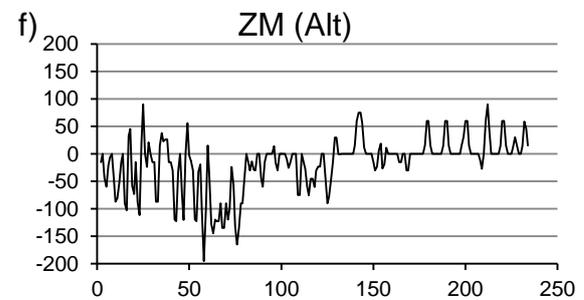
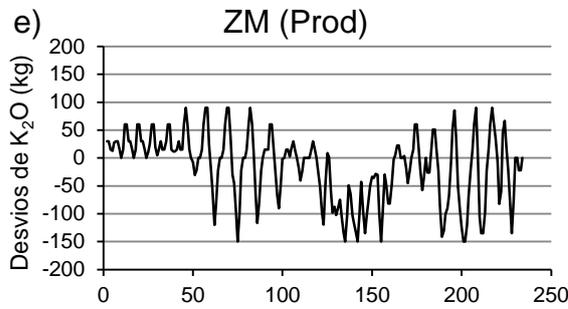
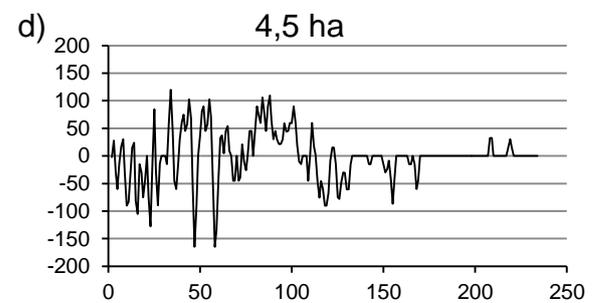
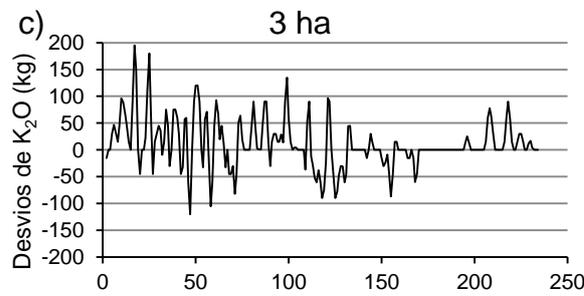
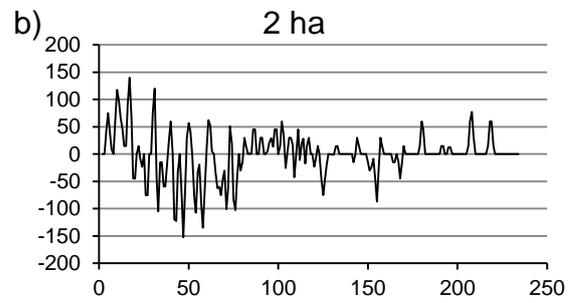
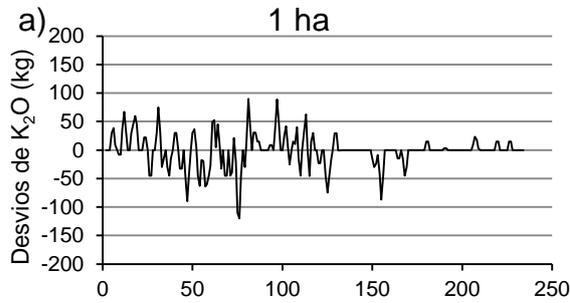
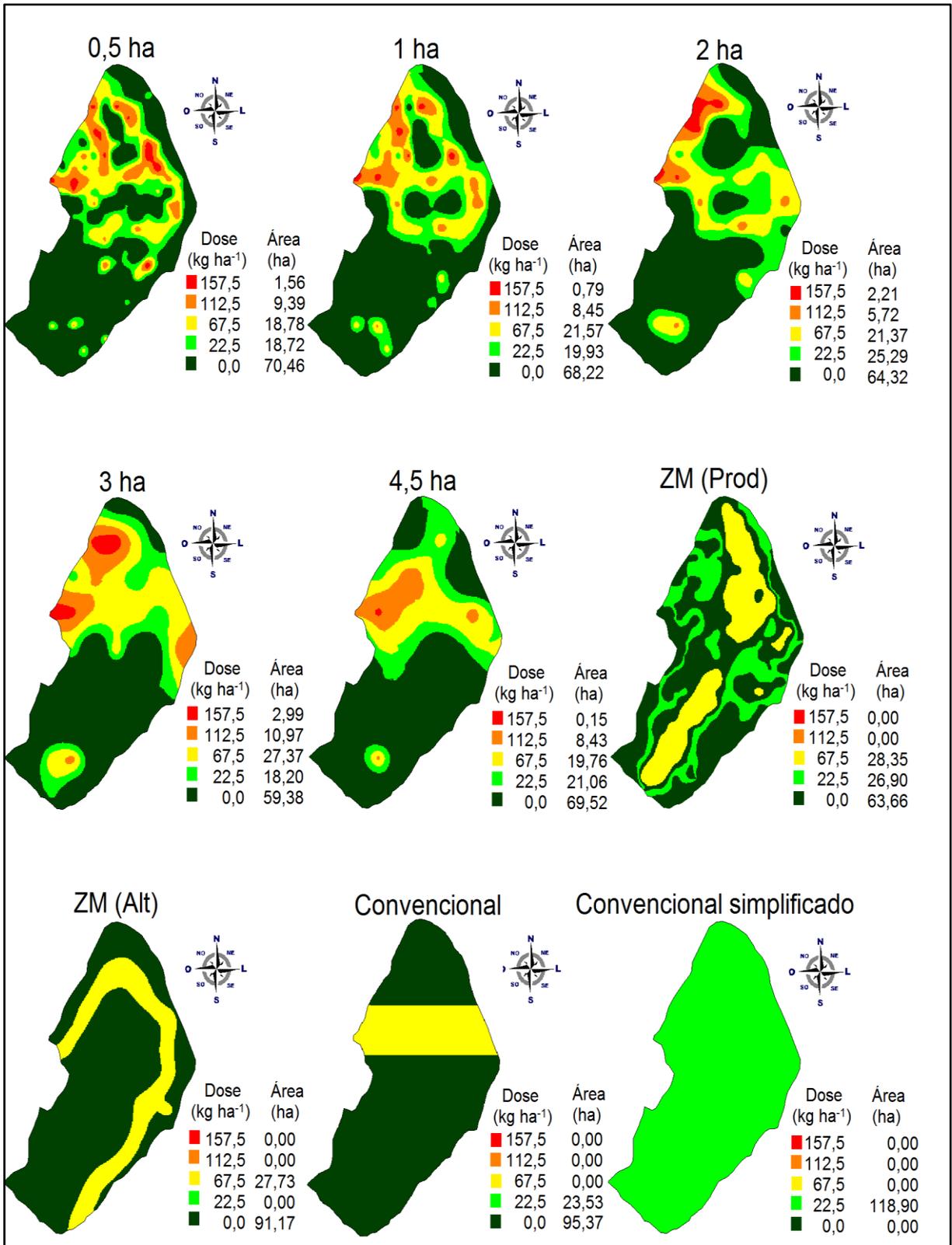


Figura 4 – Mapas temáticos da recomendação de  $K_2O_5$  em função da amostragem de solo realizada pela amostragem convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



### 3.5.3 Desvios nas recomendações de calcário

O comportamento da recomendação de calcário foi semelhante ao que ocorreu para os demais atributos, sendo que as grades amostrais apresentaram recomendações mais próximas da referência em comparação com os demais métodos de amostragem (Tabela 4). A área com amostragem correta variou de 67,5 ha (56,77%) na amostragem de 1ha a 40,5 ha (34,06%) na grade de maior dimensão, já para os demais esquemas de amostragem as áreas com recomendações corretas foram inferiores a 32 ha (26,91%). As áreas com recomendações de doses supestimadas variaram de 22 (18,5%) a 34,5 (29,02%) ha e subestimadas de 27,5 (23,13%) a 47,5 ha (39,95%) nas grades amostrais de 1 a 4,5 ha, respectivamente. Os desvios em área observados no presente estudo são superiores aos observados por Bottega et al. (2014) em que testando três intensidades amostrais para a recomendação de calcário no cerrado brasileiro observaram que a utilização de uma grade amostral de 3,67 ha em relação a referência de 1 ha, resultou na superestimação de doses em 11% e subestimação de doses em 8% da área. Essa diferença de valor pode estar atrelada aos distintos tamanho da grade referência utilizada nos estudos, além dos parâmetros utilizados para a recomendação que diferem entre as Regiões Centro-Oeste e Sul.

Mallarino e Wittry (2004) comparando ZM com a amostragem em grade no EUA, observaram que para o pH a ZM foi mais eficaz do que as grades, contudo no estudo dos autores citados acima as áreas são bem menores (<17 ha) que a do presente estudo, além disso, a grade amostral avaliada foi superior a 1,2 ha e as ZM foram segregadas em um maior número que a deste estudo (5 ZM), resultando em pouca diferença de número de amostras entre os esquemas de amostragem.

Os resultados da quantidade total de calcário recomendado nos diferentes esquemas de amostragem diferiram do que foi visualizado para  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , sendo que com o aumento da dimensão da grade amostral elevou-se a quantidade de calcário recomendado, resultando em uma diferença máxima entre as grades amostrais de 13 Mg. Já o total recomendado de calcário pelas amostragens em ZM e convencional foram semelhantes a referência. Porém se compararmos a quantidade total de corretivo recomendado com os desvios ocorridos, pode-se observar que estes são baixos (<19%) quando comparados aos desvios de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  (>100%), estando esse resultado relacionado a maior homogeneidade do pH.

Podendo-se inferir portanto que a utilização de ZM apresenta maior potencial de uso para parâmetros com baixa variabilidade espacial

Tabela 4 – Análise econômica dos desvios na recomendação de calcário a partir de parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv.), convencional simplificada (simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da altitude (Alt) e produtividade (Prod), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

FV	Grade amostral				Zona de manejo		Conv.	Conv simpl	
	0,5	1 ha	2 ha	3 ha	4,5 ha	Prod			Alt
N	243	119	60	43	29	5	4	5	1
ARIR (ha)	-	22,0	27,5	34,5	29,0	52,0	50,0	58,5	47,0
ARC (ha)	-	67,5	51,0	46,0	40,5	26,5	26,5	26,0	29,5
ARSR (ha)	-	27,5	38,5	36,5	47,5	38,5	35,5	32,5	40,5
QTFR (Mg)	287,3	289,0	297,8	292,9	302,7	278,9	275,7	277,3	282,5
QFRIR (Mg)	-	10,92	12,3	16,8	14,6	31,3	32,80	32,78	29,23
QFRSR (Mg)	-	12,55	22,8	22,3	30,0	22,9	21,13	23,05	24,58
CTFRI (R\$)	-	4.007	5.993	6.232	7.154	9.254	9.207	9.532	9.187

N= Número de pontos; ARIR= Área com recomendação Inferior a referência; ARC= Área com recomendação correta; ARSR= Área com recomendação superior a referência; QTFR= Quantidade total de fertilizante recomendado; QFRIR= Quantidade de fertilizante recomendado inferior a referência; QFRSR.= Quantidade de fertilizante recomendado superior a referência; CTFRI= Custo total de fertilizante recomendado incorretamente.

Avaliando-se os dados obtidos com as recomendações advindas das grades amostrais, observa-se que houve crescente elevação dos custos com recomendações indevidas do corretivo com o aumento de sua dimensão, sendo de R\$ 4.007 reais na grade de 1 ha à R\$ 7.154 reais na grade de 4,5 ha. Entre as ZM e Amostragens convencionais os custos com os desvios foram semelhantes estando acima de R\$ 9.00 reais.

Esses resultados endossam as constatações realizadas por Cherubin et al. (2014) em que citaram que um dos principais desafios do manejo georreferenciados das adubações está na busca de novas metodologias, que mantenham a acurácia dos mapas obtidos em grades densas, aliadas a um menor custo e onerosidade de trabalho. Franzen et al. (2008) descreveram uma série de características que uma área deve ter para ser amostrada a partir de ZM, uma delas se refere ao solo não ter recebido a aplicação de altas taxas de insumos, não se enquadrando portanto a área desse estudo a essa recomendação, podendo esse ser um fator que colaborou para a ineficiência das ZM.

A área amostrada necessitou de correção em toda a sua extensão, porém se observarmos a amplitude de custos com aplicações desnecessárias de insumos que foi de R\$ 5.525 reais entre o pior e o melhor esquema de amostragem, podemos inferir que o mesmo foi baixo, pois se comparar com a aplicação de fósforo em que apenas 40% da área necessitava de aplicação de fertilizante gerou uma diferença entre os esquemas de amostragem de R\$ 7.516 reais. Esse resultado está atrelado a dois fatores principais, sendo o primeiro a menor variabilidade espacial do pH em relação aos teores de P e K, corroborando com os resultados descritos por Siqueira et al. (2014) em que citam que atributos com distribuição mais homogênea necessitam da realização de um menor número de amostras que atributos heterogêneos. E o segundo fator refere-se ao custo do fertilizante ser mais elevado que o do corretivo. A viabilidade econômica de amostragens com alta densidade de pontos aumenta sempre que se eleva, a variabilidade espacial dos atributos, o custo dos insumos, o preço das commodities produzidas e as respostas das culturas à aplicação dos insumos (CLAY et al., 2000).

Nas grades amostrais mais densas as doses recomendadas representaram desvios próximos da referência (linha central), tendo-se doses subestimadas de até  $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Figura 5), já nas ZM esse valor se eleva e chega a doses com desvios de até  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  aplicadas a mais e  $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  a menos que a recomendação referência (grade 0,5 ha). A aplicação de doses de corretivo subestimadas pode não suprir as necessidades das culturas devido a redução da disponibilidade de macronutriente. Já a aplicações de doses superestimadas pode causar desequilíbrio de bases, diminuir a disponibilidade de micronutrientes, aumentar os danos ambientais, além de elevar os custos de produção, podendo em ambos os casos haver redução da produtividade das culturas (PAUTSCH et al., 1998; SANTI et al., 2009).

Os mapas temáticos das recomendações de calcário (Figura 6) revelaram que toda a área necessitava de aplicação, sendo visualmente semelhante as recomendações com a referência, apenas o mapa gerado a partir da amostragem na grade de 1 ha. O aumento da distância entre os pontos gerou uma sequencial redução da qualidade em diagnosticar os padrões de variação que ocorreram na amostragem referência, resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2014) e Cherubin et al. (2015). De forma semelhante ao que se visualizou para os

fertilizantes os mapas de recomendação de calcário a partir de ZM foram totalmente distintos do mapa referência.

Figura 5 – Desvios absolutos na recomendação de calcário em função da amostragem de solo realizada nos esquemas de amostragem grade amostral de 1 ha (a), 2 ha (b), 3 ha (c) e 4,5 ha (d), zonas de manejo em função da produtividade (e), altitude (f), amostragem convencional (g) e convencional simplificada (h) em relação à grade amostral de 0,5 ha, Boa Vista das Misões – RS, Brasil.

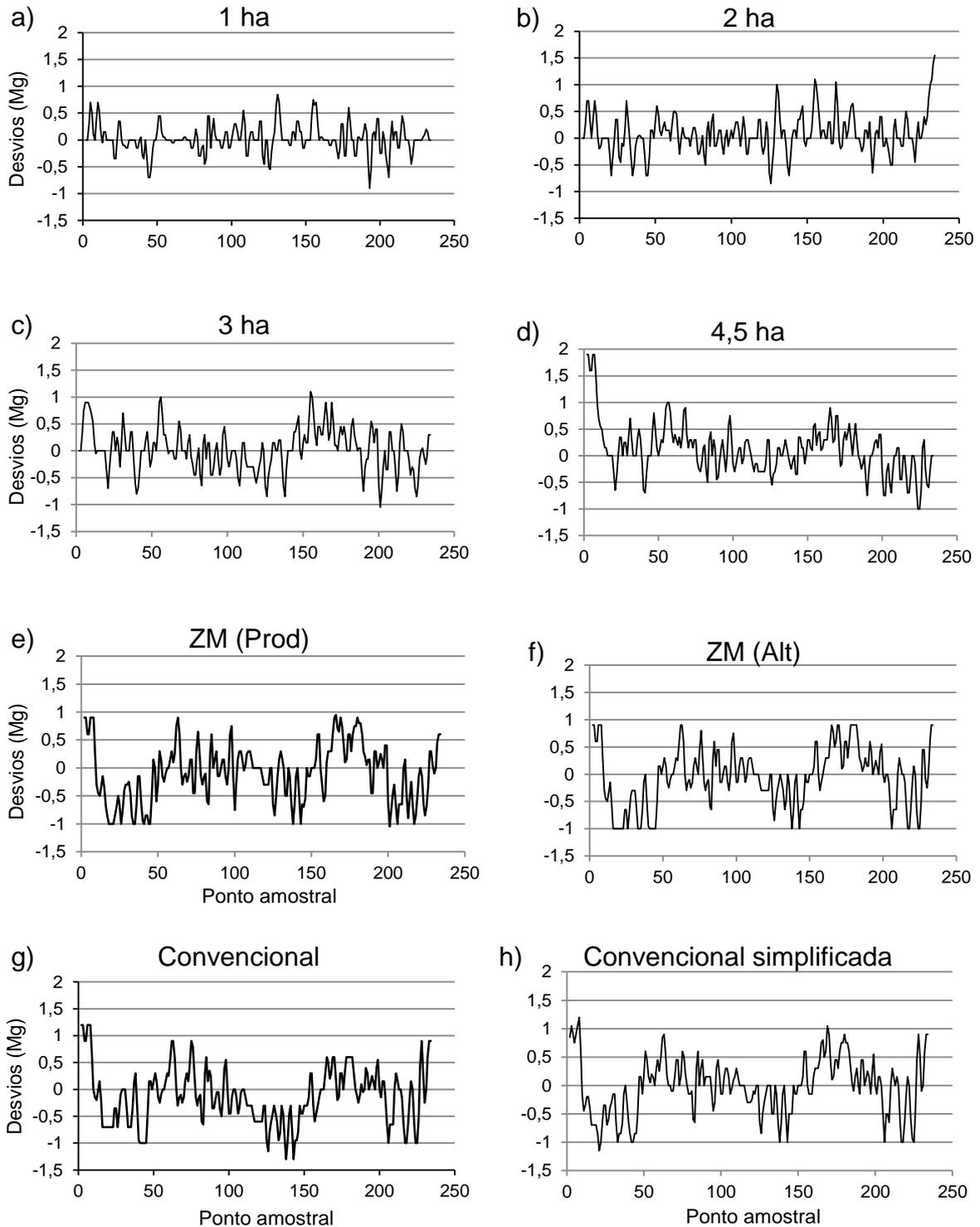
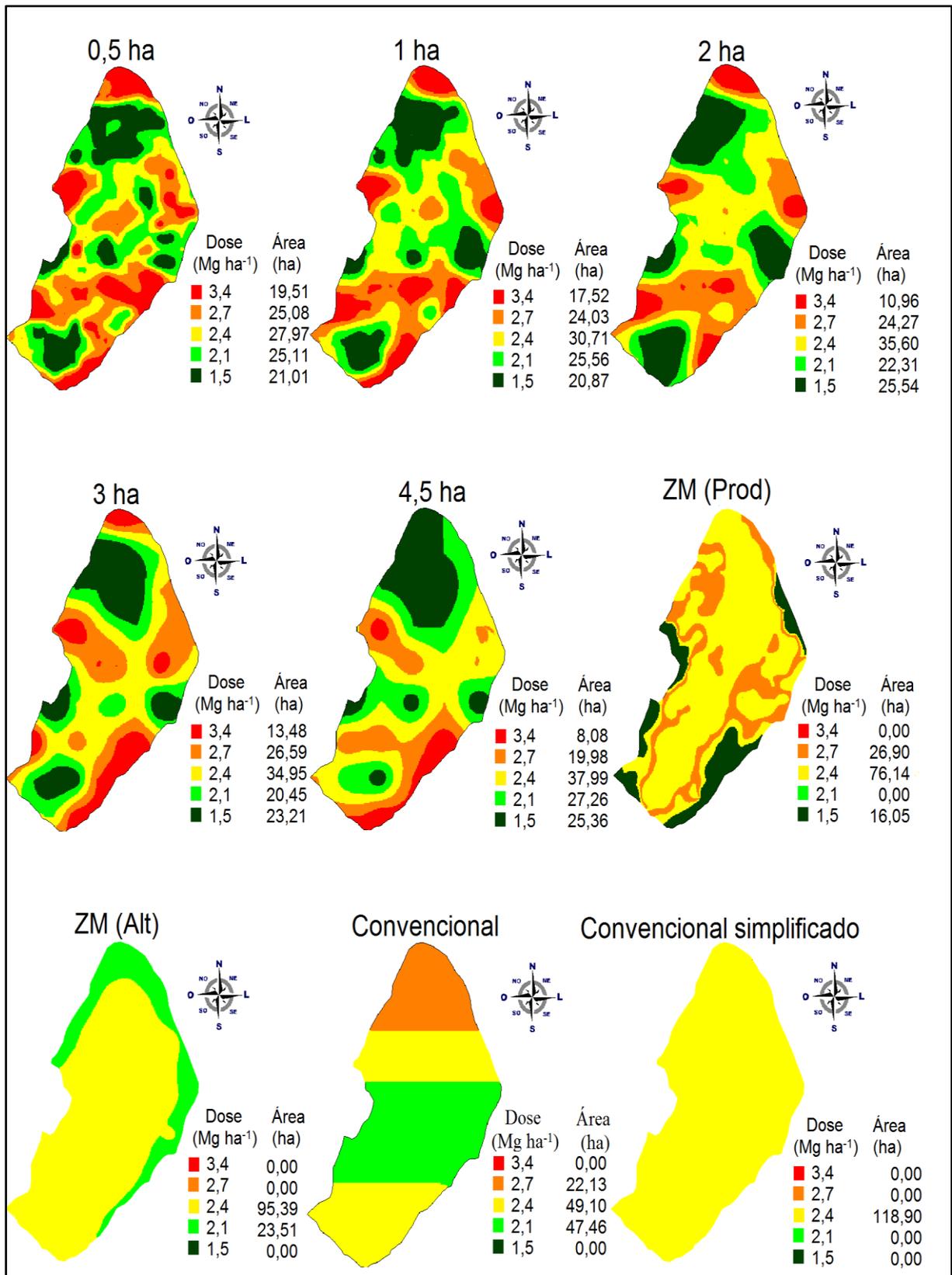


Figura 6 – Mapas temáticos da recomendação de calcário em função da amostragem de solo realizada de forma convencional, convencional simplificada, grades amostrais de 0,5, 1, 2, 3 e 4,5 ha e zonas de manejo (ZM) delimitadas pela produtividade (Prod) e altitude (Alt), Boa Vista das Missões – RS, Brasil.



### 3.5.4 Análise dos desvios totais de recomendações em relação a referência

Na tabela 5, são apresentadas as somas dos desvios das recomendações de fertilizantes, corretivo e os custos de amostragem. Observa-se que o aumento da dimensão da grade amostral de 0,5 ha para 1 ha resultou em um custo com insumos recomendados de forma indevida de R\$ 12.203 reais, chegando esse valor a R\$ 20.215 reais na grade de 4,5 ha. Nas ZM e amostragens convencionais os custos foram ainda mais elevados, sendo acima de R\$ 24.000 reais. Esses resultados contradizem o que foi observado por Clay et al. (2000) nos EUA em que citam que os custos das amostragem em ZM são mais balanceadas com a importância de suas informações quando comparado ao uso de grades amostrais. Contudo, deve-se salientar que no Brasil as características das áreas (maior tamanho), de solo (menor heterogeneidade de tipos de solo) e metodologias de definição das ZM (número de ZM) são diferentes das utilizadas nos EUA, justificando dessa forma estudos dessa natureza nas condições de solos brasileiros.

Tabela 5 – Análise econômica dos desvios totais (R\$) das recomendações de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e calcário a partir de parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simpl), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) e dos custos de amostragem, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

FV	Grade amostral					Zona de manejo		Conv.	Conv Simpl
	0,5 ha	1 ha	2 ha	3 ha	4,5 ha	Prod	Alt		
N	243	119	60	43	29	5	4	5	1
CTIRI (R\$)	0	12.203	17.045	19.257	20.215	26.012	29.757	24.778	28.782
CA (R\$)	14.580	8.330	4.800	3.570	2.610	750	600	500	200
Custo total (R\$)	14.580	20.533	21.845	22.827	22.825	26.762	30.357	25.278	28.982
Saldo R\$	0	5.953	7.265	8.247	8.245	12.182	15.777	10.698	14.402

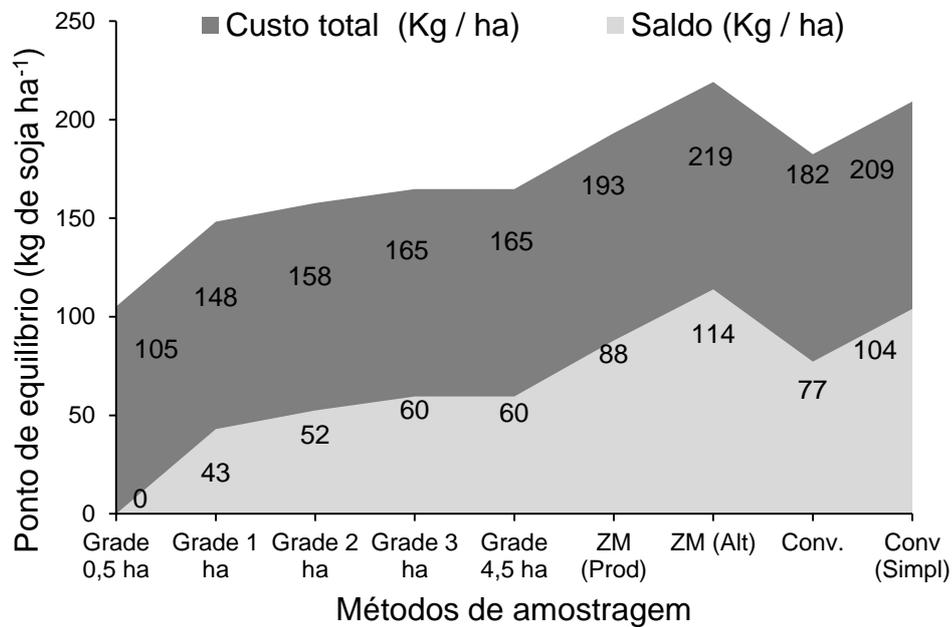
N= Número de amostras; CTIRI= Custo total de insumo recomendado incorretamente; CA= Custo de amostragem; Custo total = CTIRI + CA; Saldo= Custo total dos esquemas de amostragem – Custo total da referência.

Os custos de amostragem reduziram com a diminuição da dimensão da grade amostral, sendo de R\$ 14.580 reais na grade de 0,5 ha e R\$ 8.330 reais na grade de 1 ha, chegando a apenas R\$ 200 reais na amostragem convencional simplificada. Porém ao visualizarmos os custos totais somando-se o custo de amostragem mais os gastos com desvios das recomendações, observa-se que a utilização da grade de

0,5 ha foi o método economicamente mais eficiente, pois a utilização da grade de 1 ha já resultou em erros de recomendação os quais geraram um prejuízo de R\$ 5.953 reais em relação a referência. Os prejuízos com as amostragem em ZM e convencional simplificada foram superiores a R\$ 12.000 reais, sendo superiores a amostragem convencional que gerou um prejuízo em relação a referência de R\$ 10.698 reais. Demonstrando assim que a utilização de grades amostrais com elevada dimensão e ou ZM, visando reduzir custos não é uma boa opção, pois resultará em gastos mais elevados de insumos devido a recomendações equivocadas, além de possíveis perdas de produtividade e aumento dos danos ambientais (difícil mensuração), devido a incoerência na distribuição dos insumos.

A partir da análise de ponto de equilíbrio (Figura 7) entre os custos totais (custo de amostragem + desvios de recomendação de insumos) e a quantidade necessária de soja a ser produzida, visualiza-se que na amostragem em grade de 0,5 ha haveria a necessidade da produção de  $105 \text{ kg ha}^{-1}$  de soja para equilibrar os custos totais. Com o aumento da dimensão da grade amostral houve aumento da quantidade de soja necessária a ser produzida, devido aos desvios de recomendação, chegando a  $165 \text{ kg ha}^{-1}$  na grade de 4,5 ha. Já nas ZM o custo total equivaleria à necessidade de produção de mais de  $190 \text{ kg ha}^{-1}$  de soja. Sendo assim, o saldo entre o melhor e pior esquema de amostragem foi de  $178 \text{ kg ha}^{-1}$  de soja, o qual ocorreu entre a amostragem referência e a ZM (Alt). Amado e Santi (2007) citaram que a viabilidade econômica da utilização de ferramentas de AP, está relacionado à variabilidade existente e ao nível de acerto nas recomendações realizadas, corroborando com os resultados obtidos neste estudo.

Figura 7 – Ponto de equilíbrio entre o custo total (erros de recomendação + custo de amostragem)  $\text{ha}^{-1}$  e do saldo de diferentes esquemas de amostragem com relação à amostragem referência (grade de 0,5 ha) com a quantidade de  $\text{kg ha}^{-1}$  de soja a ser produzidos, Boa Vista das Missões - RS, Brasil.



### 3.5.5 Análise dos custos totais de fertilizantes recomendados e de amostragem

Analisando-se os custos totais de insumos recomendados em cada esquema de amostragem (Tabela 6), visualiza-se que a amostragem na grade de 0,5 ha foi a que teria o maior gasto com insumos (R\$ 66.484 reais), com excessão das grades de 2 e 3 ha que foram ainda superiores, porém próximas da referência. Já nos demais esquemas de amostragem os gastos com insumos foram inferiores a R\$ 60.000 reais corroborando com os resultados obtidos por Cherubin et al. (2011) em que observaram maiores custos nas recomendações de  $\text{K}_2\text{O}$  utilizando grade amostral comparado a amostragem convencional. Avaliando-se o custo total (fertilizantes recomendados + custo de amostragem) observa-se que a grade de 0,5 ha foi o que obteve o valor mais elevado (R\$ 81.064 reais), sendo superior R\$ 8.193 reais que o custo da grade de 1 ha. Porém deve-se salientar que apesar de o custo total ser mais elevado a recomendação do fertilizante é mais precisa. Fiorin et al. (2011) citaram que o manejo das lavouras a partir da amostragem convencional pode resultar na redução de gastos com insumos, contudo, tais recomendações são equivocadas e representam menores possibilidades de ganhos em produtividade.

Tabela 6 – Análise econômica dos desvios de recomendações de  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  e calcário realizados a partir de parâmetros obtidos na amostragem convencional (Conv), convencional simplificada (Simp), grades amostrais e zonas de manejo delimitados a partir da produtividade (Prod) e altitude (Alt) superiores a recomendação realizada com base na amostragem referência (grade 0,5 ha) Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

FV	Grade amostral				Zona de manejo		Conv	Conv Simpl	
	0,5 ha	1 ha	2 ha	3 ha	4,5 ha	Prod			Alt
N	243	119	60	43	29	5	4	5	1
CI $P_2O_5$ (R\$)	9.955	7.752	8.828	7.783	7.256	1.253	8.245	3.706	0
CI $K_2O$ (R\$)	7.478	7.448	7.508	9.905	6.950	6.298	4.680	3.970	6.688
CI calcário (R\$)	49.051	49.341	50.843	50.009	51.679	47.617	47.070	47.343	48.231
CTI (R\$)	66.484	64.541	67.179	67.695	65.886	55.167	59.995	55.019	54.919
CA (R\$)	14.580	8.330	4.800	3.570	2.610	750	600	500	200
Custo total (R\$)	81.064	72.870	71.979	71.265	68.496	55.917	60.595	55.519	55.119
Saldo R\$	0	-8.193	-9.085	-9.799	-12.568	-25.147	-20.469	-25.544	-25.945

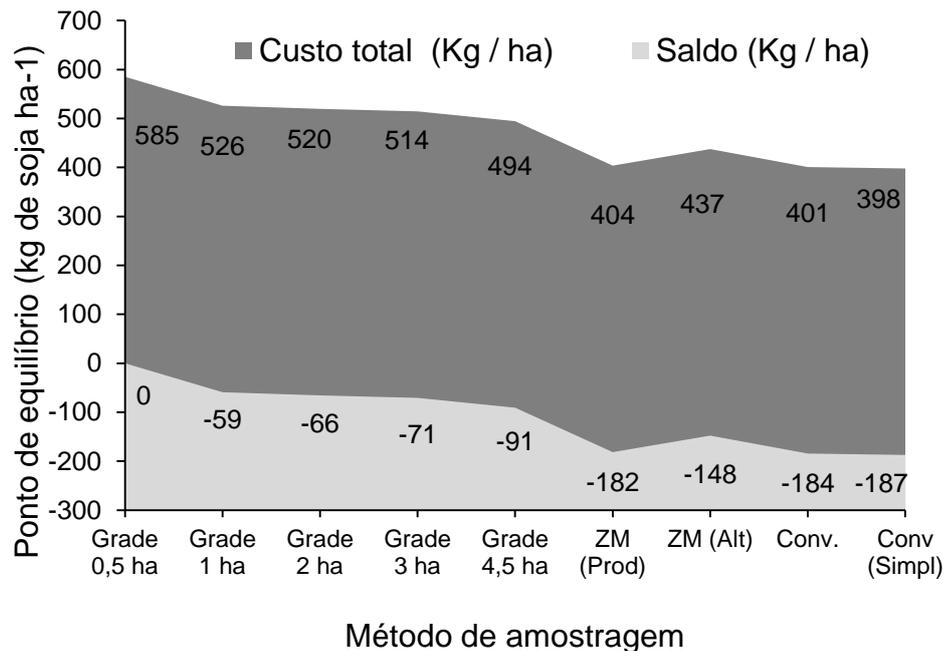
N= Número de amostras; CI= Custo com insumos; CTI= Custo total com insumos; CA= Custo da amostragem; Custo total= CTI +CA; Saldo= Custo total dos diferentes métodos de amostragem – custo total da amostragem referência.

Na Figura 8, é apresentado quantos  $kg\ ha^{-1}$  de soja seriam necessários para gerar um ponto de equilíbrio com os custos totais dos esquemas de amostragem. Observa-se que se for comparado apenas as amostragens em grades amostrais que a utilização da grade de 0,5 ha resultou na necessidade de produção de 585  $kg\ ha^{-1}$  de soja, sendo que com o aumento da dimensão da grade amostral houve redução da quantidade necessária de soja, sendo de 494  $kg\ ha^{-1}$  na grade de 4,5 ha, podendo se observar que é pequena a diferença de custos entre as grades amostrais (91  $kg\ ha^{-1}$ ). Tanto as ZM quanto as amostragens convencionais tiveram menores custos que a amostragem em grades, sendo o menor valor observado para a amostragem convencional simplificada em que necessitaria de apenas 398  $kg\ ha^{-1}$  de soja para haver equilíbrio dos custos.

A partir do saldo entre a amostragem na grade de 0,5 e o esquema de amostragem com menor custo que foi a amostragem convencional haveria a necessidade de elevar a produtividade em 187  $kg\ ha^{-1}$  para haver viabilidade econômica no uso da grade amostral referência. Mallarino e Wittry (2001) citaram que para o esquema amostral que representa maiores custos no manejo da fertilidade ser economicamente viável é necessário que haja redução na quantidade

de insumos recomendados, ou então se eleve a produtividade das culturas, apesar de esse segundo ponto ser de mais difícil mensuração.

Figura 8 – Ponto de equilíbrio entre o custo total (erros de recomendação superiores + custo de amostragem)  $\text{ha}^{-1}$  e do saldo de diferentes métodos de amostragem com relação à amostragem referência (grade de 0,5 ha) com a quantidade de kg de soja a ser produzidos, Boa Vista das Missões - RS, Brasil.



Esse resultado obtido está atrelado principalmente as quantidade de fertilizantes recomendados, sendo que nas ZM para todos os insumos houve menores quantidades recomendadas. Cherubin et al. (2011) comparando amostragem em grades com convencional, observaram que a utilização de grades amostrais resultou em menores gastos com insumos, contudo, a área estudada por esses autores apresentava uma menor fertilidade que a do presente estudo fazendo com que a amostragem convencional recomende consequentemente uma dose elevada para toda a área.

Fiorin et al. (2011) comparando 7 áreas manejadas a partir de aplicações a taxa variada de insumos e convencional concluíram que as áreas manejadas pela AP apresentaram produtividades superiores em 3,1 a 6 sacas (186 a 360 kg) de soja  $\text{ha}^{-1}$ , representando um retorno econômico em média 11,7%. Demonstrando assim que o saldo negativo observado para as amostragens em grades que foi de no máximo 187  $\text{kg ha}^{-1}$  (3,12 sc  $\text{ha}^{-1}$ ) em relação às ZM e convencional representam um

baixo custo, os quais seriam facilmente cobertos pela elevação da produtividade das culturas devido ao manejo correto dos insumos. Além disso, as amostragens de solo são realizadas normalmente a cada dois anos, devendo-se portanto, os custos de amostragem serem rateados em duas safras agrícolas. Schossler et al. (2011) citaram que a aplicação correta de insumos é essencial, pois pode representar incrementos significativos de produtividade.

De maneira geral, todas as tecnologias aplicadas nos cultivos representam o aumentos dos custos de produção, porém, a sua utilização visa o aumento da produtividade das culturas. Além disso, outro aspecto que deve ser computado ao se avaliar o impacto de esquemas de amostragem refere-se ao benefícios ambientais advindos da racionalização no uso de insumos, contudo, Mallarino e Wittry (2001) citaram que existe grande dificuldade em se determinar tais benefícios, pois alguns são de difícil mesuração, principalmente os relacionados a melhoria na qualidade da água.

### **3.5.6 Discussão**

A partir do presente estudo constatou-se que a utilização de ZM para orientar amostragens de solo, visando a correção dos mesmos não foram eficientes. Contudo, a utilização de mapas de produtividade das culturas para delimitação das ZM pode apresentar outras potencialidades como por exemplo, na recomendação de fertilizantes, no que tange à reposição de nutriente exportados na colheita e à expectativa de produtividade das culturas, a qual representa uma quantidade significativa da dose aplicada atualmente nas lavouras (CQFS – RS/SC, 2004), podendo-se ter diferentes expectativas de rendimentos em cada ZM, e conseqüentemente elevar a eficiência no manejo dos fertilizantes (MALLARINO e WITTRY, 2001; AMADO et al., 2006), reduzindo os custos e conseqüentemente elevando a rentabilidade da área (LEMAINSKI, 2007). Além disso, caso toda a área estivesse com os teores de nutriente acima do nível crítico a utilização de ZM não seria eficiente para se conhecer a variabilidade espacial dos atributos, porém não resultaria em desvios de recomendação, podendo ser esse um dos motivos que as ZM tem sido utilizada em larga escala nos EUA, pois os seus solos de maneira geral apresentam elevados níveis de fertilidade (HOLLAND et al., 2013).

A partir da abordagem econômica dada a este estudo constatou-se que mesmo uma área em que apresentava grande parte de sua extensão sem a necessidade de aplicação de fertilizantes a grade amostral mais densa foi a mais viável economicamente. Além disso, caso esse estudo fosse realizado em áreas que não utilizam ferramentas de AP, e/ou apresentam maior potencial de resposta às adubações (baixa fertilidade) gerariam desvios de recomendação ainda mais elevados nas grades menos densas (CLAY et al., 2000). Silva et al. (2007) citaram a necessidade da realização de análises econômicas sobre a utilização de ferramentas da AP, afim de demonstrar se são realmente viáveis de serem utilizadas pelos produtores.

Estudando intensidades amostrais para a recomendação de fertilizantes e corretivos Souza et al. (2014) concluíram que a utilização de no mínimo 100 pontos devem ser utilizados para a amostragem de solo. Contudo, mais importante que a definição do número mínimo de pontos, é a definição da dimensão da grade amostral, pois ela poderá ser aplicada a áreas com diferentes extensões (CHERUBIN et al., 2014). No presente estudo na grade de 1 ha haviam 119 pontos amostrais e mesmo assim, a utilização de uma grade de 0,5 ha com 243 pontos foi mais eficiente, principalmente quando se faz uma análise de viabilidade econômica. Estudos dessa natureza são essenciais para uma mudança de paradigmas, até por que muitos autores citaram que a amostragem em grades inferiores a 1 ha, conforme recomendações técnicas da literatura (NANNI et al., 2011; SOUZA et al., 2014; CHERUBIN et al., 2015) poderiam ser inviáveis economicamente (GELDERMAN et al., 2006), porém nesse estudo constatou-se que a utilização da grade de 0,5 ha foi a mais viável economicamente.

### **3.6 CONCLUSÕES**

O aumento da dimensão da grade amostral resultou em progressivas elevações nos desvios de recomendação, tanto de fertilizantes quanto de corretivo.

As recomendações realizadas com base nos dados obtidos em ZM não foram apropriadas, resultando em desvios maiores que a amostragem convencional e grades amostrais, sendo sua eficiência equiparável à amostragem convencional simplificada.

O esquema amostral que mostrou maior viabilidade econômica foi a grade amostral de 0,5 ha.

### 3.7 AGRADECIMENTOS

A Fazenda Vila Morena, pertencente ao Grupo Schaedler pela disponibilização da área de estudo. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

### 3.8 REFERÊNCIAS

AMADO, T. J. C. et al. Projeto Aquarius-Cotrijal: pólo de agricultura de precisão. **Plantio Direto**, v. 91, n. 1, p. 1-10, 2006.

AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L. Agricultura de precisão aplicada ao aprimoramento do manejo do solo. In: FIORIN, J. E. (Ed.). **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Passo Fundo; Berthier, 2007. Cap. 6, p. 99-144.

BOTTEGA, E. L. et al. Sampling grid density and lime recommendation in an Oxisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1142-1148, 2014.

CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.

CHERUBINI, M. R. et al. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 425-432, 2014.

CHERUBIN, M. R. et al. Demonstração da viabilidade técnica e econômica da utilização de taxa variável em área manejada com agricultura de precisão. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 1-10, 2011.

CIAY, D. E. et al. Precision Farming Protocols. Part 2. Comparison of Sampling Approaches for Precision Phosphorus Management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Boulder, v. 31, n. 19-20, p. 2969-2985, 2000.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Custos de produção. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1546&t=2>>. Acessado em 24 jan. 2016.

DINKINS, P.; JONES, C. Soil Sampling Strategies. **Mont Guide**, Bozeman v. 4, n. 8, p. 1-4, 2008. Disponível em: <<http://store.msueextension.org/publications/AgandNaturalResources/MT200803AG.pdf>>. Acessado em: 1 jan. 2016.

FERGUSON, R. B.; HERGERT, G. W. Soil Sampling for Precision Agriculture. University of Nebraska–Lincoln. Extension. 2009. 4 p. Disponível em: <<http://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/ec154.pdf>>. Acessado em: 24 jan. 2016.

FIORIN, J. E.; BERTOLLO, G. M.; WYZYKOWSKI, T. Adubação fosfatada e potássica para alta produtividade: proposta de nova recomendação. In: XVII SEMINÁRIO INSTITUCIONAL DE ENSINO PESQUISA E EXTENÇÃO. 2012, Cruz Alta. **Anais...** Cruz Alta: Unicruz, 2012. Disponível em: <<http://www.unicruz.edu.br/seminario/downloads/anais/ccaet/adubacao%20fosfatada%20e%20potassica%20para%20alta%20produtividade%20proposta%20de%20nova%20recomendacao.pdf>>. Acessado em 1 jan. 2016.

FIORIN, J. E. et al. Viabilidade técnica e econômica da agricultura de precisão no sistema cooperativo do rio grande do sul. In: XVI SEMINÁRIO INSTITUCIONAL DE ENSINO PESQUISA E EXTENÇÃO. 2011, Cruz Alta. **Anais...** Cruz Alta; Unicruz, 2011. Disponível em: <<http://www.unicruz.edu.br/seminario/artigos/agrarias/VIABILIDADE%20T%C3%89CNICA%20E%20ECON%C3%94MICA%20DA%20AGRICULTURA%20DE%20PRECIS%C3%83O%20NO%20SISTEMA%20COOPERATIVO%20DO%20RIO%20GRANDE%20D.pdf>>. Acessado em 1 jan. 2016.

FRANZEN, D. W. **Developing Zone Soil Sampling Maps**. NDSU Technical Bulletin, NDSU Extension Service, Fargo, ND. 2008. 4 p. Disponível em: <<https://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/soilfert/sf1176-2.pdf>>. Acessado em 24 jan. 2016

GELDERMAN, R.; GERWING, J.; REITSMA, K. **Recommended Soil Sampling Methods for South Dakota**. South Dakota State University. 2006, 6 p. Disponível em: <[agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS935](http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS935)>. Acessado em: 23 jan. 2016.

HOLLAND, J. K.; ERICKSON, B.; WIDMAR, D. A. **Precision Agricultural services Dealership Survey Results**. Sponsored by Croplife Magazine and Center for Food and Agricultural business. West Lafayette: Dept. of Agricultural Economics, Purdue University, 2013. Disponível em: <<http://agribusiness.purdue.edu/files/resources/rs-11-2013-holland-erickson-widmar-d-croplife.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

LEMAINSKI, C. L. **Agricultura de Precisão em Áreas Irrigadas com Pivô Central no Rio Grande do Sul**. 2007, 162 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. J. Efficacy of Grid and Zone Soil Sampling Approaches for Site-Specific Assessment of Phosphorus, Potassium, pH, and Organic Matter. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 5, n. 2, p. 131–144, 2004.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Management zones soil sampling: a better alternative to grid and soil type sampling? In: 13° THE INTEGRATED CROP MANAGEMENT CONFERENCE. 2001, Ames. **Anais...** Ames: Iowa State Univ. Extension. 2001. Disponível em: <[http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/ICM\\_2001\\_ZoneSampling\\_Publ.pdf](http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/ICM_2001_ZoneSampling_Publ.pdf)>. Acesso em: 1 jan. 2016.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MYLAVARAPU, R. S.; LEE, W. D. **Nutrient Management Series: Soil Sampling Strategies for Precision Agriculture**. IFAS Extension, University of Florida, Gainesville, 2014, 4 p. Disponível em: < <https://edis.ifas.ufl.edu/ss402>>. Acessado em: 1 fev. 2016.

NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, 2011.

OLIVEIRA, I. A. et al. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015.

PAUTSCH, G. R.; BABCOCK, B. A.; BREIDT, F. J. **Optimal Sampling Under a Geostatistical Model**. Iowa: Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University. 1998. 32 p. Disponível em: <[http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1228&context=card\\_workingpapers](http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1228&context=card_workingpapers)>. Acessado em: 1 fev. 2016.

PETERS, J. B.; LABOSKI, C. A. M. **Sampling soil for testing**. Extension Cooperative. 2013. 4 p. Disponível em: <<http://www.soils.wisc.edu/extension/pubs/A2100.pdf>>. Acessado em: 1 fev. 2016.

SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012.

SANTI, A. L. et al. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

SANTI, A. L. et al. A calagem na agricultura de precisão. **A granja**, v. 728, n. 1, p. 65-67, 2009.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SCHLINDWEIN, J. A. **Calibração de métodos de determinação de fósforo e potássio do solo sob sistema plantio direto**. 2003. 169p. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.

SCHMIDT, J. P.; TAYLOR, R. K.; MILLIKEN, G. A. Evaluating the potential for site-specific phosphorus applications without high-density soil sampling. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 66, n. 1, p. 276-283, 2002.

SCHOSSLER, D. S. et al. Fertilização potássica analisada economicamente com ferramentas de agricultura de precisão. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 595-603, 2011.

SILVA, C. B. et al. The economic feasibility of precision agriculture in Mato Grosso do Sul State, Brazil: a case study. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 8, n. 6, p. 255-265, 2007.

SIQUEIRA, D. S. et al. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232-234, n. 2, p.172-182, 2014.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 689-698, 2015.

SOUZA, Z. M. et al. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261-268, 2014.

## APÊNDICE

**Apêndice A** – Análise estatística descritiva dos dados de índice SMP amostrados de forma convencional, convencional simplificada, grades amostrais e zonas de manejo delimitadas por mapas de produtividade dados de altitude, Boa Vista das Missões – RS, Brasil.

Parâmetros	Grade amostral					Zona de manejo		Conv	Conv simpl
	0,5	1	2	3	4,5	Prod.	Alt.		
N <sup>(1)</sup>	243	119	60	42	29	5	4	5	1
Mínimo	5,20	5,30	5,30	5,30	5,40	5,68	5,74	5.66	-
Média	5,74	5,73	5,72	5,72	5,71	5,74	5,79	5.78	5,78
Máximo	6,20	6,10	6,10	6,10	6,00	5,90	5,84	5.88	-
DP	0,19	0,19	0,19	0,21	0,18	0,09	0,04	0.08	-
CV	3,28	3,34	3,26	3,60	3,13	1,56	0,71	1.42	-
Cs	-0,05	0,00	-0,16	-0,21	0,06	-	-	-	-
Ck	-0,10	-0,38	-0,20	-0,46	1,20	-	-	-	-
W <sub>(2)</sub>	0,97 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	0,96*	0,97*	0,93*	-	-	-	-

(1) n: número de observações (pontos amostrais); DP: desvio padrão; CV (%): coeficiente de precisão; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; (2) Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (\*) significativo em níveis de  $p < 0,05$  e (ns) não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

## 4 DISCUSSÃO

A integração da utilização de uma análise econômica juntamente com a análise técnica foi essencial para elucidar qual a metodologia de amostragem apresenta maior viabilidade para ser utilizada pelos produtores. Pois no artigo 1 utilizando-se apenas análises técnicas, assim como nos trabalhos conduzidos por Souza et al. (2014) e Cherubin et al., (2015) concluiu-se que a utilização de uma grade amostral de 1 ha ainda conseguia inferir com precisão a variabilidade espacial dos atributos. Já no artigo 2, aonde se confrontou os custos de amostragem em cada esquema amostral, com os desvios de recomendação, concluiu-se que a utilização da grade mais densa foi a mais viável tanto tecnicamente que já era o esperado quanto economicamente.

Atualmente as grades amostrais mais utilizadas a nível comercial na região Sul variam de 1 a 3 ha (CHERUBIN et al., 2014b), os desvios de recomendações observados no presente estudo podem servir de incentivo para que produtores utilizem grades amostrais mais densas, principalmente na primeira amostragem em que não se conhece a variabilidade espacial do solo. Observa-se na literatura que muitos trabalhos investigando as relações entre variabilidade espacial dos atributos químicos do solo com a produtividade das culturas, não visualizaram a presença de correlação entre as variáveis (SOUZA et al., 2008; SOUZA, et al., 2010), esse fato acaba muitas vezes desestimulando a utilização de amostragens georreferenciada de solo (SANTI et al., 2012). Contudo, a ausência de relação entre atributos químicos do solo e produtividade pode em partes estar atrelado a erros metodológicos de amostragem de solo e/ou de mapeamento da produtividade das culturas. Conforme relatado por Souza et al. (2014) e o que se visualizou nesse estudo, a utilização de grades amostrais muito extensas resultam na super ou sub aplicação de insumos em subáreas da lavoura e podem mascarar os benefícios da AP.

Os resultados do presente estudo mostraram que a utilização de ZM para orientar amostragem de solo, conforme alguns autores vinham apontando (MALLARINO e WITTRY, 2004; MOLIN et al., 2015) não é uma metodologia eficiente. Contudo, a utilização de ZM para outros fins tem apresentado resultados satisfatórios, como por exemplo para o uso de diferentes densidades de semeadura,

cultivares/híbridos (HORBE et al., 2013; CORAZZA et al., 2015), colheita de sementes com diferentes níveis de qualidade, etc.

Para trabalhos futuros recomenda-se o teste de grades amostrais mais densas que as utilizadas nesse estudo, a fim de se poder inferir sobre a viabilidade de se utilizar malhas mais densas que 0,5 ha. Assim como, realizar trabalhos em redes, englobando áreas com diferentes tamanhos, históricos de utilização de AP e tipos de solo, visando a determinação de protocolos para a amostragem de solo que se adeque às diferentes realidades dos produtores. Podendo-se utilizar os resultados do presente estudo e de outros similares como de Souza et al. (2014) e Cherubin et al. (2015) para se definir as metodologias a serem avaliadas. Os resultados obtidos no presente estudo vão de encontro com o conceito de agricultura de precisão, no que tange o manejo do solo citado por Dobermann e Ping (2004) em que citaram que o principal objetivo é a aplicação de insumos no local correto, em um momento adequado e nas quantidades necessárias em áreas cada vez mais reduzidas, tanto quanto as tecnologias permitam e haja viabilidade econômica.

## 5 CONCLUSÃO

O aumento da dimensão da grade amostral resultou em perdas de informações sobre a variabilidade espacial dos atributos e conseqüentemente elevou os desvios nas recomendações tanto de fertilizantes quanto de corretivo.

Para uma adequada aferição da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e uma acurada prescrição de insumos recomenda-se a utilização de grade amostral de 0,5 ha.

## REFERENCIAS

- ALBA, J. P. et al. Agricultura de precisão: Mapas de rendimento e de atributos de solo analisados em três dimensões. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 29-41, 2011.
- BOTTEGA, E. L. et al. Sampling grid density and lime recommendation in an Oxisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1142-1148, 2014.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n. 6, p. 1329-1339, 2007.
- CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.
- CHERUBINI, M. R. et al. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 425-432, 2014.
- COLVIN, T. S. et al. Yield variability within a central Iowa field. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 40, n. 4, p. 883-889, 1997.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Custos de produção. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1546&t=2>>. Acessado em 24 jan. 2016.
- CORASSA, G. M. **Manejo por ambiente: atributos de solo e desempenho de cultivares de soja**. 2015. 124p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.
- DINKINS, P.; JONES, C. Soil Sampling Strategies. **Mont Guide**, Bozeman v. 4, n. 8, p. 1-4, 2008. Disponível em: <<http://store.msuextension.org/publications/AgandNaturalResources/MT200803AG.pdf>>. Acessado em: 1 jan. 2016.
- DODERMANN, A.; PING, J. L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 285-297, 2004.
- GELDERMAN, R.; GERWING, J.; REITSMA, K. **Recommended Soil Sampling Methods for South Dakota**. South Dakota State University. 2006, 6 p. Disponível em: <[agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS935](http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS935)>. Acessado em: 23 jan. 2016.

HÖRBE, T. A. N. et al. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 14, n. 4, p. 450-465, 2013.

MALLARINO, A. P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 5, p. 1473–1481, 1996.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. J. Efficacy of Grid and Zone Soil Sampling Approaches for Site-Specific Assessment of Phosphorus, Potassium, pH, and Organic Matter. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 5, n. 2, p. 131–144, 2004.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Management zones soil sampling: a better alternative to grid and soil type sampling? In: 13° THE INTEGRATED CROP MANAGEMENT CONFERENCE. 2001, Ames. **Anais...** Ames: Iowa State Univ. Extension. 2001. Disponível em: <[http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/ICM\\_2001\\_ZoneSampling\\_Publ.pdf](http://www.agronext.iastate.edu/soilfertility/info/ICM_2001_ZoneSampling_Publ.pdf)>. Acesso em: 1 jan. 2016.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLACO, A. F. Agricultura de precisão. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p .

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MONTANARI, R. et al. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 13, n. 5, p. 542-552, 2012.

NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, 2011.

OLIVEIRA, I. A. et al. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015.

PETERS, J. B.; LABOSKI, C. A. M. **Sampling soil for testing**. Extension Cooperative. 2013. 4 p. Disponível em: <<http://www.soils.wisc.edu/extension/pubs/A2100.pdf>>. Acessado em: 1 fev. 2016.

SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012.

SANTI, A. L. et al. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

SIQUEIRA, D. S. et al. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232-234, n. 2, p.172-182, 2014.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 689-698, 2015.

SOUZA, Z. M. et al. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010.

SOUZA, Z. M. et al. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristóvão, v. 8, n. 2, p. 183-190, 2008.

SOUZA, Z. M. et al. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261-268, 2014.