

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do
Solo e da Água



Tese

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DE ARROZ IRRIGADO EM AREA SISTEMATIZADA DE
TERRAS BAIXAS**

Antioniy Severo Winkler

Pelotas, 2018.

Antoniony Severo Winkler

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DE ARROZ IRRIGADO EM AREA SISTEMATIZADA DE
TERRAS BAIXAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Timm
Coorientador: Pesq. Dr. José Maria Barbat Parfitt

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

W775v Winkler, Antony Severo

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DE ARROZ IRRIGADO EM ÁREA SISTEMATIZADAS DE TERRAS BAIXAS / Antony Severo Winkler ; Luis Carlos Timm, orientador ; José Maria Barbat Parfitt, Claudia Fernanda Almeida Teixeira Gandra, coorientadores. — Pelotas, 2018.

84 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Várzea. 2. Agricultura de precisão. 3. Fertilidade do solo. I. Timm, Luis Carlos, orient. II. Parfitt, José Maria Barbat, coorient. III. Gandra, Claudia Fernanda Almeida Teixeira, coorient. IV. Título.

CDD : 636.18

Antoniony Severo Winkler

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DE ARROZ IRRIGADO EM AREA SISTEMATIZADA DE
TERRAS BAIXAS**

Tese apresentada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 31/08/2018

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Carlos Timm (Orientador)
Universidade Federal de Pelotas

Dra. Walkyria Bueno Scivittaro
Embrapa Clima Temperado

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria
Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Leandro Sanzi Aquino
Universidade Federal de Pelotas

Aos meus filhos Antonio (*in memoriam*) e Francisco (*in memoriam*);

À minha filha Aurora

À minha esposa Luana.

Dedico

Agradecimentos

A Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do solo e da água pela oportunidade de crescimento intelectual e profissional ao longo destes anos de estudos.

Aos meus pais por estarem sempre ao meu lado, incentivando e confiando nas minhas escolhas.

Aos meus queridos avós paternos e minha avó materna (todos in memoriam) pelos valiosos exemplos e valores que sempre me passaram.

Ao meu avô Antonio de Deus Severo, a quem tenho a honra de ser seu neto, por todo o apoio, carinho e valores transmitidos a vida toda.

A professora Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra pela co-orientação no doutorado.

Ao professor Luis Carlos Timm pela orientação e amizade construída ao longo destes anos de doutoramento.

Ao pesquisador da Embrapa Clima Temperado José Maria Barbat Parfitt pela co-orientação desde o mestrado, pelos ensinamentos e acima de tudo a amizade.

Aos funcionários da Embrapa Clima Temperado pelo suporte na condução dos experimentos, em especial ao Mikael Bueno pela condução dos experimentos no ano de 2015 quando eu estava nos EUA-AR.

Aos meus colegas de Pós-Graduação, Renata Albert, Daniela Schossler, Jaqueline Trombeta, Marcos do Vale, Marília Pinto, Leandro Aquino e Wildon Panziera, Alexandra Soares pela eterna amizade.

E a minha família, a minha esposa Luana pela cumplicidade e amor que me dedica, e a minha filha Aurora que ilumina meus dias desde sua chegada.

Muito obrigado.

RESUMO

WINKLER, Antoniony Severo. **VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DE ARROZ IRRIGADO EM ÁREA SISTEMATIZADAS DE TERRAS BAIXAS**. 2018. 84f. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Em uma área sistematizada há cinco anos, na Embrapa Clima Temperado, foi desenvolvido um estudo com o objetivo de avaliar o efeito da sistematização na produtividade das culturas do arroz irrigado e do cornichão. Para tanto foram demarcados 100 pontos (10 x 10m) nos quais foram determinados os seguintes atributos químicos de solo: pH em água, índice SMP, teores de fósforo (P), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), acidez potencial (Al + H), alumínio (Al) e teor de matéria orgânica (M.O.), além da profundidade de corte ou aterro provocados pela sistematização e produtividade e componentes do rendimento do arroz e matéria seca do cornichão. Utilizou-se a análise de componentes principais para verificar a interação entre essas variáveis. Antes da semeadura do cornichão foi realizada adubação de correção da fertilidade do solo em taxa variada. Após o cornichão a área foi semeada com arroz durante duas safras agrícolas. Foi avaliado o efeito da sistematização na variabilidade dos atributos químicos P e do K no solo e a produtividade do arroz irrigado ao longo do tempo. Os dados foram analisados através do coeficiente de variação. Não foi verificado efeitos negativos sobre a produtividade de matéria seca do cornichão. A sistematização afetou a variabilidade da produtividade do arroz irrigado, no entanto, não causou prejuízos à produtividade média. A adubação em taxa variada proporcionou um aumento de fertilidade da área e uma menor heterogeneidade na distribuição espacial dos teores químicos do solo.

Palavras Chave: Várzea, Agricultura de precisão.

ABSTRACT

WINKLER, Antony Severo. **SPACE-TIME VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES AND IRRIGATED RICE YIELD IN LAND LEVELING**. 2018. 84f. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas

In a land leveled area five years ago, in Embrapa Clima Temperado, a study was developed to evaluate the effect of land leveling on the yield of irrigated rice and *Lotus Corniculatus*. To perform this experiment 100 points were delineated and the following soil chemical properties were analyzed: PH in water, SMP index, Phosphorus (P), boron (B), iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), zinc (Zn), calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), sodium (Na), potential acidity (Al + H), aluminum (Al) concentration and organic matter (OM). In addition, the depth of the cut or fill occasioned by the land leveling process, yield and yield component was evaluated. Principal component analysis was employed to verify the interaction among these variables. Before sowing the *Lotus Corniculatus*, fertilization for correction of the soil fertility was carried out in varied rates. After the *Lotus Corniculatus* cultivation the area was planted with rice for two seasons. The effect of the land leveling on the variability of chemical attributes P and K in the soil and the irrigated rice yield over time was evaluated. Data were analyzed using the coefficient of variation. There were no negative effects on the dry matter productivity of the *Lotus Corniculatus*. The land leveled affected the yield variability of the irrigated rice, however, did not cause damages to the average productivity. Fertilization at varied rates provided an increase in area fertility and reduced heterogeneity in spatial distribution of soil chemical contents.

Key words: Low land, precision agriculture.

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização da área experimental: a) Embrapa Clima Temperado – Estação Experimental de Terras Baixas, Capão do Leão/RS; b) 100 pontos amostrados em malha de 10 x 10 m.	23
Figura 1 A - Linha do tempo das atividades realizadas na área experimental, e as variáveis utilizadas no capítulo 1	23
Figura 2 - Modelo digital de elevação da área experimental antes (a) e depois (b) da sistematização.....	25
Figura 3 - Modelo digital de elevação dos cortes e aterros provocados pela sistematização.....	25
Figura 4 - Regressão linear das doses recomendadas de fósforo (a) e potássio (b) em função do teor do nutriente no solo.....	27
Figura 5 - Autovetores das variáveis químicas do solo, da produtividade e esterilidade de grãos da cultura do arroz e das magnitudes de corte e aterro.	35
Figura 6A - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro, da produtividade do arroz irrigado e dos atributos químicos do solo.....	37
Figura 6B - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro e dos atributos químicos do solo.....	37
Figura 6C - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro e dos atributos químicos do solo.....	37
Figura 7 - Autovetores das variáveis químicas do solo, da produtividade de matéria seca do cornichão e das magnitudes de corte e aterro.	41
Figura 8 - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro, da produtividade do cornichão e dos atributos químicos do solo.	43
Figura 9 - Análise de regressão simples da produtividade do arroz irrigado na safra 2014/15 em função de cortes e aterros provocados pela sistematização em 2008. (*significativo ao nível de 1% pelo teste f).	44
Figura 10 - Dispersão dos dados de produtividade de matéria seca do cornichão na safra 2014 em função dos cortes e aterros provocados pela sistematização em 2008.	45

Figura 11 - Regressão linear das doses recomendadas de fósforo (a) e potássio (b) em função do teor do nutriente no solo adaptado pelo Manual de Adubação e Calagem para o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina de 2004.	51
Figura 12 - Distribuição dos fertilizantes nas unidades experimentais.	52
Figura 13 - Incorporação da adubação de correção com a utilização de grade niveladora.	52
Figura 14 - Distribuição espacial das zonas de corte e aterro da área experimental sistematizada. A geração dos mapas de distribuição espacial foi elaborada através dos parâmetros c_0 , c_0+C e A, apresentado em anexo 3.	58
Figura 15 - Distribuição espacial dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada em 2009.	59
Figura 16 - Distribuição espacial dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada em 2013.	60
Figura 17 - Distribuição espacial das doses de K_2O aplicadas em taxa variada na área experimental em 2013.	61
Figura 18 - Distribuição espacial dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada em 2015.	62
Figura 19 - Distribuição espacial dos Coeficientes de variação temporal (CVi) dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada para o período 2009-2015.	63
Figura 20 - Distribuição espacial dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada em 2009.	64
Figura 21 - Distribuição espacial dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada em 2013.	65
Figura 22 - Distribuição espacial das doses de P_2O_5 aplicadas em taxa variada na área experimental em 2013.	66
Figura 23 - Distribuição espacial dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada em 2015.	67
Figura 24 - Distribuição espacial dos coeficientes de variação temporal (CVi) dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada para o período 2009-2015.	68
Figura 25 - Distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado na safra 2014/15.	70

Figura 26 - Distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado na safra 2015/16.	71
Figura 27 - Distribuição espacial dos coeficientes de variação temporal (CVi) da produtividade do arroz irrigado para as safras 2014/15 e 2015/16.	72

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resultados da análise estatística descritiva e do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov aplicados aos atributos químicos do solo da área experimental cinco anos após a sistematização.	32
Tabela 2 - Resultados da análise estatística descritiva e do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov aplicados aos dados de matéria seca do cornichão e da produtividade e do desempenho agrônômico do arroz irrigado.....	34
Tabela 3- Análise estatística exploratória e teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (K-S) aplicados aos atributos P e K, produtividade e a adubação de P_2O_5 e K_2O antes, logo após (três meses) e após cinco anos e sete meses da sistematização.....	57

Sumário

1 Introdução	15
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1 Solos de Terras Baixas	17
2.2 Sistematização da superfície do solo	17
2.3 Agricultura de precisão.....	18
3 Objetivos	20
3.1 Objetivo geral	20
3.2 Objetivos Específicos	20
4 Hipóteses	20
5 Capítulo I - Atributos químicos do solo e a produtividade do arroz irrigado e do cornichão em área sistematizada há cinco anos.....	21
5.1 Introdução	21
5.2 Material e métodos.....	23
5.2.1 Histórico da área experimental.....	23
5.2.2 Avaliação dos atributos químicos do solo.....	26
5.2.3 Cultivo do cornichão e do arroz irrigado	26
5.2.4 Análise estatística	29
5.3 Resultados e discussão.....	31
5.3.1 Análises descritivas e teste de normalidade.....	31
5.3.1.1 Atributos químicos do solo	31
5.3.1.2 Desempenho agrônomo e produtividade da cultura do arroz irrigado e produção de matéria seca do cornichão	33
5.3.2 Análise dos componentes principais	34
5.3.2.1 Efeito da sistematização e dos atributos químicos do solo sobre a produtividade do cornichão e do arroz	34
5.3.2.2 Magnitude de cortes e aterros e desempenho agrônomo do cornichão e do arroz	44
5.4 Conclusão	46
6 Capítulo II – Distribuição espacial e estabilidade temporal do fósforo e potássio no solo e da produtividade do arroz em área sistematizada.	47
6.1 Introdução	47
6.2 Materiais e Métodos	50

6.3 Resultados e Discussão	55
6.3.1 Distribuição espacial e estabilidade temporal do potássio no solo.....	58
6.3.2 Distribuição espacial e estabilidade temporal do fósforo no solo	64
6.3.3 Distribuição espacial e estabilidade temporal da produtividade do arroz irrigado	69
6.4 Conclusões.....	73
7 Considerações Finais	74
Referências	75
Anexos	82

1 Introdução

Os solos que constituem o ecossistema de terras baixas do sul do Brasil situam-se, majoritariamente, no Rio Grande do Sul (RS), apresentando como característica principal a deficiência de drenagem. Os tipos de solo mais comumente encontrados são os Planossolos e os Gleissolos, também conhecidos como solos hidromórficos, ocupando uma área de aproximadamente 5,4 milhões de hectares no Estado. Estes solos caracterizam-se pela pequena profundidade, presença de uma sequência de horizontes A + E, com baixa condutividade hidráulica do solo saturado e horizonte B praticamente impermeável.

A principal cultura cultivada nesse ambiente típico do bioma Pampa e da metade sul do RS é o arroz irrigado por inundação contínua, que ocupa, anualmente, uma área aproximada de um milhão cento e vinte mil de hectares, sendo responsável por mais de 69% da produção nacional de arroz. O restante da área é utilizada para o cultivo de soja e, principalmente, com pecuária de corte, entretanto com baixos níveis de produtividade. Ainda que os solos hidromórficos, em função das suas características, possuam grande aptidão ao cultivo de arroz irrigado por inundação, quando são implantadas outras culturas que compõem o sistema de produção, os resultados obtidos não são tão favoráveis principalmente em função da má drenagem.

Nos últimos anos, a metade sul do RS tem experimentado significativo aumento na área ocupada com o cultivo de soja e as previsões indicam continuidade desta prática de aumento nos próximos anos. Somente nas terras baixas, estima-se uma área cultivada com soja em rotação com arroz, em mais de trezentos mil hectares na safra 2015/2016.

A introdução de culturas como soja e milho na rotação beneficia em vários aspectos a cultura do arroz irrigado, principalmente no controle de plantas daninhas e especialmente no controle do arroz vermelho, que ainda continua sendo um dos principais problemas, o que contribui para racionalizar o uso da água e insumos na produção de alimentos.

A sistematização compreende a adequação da superfície do terreno, cortando as áreas de cotas mais altas e aterrando as áreas de cotas mais baixas eliminando as depressões e homogeneizando o microrelevo das áreas.

A sistematização proporciona benefícios ao manejo e ao desenvolvimento das culturas, como economia no uso da água durante a irrigação, melhor controle da lâmina de água, eficiência do uso de insumos e drenagem superficial, bem como, a introdução de outras culturas que compõem modelos de produção associados ao arroz irrigado. No entanto é necessário analisar a sua adaptabilidade, aprimorando os critérios a serem adotados para projetos de sistematização já que este é um processo caro e pode causar em alguns casos, prejuízos com respeito a fertilidade do solo, por ser um processo que movimenta volumes consideráveis de solo.

Agricultura de precisão (AP) é um sistema de manejo integrado de informações e tecnologias, fundamentado nos conceitos de que as variabilidades de espaço e tempo influenciam nos rendimentos dos cultivos. Com vistas ao tratamento da variabilidade espacial dos níveis de fertilidade, a AP é uma ferramenta que procura maximizar a produtividade através da correção dos níveis de fertilidade do solo pela distribuição de fertilizantes em taxa variada. Esta ferramenta pode ser aplicada em áreas sistematizadas para correção de fertilidade nas zonas de corte, que normalmente apresentam baixos níveis de fertilidade em função da exposição de uma camada sub superficial do solo.

Inúmeras estratégias podem ser implementadas para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes para maximizar os benefícios para o sistema produtivo. Algumas mudanças no manejo agrícola podem aumentar a eficiência do uso dos nutrientes através adubações equilibradas e fornecimento adequado de água através da sistematização da superfície do solo, além de potencializar o uso de rotação de culturas.

Em função do exposto, pode-se inferir que a introdução de novas tecnologias no sistema de rotação arroz irrigado-soja em terras baixas no RS com o intuito de aprimorar este sistema produtivo e buscar uma utilização racional dos recursos naturais merece especial atenção por parte dos pesquisadores da área. Desta forma, entende-se que a sistematização do solo pode ser uma alternativa importante para potencializar a diversificação do uso das terras baixas no RS.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Solos de Terras Baixas

As áreas de terras baixas no RS ocupam o equivalente a 5,4 milhões de hectares, representando 23% do território estadual (CHAVES et al., 2014), apresentando as principais classes de solos: os Planossolos (incluindo Gleissolos associados) ocupam 54,3% do território, em seguida de Neossolos (17,2%), Chernossolos (15,1%), Gleissolos (7,3%), Argissolo (3,9%), Vertissolos (1,3%) e Organossolos (0,9%) (PINTO et al. 2017).

Os solos de terras baixas são encontrados em planícies de rios, lagoas e lagunas, tendo como característica comum a formação, em condições variadas, de deficiência de drenagem ou hidromorfismo (STRECK et al., 2008).

Devido à gênese e ao alagamento durante o cultivo de arroz irrigado, os solos de terras baixas apresentam menores teores de óxidos quando comparados aos solos predominantes na metade norte do RS, com isso áreas de difícil drenagem utiliza-se a prática de sistematização, para melhorar o manejo agrícola da lavoura (GONÇALVES et al., 2011).

2.2 Sistematização da superfície do solo

A sistematização é uma técnica de preparo do solo que fundamentalmente visa melhorar o manejo da água em solos de terras baixas com micro relevo irregular, acarretando em algumas vantagens na produção de arroz, como o menor consumo de água, o manejo mais racional dos sistemas de irrigação e uma maior eficiência no uso de máquinas (PARFITT et al., 2014).

Esta técnica é utilizada para ajustar a superfície do solo e padronizar a sua inclinação, facilitando assim, a distribuição de água na irrigação e melhorando as condições de terreno para outras práticas agrícolas (BRYE et al., 2006).

Sharifi et al. (2014) mostram que a sistematização do solo pode apresentar efeitos negativos nas propriedades do solo devido ao intenso movimento causado pelas operações de corte e aterro.

A prática da sistematização afeta as condições da área, com isso a variância e variabilidade espacial das propriedades físicas, químicas e biológicas

do solo tem sido avaliado por diversos pesquisadores (KUOTSU et al., 2014; PETER et al., 2014).

Kosmas et al. (2000) afirmam que a movimentação do solo pode ocasionar diferença nas profundidades do perfil do solo útil às plantas e proporcionar fatores críticos para o desenvolvimento das plantas. Em contrapartida, de acordo com Martínez-CasasNovas; Ramos (2009), a prática de sistematização nas lavouras agrícolas favorece a uniformidade do terreno, desse modo, facilitando o movimento da infiltração de água no solo e favorecendo as práticas de mecanização.

O cultivo do solo altera seus atributos iniciais, por meio de práticas agrícolas usuais como calagem, adubação e outras práticas de manejo (PAZ-GONZÁLEZ et al., 2000), o que juntamente com os efeitos da sistematização produz mistura de horizontes e altera as condições naturais do solo, afetando vários de seus atributos (NUNES et al., 2002).

2.3 Agricultura de precisão

A baixa fertilidade natural dos solos de terras baixas e a grande variabilidade espacial que alguns nutrientes apresentam na mesma área, dificultam muitas vezes o entendimento para a tomada de decisão a respeito das doses de fertilizantes a serem utilizadas. Neste sentido torna-se necessário atuar de maneira pontual para tratar a variabilidade existente em uma mesma lavoura. Desta maneira, a Agricultura de Precisão pode ser utilizada como ferramenta tecnológica para o conhecimento e gerenciamento da variabilidade espacial e temporal de uma lavoura (CUNHA et al., 2015). Na área do arroz irrigado existem poucos trabalhos referentes aos benefícios resultantes da adoção desta nova tecnologia.

O termo Agricultura de Precisão (AP) no Brasil é relativamente novo. Relatos indicam o uso da AP desde o início do século XX, quando fora gerado o primeiro mapa de produtividade na Europa e a primeira adubação com doses variadas nos Estados Unidos (CUNHA et al., 2015).

Segundo Pierpaoli et al., (2013), no Brasil, os primeiros registros são datados nos anos 1980 com o advento do GPS (Sistema de Posicionamento Global por Satélites) em 1990.

MOLIN (2011), destaca que a AP começou a ganhar maior destaque 1995 com a importação de equipamentos como colhedoras com monitores de produtividade.

A AP permite a coleta intensiva de informações e dados, e no processamento em tempo e espaço para gerar utilizações mais eficientes em lavouras, melhorando a produção e qualidade ambiental (RAGAGNIN et al., 2012).

3 Objetivos

3.1 Objetivo geral

Desenvolver agricultura de precisão em área sistematizada considerando-se a variabilidade espacial da fertilidade e da produtividade do arroz irrigado (*Oryza sativa*) e do cornichão (*Lotus subbiflorus*).

3.2 Objetivos Específicos

- I. Conhecer o efeito dos cortes e aterros provocados pela sistematização há cinco anos sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas do arroz irrigado e do cornichão.
- II. Conhecer a distribuição espacial e a estabilidade temporal dos teores de fósforo e potássio do solo e da produtividade do arroz irrigado em área sistematizada fertilizada com taxa variada.

4 Hipóteses

- I. O processo de sistematização afeta a variabilidade espacial da fertilidade do solo sem prejuízos a produtividade do arroz irrigado e do cornichão.
- II. A fertilidade do solo em área sistematizada, tem a variabilidade espacial homogeneizada ao longo do tempo, quando aplicada adubação em taxa variada.

5 Capítulo I - Atributos químicos do solo e a produtividade do arroz irrigado e do cornichão em área sistematizada

5.1 Introdução

Em áreas de solo de terras baixas o arroz irrigado é a principal cultura, normalmente associada à pecuária de corte o que na maioria das vezes apresentam baixo rendimento econômico devido aos resultados obtidos na entressafra, que na grande maioria dos casos se mantem em restava de arroz durante o inverno. Estas áreas, propícias para o cultivo do arroz irrigado, caracterizam-se pela topografia plana e de difícil drenagem, onde os solos permanecem saturados nos períodos de maior precipitação pluvial. Estas características, normalmente são desfavoráveis para outras culturas (PARFITT et al., 2004).

As leguminosas forrageiras de clima temperado causam grande impacto na produção animal, principalmente pela aceitação e qualidade produzida (FLORES et al., 2004). O uso de leguminosas reduz a aplicação de fertilizantes, diversifica a dieta do animal, além de ser uma pastagem de melhor qualidade (SKONIESKI et al., 2011).

Dentre as leguminosas, destaca-se a espécie *Lotus subbiflorus* especificamente a cultivar “El Rincón”, que vem sendo bastante utilizada no Uruguai e no sul do Brasil. É uma planta de hábito hibernar (SILVEIRA et al., 2015), que se adapta à amplas classes de solos e tem tolerância a ambientes úmidos (CARÁMBULA, 2004). Segundo Ayala; Bermudez (2001), em solos superficiais, ácidos e com baixa fertilidade o *Lotus subbiflorus* se destaca frente a outras leguminosas. Diante destas características, torna-se uma alternativa viável para utilização como cobertura de solo no inverno, o que beneficiaria a cultura do arroz irrigado, podendo ser implantada no sistema de sobre semeadura.

O principal ponto de fragilidade para o bom desempenho de cultivos de sequeiro em áreas de terras baixas é a deficiente drenagem natural dos solos de várzea, determinada pela topografia predominantemente plana (PINTO et al., 1999). Porém, com o uso de técnicas agrícolas, entre elas a sistematização, que possibilitem a retirada da água superficial, é possível aumentar a eficiência da drenagem destes solos, possibilitando a implantação de um sistema produtivo

alternativo e, conseqüentemente, que possibilite um incremento econômico aos produtores.

No entanto, durante o processo de sistematização, para transformar a superfície num perfeito plano, ocorrem movimentos de solo com cortes nas partes relativamente altas e aterros nas partes relativamente baixas, acarretando alterações no ambiente em que a planta se desenvolve (PARFITT, 2009).

Parfitt et al. (2013) avaliaram os atributos químicos e biológicos do solo antes e após a sistematização e observaram que os valores de Ca, Mg, S, CTC, Mn, P, Zn e matéria orgânica do solo (MOS) diminuíram no perfil do solo, enquanto os de Al, K e CBM (Carbono da biomassa microbiana) aumentaram após a sistematização.

O cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o potássio (K), embora não estejam diretamente envolvidos nas reações de oxirredução, também têm seus teores alterados, pois, com a redução do solo, são deslocados dos sítios de troca pelo Fe^{2+} e Mn^{+2} , aumentando a concentração na solução do solo (VAHL, 1991).

Walker et al. (2003) em um estudo no condado de Bolivar e Coahoma no Mississippi nos EUA, avaliaram em sete áreas distintas os efeitos da sistematização em áreas de corte e aterro, os autores verificaram uma queda de até 25% na produtividade em áreas de corte em relação as áreas de aterro em cinco das sete áreas estudadas.

Da mesma forma, Dario (2001) desenvolveu um estudo em uma área de várzea localizada no Estado de São Paulo (solo Gley Pouco húmico), com o objetivo de avaliar os efeitos da sistematização na produtividade do arroz irrigado, em que a altura de corte média foi de 0,6 m. O autor concluiu que a sistematização reduziu os níveis de matéria orgânica e P, aumentou a concentração de Al e reduziu o rendimento médio do arroz em 50%, tornando a área inviável para o cultivo.

Segundo Parfitt et al. (2014) a relação observada entre os atributos químicos e a profundidade dos cortes e/ou aterros indica que o mapa de cortes e aterros, obtido no projeto de sistematização, é uma ferramenta útil para a recuperação do solo nas zonas degradadas através da adição de corretivos e/ou fertilizantes químicos ou orgânicos. Cabe ressaltar que os autores avaliaram esta relação três meses após a sistematização da área.

Assim, o objetivo deste trabalho foi conhecer o efeito dos cortes e aterros de uma área sistematizada há cinco anos sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas do arroz irrigado e do cornichão cultivado em sucessão.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Histórico da área experimental

A proposta do presente trabalho foi dar continuidade a um experimento que iniciou no ano de 2008 (PARFITT, 2009) onde foi avaliado o impacto da sistematização sobre os atributos físicos, químicos e biológicos em uma área de terras baixas. Esse experimento foi conduzido em uma área experimental pertencente à Estação Experimental Terras Baixas (ETB), da Embrapa Clima Temperado, localizada no município de Capão do Leão/RS, nas coordenadas $52^{\circ} 27' 59''$ W, $31^{\circ} 40' 12,75''$ S e altitude 16 m (Figura 1a). Para a elaboração do projeto de sistematização da área, foi estabelecida uma malha de 10 m x 10 m totalizando 100 pontos de amostragens (Figura 1b).

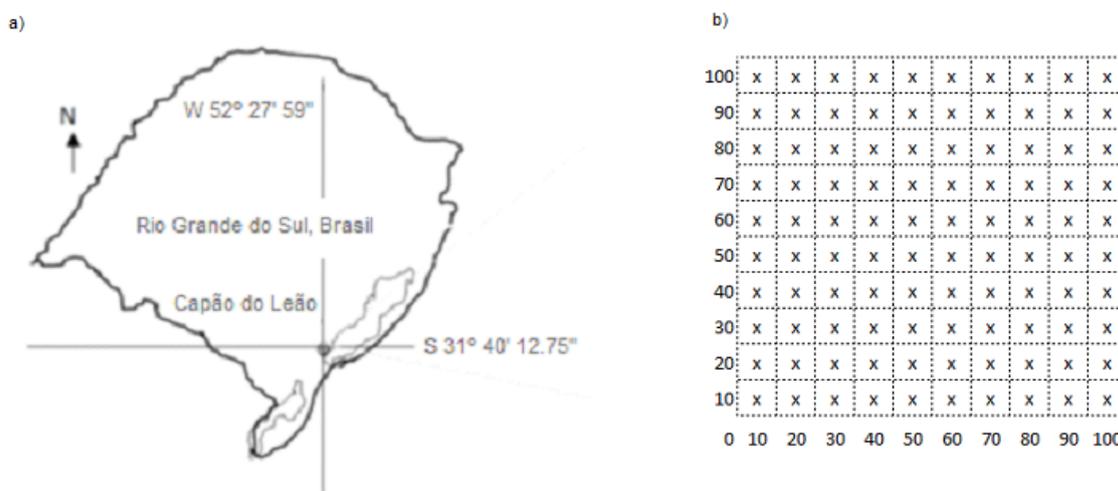


Figura 1 - Localização da área experimental: a) Embrapa Clima Temperado – Estação Experimental de Terras Baixas, Capão do Leão/RS; b) 100 pontos amostrados em malha de 10 x 10 m.

O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico nas partes relativamente mais altas e como Gleissolo Háplico Eutrófico solódico nas partes relativamente mais baixas (EMBRAPA,

2006). O clima da região conforme classificação de Köppen é o Cfa, sendo o local representativo de ambiente subtropical, marítimo, de verão subúmido e o resto do ano úmido ou superúmido.

Na Figura 1a é apresentada a linha do tempo dos trabalhos realizados nesta área experimental ao longo do tempo bem como as atividades desenvolvidas desde Parfitt, 2009.

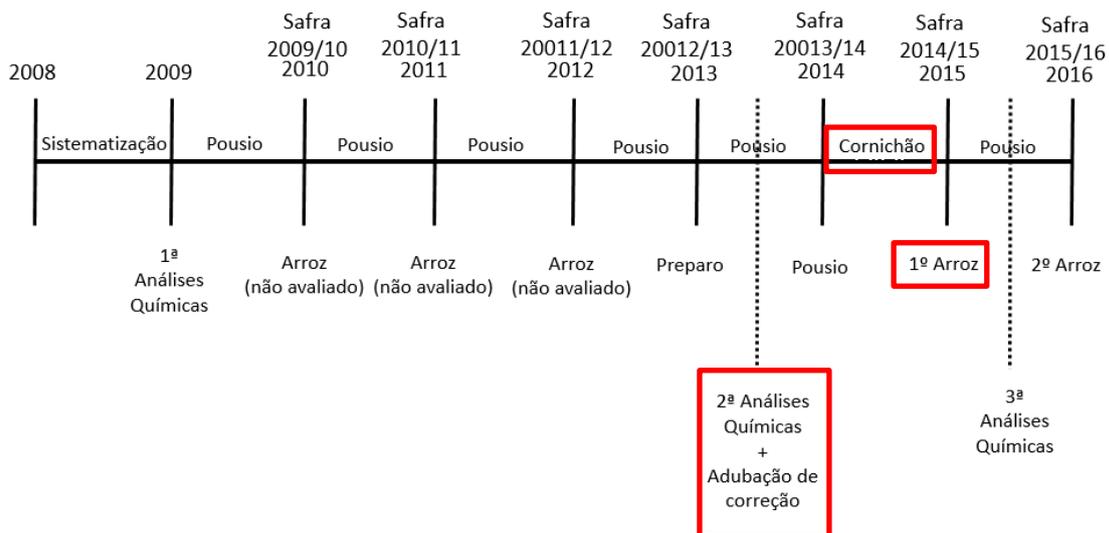


Figura 1 A – Linha do tempo das atividades realizadas na área experimental, e as variáveis utilizadas no capítulo 1.

A área de 1 ha (Figura 2a) foi sistematizada no ano de 2008 sob um plano com declividade (Figura 2b). O mapa de cortes e aterros é mostrado na Figura 3.

A área experimental foi sistematizada com Scraper equipado com controle por raios laser, segundo um plano com declividade de 0,15%. Durante a sistematização movimentou-se um volume de terra equivalente a $519 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. A profundidade máxima de corte foi de 0,208 m e a profundidade máxima de aterro de 0,172 m.

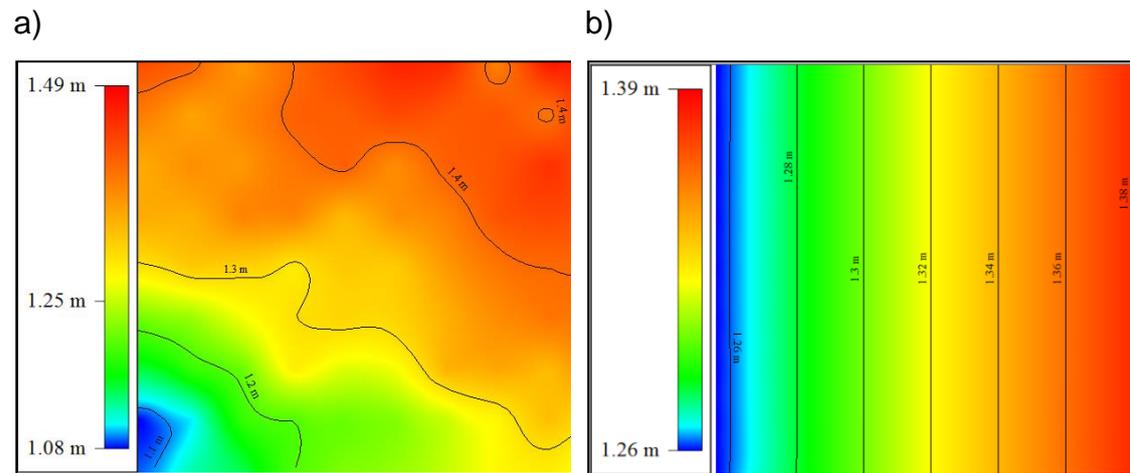


Figura 2 - Modelo digital de elevação da área experimental antes (a) e depois (b) da sistematização.

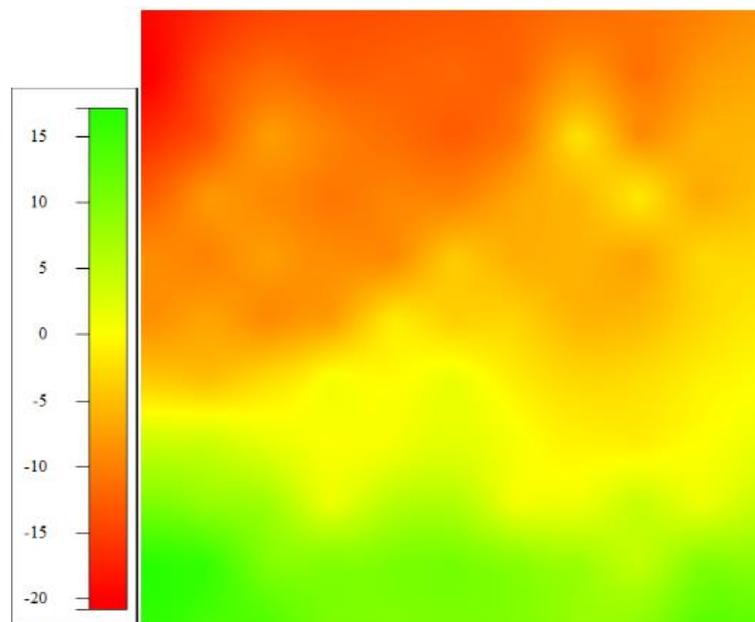


Figura 3 - Modelo digital de elevação dos cortes e aterros (cm) provocados pela sistematização.

Foram coletadas amostras de solo deformadas na camada de 0 – 0,20 m de profundidade em cada um dos 100 pontos demarcados, aproximadamente 8 meses antes da sistematização (período este sem cultura implantada na área experimental) e logo após a sistematização da área, no ano de 2008, no qual foram determinados os seguintes atributos químicos: pH (H₂O), índice SMP, teores disponíveis de fósforo (P), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), acidez potencial e alumínio (Al), seguindo metodologias descritas em Tedesco et al.

(1995). O teor de matéria orgânica (M.O.) em cada amostra foi determinado conforme Embrapa (1997).

A área foi cultivada com arroz irrigado nas safras 2009/10, 2010/11, 2011/12 realizando-se adubação de manutenção em taxa fixa de 300 kg ha⁻¹, permanecendo em pousio na safra 2012/13.

5.2.2 Avaliação dos atributos químicos do solo

Nos mesmos 100 pontos demarcados em 2008 foram coletadas amostras deformadas de solo na camada de 0 – 0,20 m de profundidade em agosto de 2013, ou seja, cinco anos após a sistematização da área. Ao redor de cada ponto amostral (considerado como sendo uma unidade experimental de 10 m de largura por 10 m de comprimento) foram coletadas 4 sub-amostras simples no intuito de formar uma amostra composta por ponto. As amostras foram secas ao ar e passadas na peneira de 2 mm e analisadas quimicamente no Laboratório de Fertilidade do Solo da Embrapa Clima Temperado.

Foram determinados os seguintes atributos químicos em cada ponto: pH em água, índice SMP, teores disponíveis de fósforo (P), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), soma de H+Al e alumínio (Al), e matéria orgânica (MO) seguindo metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). A partir dos dados obtidos, também foi calculada a capacidade de troca de cátions (CTC), a CTC efetiva e CTC pH 7,0, saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m).

5.2.3 Cultivo do cornichão e do arroz irrigado

Visando o cultivo da área com *Lotus subbiflorus*, foi realizada a adubação de correção do solo com base nas recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004). Como a recomendação para P₂O₅ e K₂O é baseada na interpretação, a qual é de forma discreta e a intenção era colocar o fertilizante a taxa variada de forma contínua, as quantidades desses nutrientes foi calculada a partir das regressões apresentadas na Figura 4.

A aplicação foi realizada de forma manual em cada uma das 100 unidades experimentais. O objetivo da adubação em taxa variada em cada unidade experimental, além de atender às necessidades dos cultivos e repor as perdas do sistema de produção, para se elevar o nível dos elementos P e K, conforme

teor de argila e CTCpH7 respectivamente, afim de expressar o máximo potencial de rendimento das culturas implantadas. Desta forma, as zonas de manejo deveriam elevar os níveis de fertilidade das parcelas de menor fertilidade, tornando a lavoura mais homogênea e com produções mais uniformes.

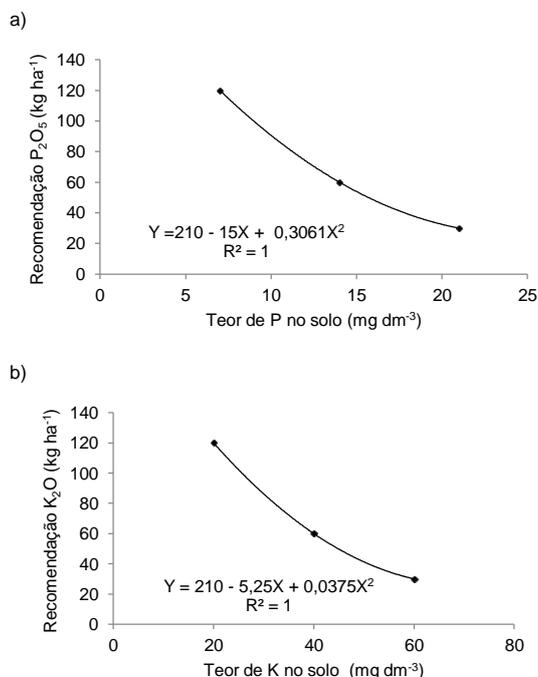


Figura 4 - Regressão linear das doses recomendadas de fósforo (a) e potássio (b) em função do teor do nutriente no solo.

Após a adubação de correção da fertilidade do solo em taxa variada de P e K a área foi calcareada com $1,5\ t\ ha^{-1}$ em taxa fixa. Assim, foi cultivada com cornichão, variedade El Rincon (*Lotus subbiflorus*), semeada a lanço em 23/04/2014, com densidade de sementes de $8\ kg\ ha^{-1}$ em sistema convencional de preparo de solo. Na oportunidade da semeadura foi realizada a adubação de reposição de $300\ kg\ ha^{-1}$ da fórmula NPK 00-20-20 segundo recomendação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004).

Em 15/08/2014 foi realizada uma amostragem de planta em uma área de $1\ m^2$ no centro de cada unidade experimental para a determinação da quantidade de matéria seca ($t\ ha^{-1}$), totalizando desta forma 100 valores de massa seca de cornichão. Após a coleta, as amostras de plantas foram levadas ao Laboratório de Nutrição Vegetal da Embrapa Clima Temperado onde foram secas em estufa na temperatura de $65^\circ C$ até que a massa se tornasse constante.

Após a coleta das amostras para a determinação da matéria seca do cornichão, a área foi dessecada com glifosato na dose de $2,5 \text{ L ha}^{-1}$ ($360 \text{ g i.a. L}^{-1}$).

No dia 15/10/2014 foi realizada a semeadura do arroz, cultivar BRS Pampa, em sistema de plantio direto, espaçamento entre linhas de $0,175 \text{ m}$ e densidade de semeadura de 110 kg ha^{-1} . A adubação de base foi realizada em cobertura de 200 kg ha^{-1} da fórmula NPK 00-20-30. A emergência das plantas ocorreu no dia 27/10/2014.

O controle de plantas daninhas foi realizado através da aplicação do herbicida a base de clomazone em pré-emergência, na dose de 2 L ha^{-1} ($360 \text{ g i.a. L}^{-1}$), logo após a semeadura. No dia 12/11/2014 as plantas de arroz apresentavam os estádios V3 e V4, sendo aplicado 60 kg ha^{-1} de N em solo seco e em seguida iniciada a irrigação por inundação. A segunda dose de 60 kg ha^{-1} de nitrogênio foi aplicada no estágio que antecede o R1, o que ocorreu no dia 05/01/2015. As demais práticas de manejo utilizadas foram as recomendadas pela SOSBAI (2012).

A produtividade da cultura do arroz foi determinada através da colheita em março de 2015, sendo colhida 6 linhas ($6 \times 0,175 \text{ m} = 1,05 \text{ m}$) no centro de cada unidade experimental por 5 m de comprimento, totalizando uma área de $5,25 \text{ m}^2$. A colheita foi realizada com colheitadeira de parcelas experimentais WINTERSTEIGER, modelo Classic, que realiza automaticamente a trilha para a retirada das impurezas e a determinação da umidade da amostra colhida.

A estatura da planta foi medida da superfície do solo até o comprimento final da panícula com o auxílio de uma régua graduada. Em cada unidade experimental mediram-se 20 plantas aleatoriamente.

Dentro de cada unidade experimental foi feita a contagem de panículas em 1 m^2 . Para a obtenção das variáveis número de grãos cheios e vazios e esterilidade de espiguetas foram retiradas de cada unidade experimental uma amostra de 25 panículas colhidas aleatoriamente.

5.2.4 Análises estatísticas

Os conjuntos de dados (corte e aterro, atributos químicos do solo, produtividade do arroz irrigado e matéria seca do cornichão) foram inicialmente analisados por meio da estatística descritiva, calculando-se a média, mediana, valor máximo, mínimo e coeficiente de variação. Os dados também foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de significância para verificar a tendência de normalidade da distribuição de cada conjunto (COSTA NETO, 2002), utilizando o “software R” (R CORE TEAM, 2016).

As variáveis referentes aos atributos químicos do solo, de corte e aterro, produtividade do arroz irrigado e matéria seca do cornichão foram avaliadas pela estatística multivariada através da Análise de Componentes Principais (ACP). Esta análise tem o objetivo de identificar as variáveis que têm maior contribuição com a variância dos dados, com base na matriz de correlação existente entre as componentes e as variáveis.

Para a análise da variabilidade espacial foi realizada pela determinação e interpretação dos estimadores de semivariância para cada variável analisada, através do teste de aderência, para dados normais representados pelo estimador clássico (MATHERON, 1963), caso contrário, foi usado o estimador robusto (CRESSIE; HAWKINS (1980), cada conjunto de dados foi calculado os semivariogramas experimentais para cada variável, teóricos e os respectivos parâmetros de ajustes, elaboração dos mapas de distribuição espacial, realizada por meio dos softwares R.

O grau de dependência espacial (GDE em % - Equação 1) foi calculado e classificado de acordo com Cambardella et al. (1994), como: forte – $GDE \leq 25\%$; moderado – $25\% < GDE \leq 75\%$; e fraco – $GDE > 75\%$.

$$GDE = \left(\frac{c_0}{c_0 + C} \right) \times 100 \quad (1)$$

em que:

c_0 : efeito pepita;

C: contribuição (variância estrutural);

$c_0 + C$: patamar.

A partir do resultado da ACP foram gerados mapas de distribuição espacial das variáveis, no intuito de ilustrar a relação entre as áreas de corte e aterro e os atributos do solo sobre o comportamento agrônômico da cultura do cornichão e do arroz.

A partir disto, foram elaborados os mapas dos atributos por meio da krigagem, quando o atributo apresentou uma estrutura de variabilidade adequadamente identificada, porém atributo que não apresentou estrutura de variabilidade especial, utilizou-se o interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IDW). Os ajustes dos modelos teóricos foram avaliados por meio do coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) e do Grau de Dependência Espacial (GDE) (CAMBARDELLA et al., 1994). Os mapas foram construídos no programa R, que apresentaram estrutura de variabilidade, porém variável que não apresentou foi elaborado no software GS+ (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2006).

Para a avaliação dos atributos químicos e produtividade das culturas em função da magnitude de cortes e aterros e profundidade do horizonte B após a sistematização foram utilizados análise de regressão simples e avaliada a sua significância através do teste f.

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Análises descritivas e teste de normalidade

5.3.1.1 Atributos químicos do solo

Os resultados da análise estatística descritiva e do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov aplicados aos atributos químicos do solo em 2013 são apresentados na Tabela 1, de acordo com os limites estabelecidos pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (CQFS-RS/SC, 2004).

Os valores dos atributos químicos do solo são classificados como: pH em água variou entre baixo e médio; o índice SMP variou entre os valores 6,1 e 6,7 indicando uma necessidade de 3,2 a 0,5 t de calcário (PRNT de 100%), respectivamente, para atingir pH = 6,0; os teores de Ca variaram entre valores baixos e médios; os teores de Mg apresentaram-se entre médio e alto; os teores de K foram todos interpretados como baixo; os níveis de P variaram entre muito baixo e muito alto. Já os micronutrientes B, Cu, Mn e Zn foram interpretados como alto. Os teores de Fe não indicam níveis de toxidez. A saturação de bases foi interpretada entre os níveis baixo e médio. A saturação por alumínio variou entre os níveis muito baixo e alto.

Da tabela 1 observa que o coeficiente de variação (CV) variou entre 2,1% (índice SMP) a 52,3% (P). De acordo com a classificação proposta por Wilding; Drees (1983), os valores de CV dos dados de pH em água, índice SMP, Ca, Mg, B, Cu, CTC efetiva, CTC pH7 e V apresentaram baixa variabilidade em torno dos seus valores médios ($CV \leq 15\%$). Os dados de K, M.O., Na, Mn, Zn, Fe e H + Al apresentaram moderada variabilidade já que os seus valores de CV se encontram entre 15 % e 35%. As variáveis P (CV = 52,3%), SAT Al (CV = 39,6%) e Al (CV = 38,6%) mostraram uma alta variabilidade ($CV > 35\%$).

Tabela 1 - Resultados da análise estatística descritiva e do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov aplicados aos atributos químicos do solo da área experimental cinco anos após a sistematização.

Variáveis Químicas										
	Média	Med	Máx	Mín	C.V (%)	As	C	K-S	P-valor	
pH água	5.349	5.3	5.6	5.2	2.199	0.442	-0.666	0.21	0.0003	NN
Índice SMP	6.384	6.4	6.7	6.1	2.12	0.147	-0.528	0.16	0.001	NN
Al (cmol/dm ³)	0.376	0.38	0.7	0.0	38.62	-0.251	-0.242	0.06	0.90	N
Ca (cmol/dm ³)	2.092	2.1	2.8	1.40	14.865	0.212	-0.092	0.10	0.31	N
Mg (cmol/dm ³)	1.058	1.1	1.4	0.8	13.243	0.383	-0.267	0.15	0.02	NN
K (mg/dm ³)	45.57	45	71	24	17.409	0.518	1.202	0.16	0.01	NN
M.O (%)	1.387	1.4	2.2	0.6	22.975	0.339	-0.199	0.10	0.26	N
P-Mehlich (cmol/dm ³)	11.098	10.6	26	2.7	52.300	0.565	-0.307	0.07	0.64	N
Na (cmol/dm ³)	23.73	23	35	17	17.389	0.7097	-0.132	0.13	0.06	N
B (cmol/dm ³)	0.301	0.3	0.4	0.2	12.034	0.132	4.99	0.44	2.2 x10 ⁻¹⁶	NN
Cu (cmol/dm ³)	0.863	0.9	1.2	0.5	11.951	-0.216	1.65	0.22	0.0001	NN
Mn (cmol/dm ³)	14.286	14.25	22.8	6.9	26.175	0.142	-0.694	0.05	0.93	N
Zn (cmol/dm ³)	0.991	0.9	2.0	0.5	31.295	1.164	1.17	0.19	0.0	NN
Fe (cmol/dm ³)	1.647	1.6	3.2	0.7	26.786	0.647	0.563	0.12	0.101	N
CTC efetiva (cmol/dm ³)	3.745	3.71	4.73	2.82	10.344	0.213	0.101	0.06	0.922	N
CTC pH7 (cmol/dm ³)	6.213	6.2	7.7	5.3	10.127	0.392	-0.242	0.08	0.5	N
H + Al (cmol/dm ³)	2.853	2.8	4.4	1.6	17.645	0.308	0.456	0.09	0.367	N
m (%)	10.053	10.00	19.2	0.0	10.284	0.259	0.08	0.05	0.972	N
V (%)	10.170	10.265	18.3	0.0	39.61	-0.199	-0.28	0.06	0.904	N

Alumínio= Al (cmol/dm³); Cálcio= Ca (cmol/dm³); Magnésio= Mg (cmol/dm³); Potássio= K (mg/dm³); Materia Orgânica= M.O (%); Fósforo= P-Mehlich (cmol/dm³); Sódio= Na (cmol/dm³); Boro= B (cmol/dm³); Cobre= Cu (cmol/dm³); Manganês= Mn (cmol/dm³); Zinco= Zn (cmol/dm³); Ferro= Fe (cmol/dm³); m: Saturação por alumínio; V: Saturação por bases; CV: coeficiente de variação; N: distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (p<0,05); NN: distribuição não normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (p<0,05).

Observa-se que os valores da média e mediana da maioria dos atributos químicos estudados são próximos. Conforme Little; Hills (1978), quando os valores da média e da mediana são próximos, os dados tendem a apresentar distribuição normal.

Segundo Cambardella et al. (1994) isso pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição. No entanto, verificou-se que somente as variáveis Al, P, Mn, CTC efetiva, CTC pH7, V e m apresentaram distribuição normal ao nível de significância de 5% pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Segundo Faraco et al. (2008), a não normalidade da distribuição dos dados é indicativo da ocorrência de alguns eventos atípicos no conjunto de dados.

5.3.1.2 Desempenho agrônômico e produtividade da cultura do arroz irrigado e produção de matéria seca do cornichão

Os resultados da análise descritiva nos dados de produtividade e componentes do rendimento do arroz irrigado e da matéria seca do cornichão são apresentados na Tabela 2. A produtividade de matéria seca do cornichão variou de 2,0 t ha⁻¹ a 4,8 t ha⁻¹, sendo a média 3,0 t ha⁻¹. Estes resultados estão de acordo com os verificados por Gomes;Reis (1999) em estudo objetivando avaliar a produtividade de matéria seca de algumas forrageiras de clima temperado no mesmo tipo de solo onde obtiveram produtividades médias entre de 1,4 e 6,3 t em três anos de avaliações.

O arroz irrigado apresentou valores de produtividades que variaram de 6,02 t ha⁻¹ e 12,84 t ha⁻¹ sendo a média experimental 9,76 t ha⁻¹ (Tabela 2). Estes resultados estão de acordo com os verificados por Magalhães Júnior et al. (2012) para a mesma cultivar e mesmo tipo de solo e são superiores à média de produtividade para o estado do RS que foi de 7,7 t ha⁻¹ (CONAB, 2015).

O coeficiente de variação da matéria seca do cornichão foi de 22,51% e do arroz irrigado 10,26 % o que caracteriza uma série de dados com moderada e baixa variabilidade segundo a classificação proposta por Wilding;Drees (1983).

Tabela 2 - Resultados da análise estatística descritiva e do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov aplicados aos dados de matéria seca do cornichão e da produtividade e do desempenho agrônomo do arroz irrigado.

	Média	Máx	Mín	C.V (%)	AS	C	K-S	P-valor	
Cornichão									
Mat. Seca Corn. (t ha ⁻¹)	3,0	1,3	4,8	22,5	0,15	-0,18	0,06	0,80	N
Arroz Irrigado									
Produtividade (t ha ⁻¹)	9,7	12,8	6,6	11,0	-0,01	0,52	0,07	0,74	N
Panícula (m ²)	356	577	220	22,3	0,17	-0,70	0,08	0,51	N
Grãos p/panícula	180	246	114	14,2	0,009	-0,22	0,06	0,92	N
Grãos cheios	158	228	105	14,8	0,25	0,09	0,05	0,98	N
Grãos vazios	21	51	7,0	44,4	1,11	1,00	0,14	0,04	N
Esterilidade (%)	12,4	28,0	4,5	37,5	0,86	0,82	0,12	0,15	N
Altura (m)	1,0	1,1	0,9	4,0	-0,07	0,11	0,07	0,80	N

Máx=máximo; Min=mínimo; C.V (%) = Coeficiente de Variação; AS= Assimetria; C= Curtose; K-S= Kolmogorov-Smirnov (p<0,05).

Conforme a classificação proposta por Wilding; Drees (1983), quanto as variáveis relacionadas ao desempenho agrônomo da cultura do arroz observaram-se altos valores de CV (>35%) para o número de espiguetas estéreis por panícula e para esterilidade, o CV do número de panículas por m² foi médio (15 - 35%) e as demais variáveis apresentaram CV baixo (< 15%).

5.3.2 Análise dos componentes principais

5.3.2.1 Efeito da sistematização e dos atributos químicos do solo sobre a produtividade do cornichão e do arroz irrigado

No estudo da covariância entre os atributos químicos do solo, as áreas de corte e aterro ocorridas durante a sistematização e a produtividade do arroz, pela análise de componentes principais considerou que os dois primeiros fatores, resultantes da combinação linear de 15 variáveis, que tiveram autovalor acumulado de 50,96 %. No primeiro componente apresentou 27,88% da variância total, ao passo que o segundo componente mostrou 23,08%.

O primeiro componente correlacionou positivamente as variáveis corte/aterro, produtividade, matéria orgânica (MO), K, P, Mn, Zn e saturação por alumínio (m), e negativamente as variáveis Ca, Mg, V, pH e Esterilidade de grãos (Figura 5).

O segundo componente pode ser interpretado como o efeito da calagem sobre a neutralização do alumínio no solo, já que as variáveis Ca e Mg apresentaram as maiores correlações positivas e a variável saturação por alumínio a maior correlação negativa, assim, com o aumento dos teores de Ca e Mg, ocorre a diminuição de m% (Figura 5).

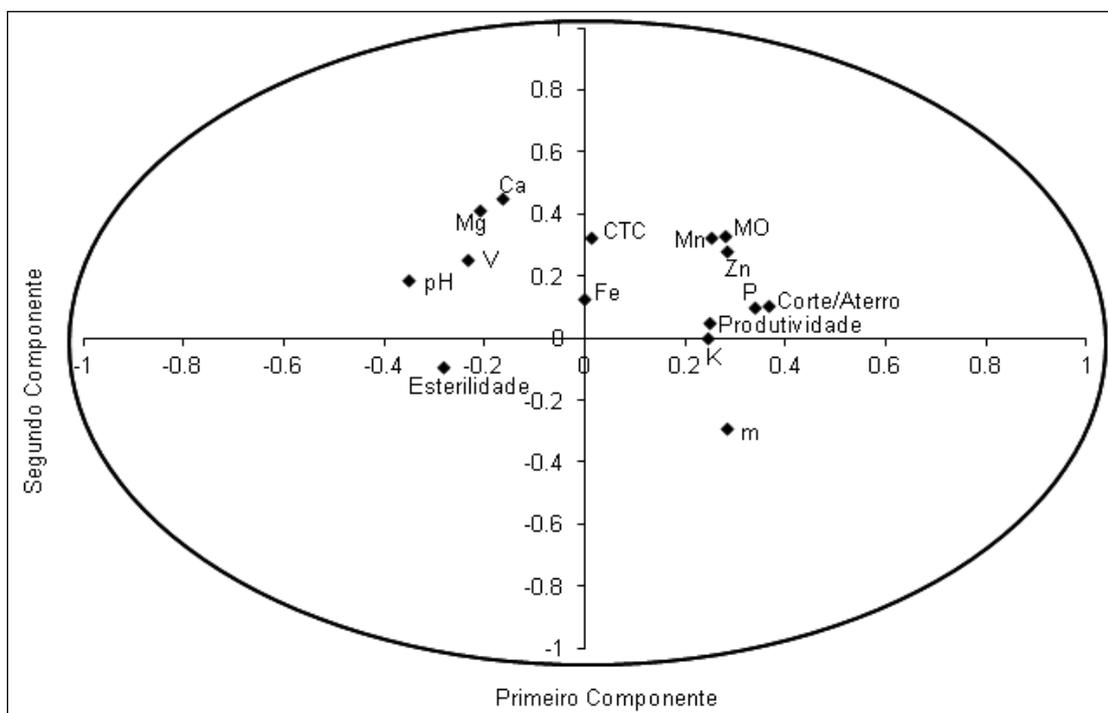


Figura 5 - Autovetores das variáveis químicas do solo, da produtividade e esterilidade de grãos da cultura do arroz e das magnitudes de corte e aterro.

A distribuição espacial das variáveis foi realizada através da correlação ocorrido no primeiro componente (Figura 6A, 6B e 6C), observa-se que aquelas correlacionadas positivamente apresentaram os maiores valores nas áreas de aterro.

Os valores foram baseados nos parâmetros ajustados nos modelos teóricos de semivariogramas ($C+c_0$, c_0 e alcance) (Anexo 2), no qual adquiriu o efeito da krigagem ordinária.

A prática da sistematização apresentou um grau de dependência espacial forte e moderado entre os atributos químico do solo, sendo para pH em água, Al, P-Mehlich, Na, Cu, Mn, Zn, Fe, CTC efetiva e saturação de base apresentaram um grau de dependência moderada ($25\% < GDE \leq 75\%$), enquanto que para os outros atributos químicos do solo apresentaram grau de dependência forte ($>25\%$), contudo Índice SMP e $H + Al$ não apresentou dependência espacial, tendo um efeito pepita puro.

As maiores produtividades do arroz irrigado ocorreram nas áreas de aterro que por sua vez eram as áreas com maiores teores de P, K, MO, Mn, Zn e de m. Os maiores teores de P, K, MO e saturação por alumínio nas zonas de aterro devem-se a mobilização da camada superficial do solo com maior fertilidade da área de corte, alocado na área de aterro.

Os maiores teores de Mn e Zn nas áreas de aterro podem ser explicados pelos maiores valores de MO nestas áreas, uma vez que uma das principais fontes desses micronutrientes é a matéria orgânica (GODOY et al., 2015).

Liu et al. (2014) avaliaram 560 lavouras de arroz no sul da China e determinaram a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da produtividade do arroz, e também observaram as maiores produtividades da cultura nas áreas com maiores teores de P e K. Segundo Yoshida (1981) o fósforo é necessário para perfilhamento, portanto a eficiência produtiva parcial de fósforo em grãos é maior nas fases de crescimento inicial. Quanto ao potássio o arroz requer grandes quantidades até que a fase reprodutiva esteja completa.

O fato de as áreas de aterro apresentarem os menores valores de pH e de saturação por bases pode ser explicado porque essas áreas apresentam os maiores teores de matéria orgânica.

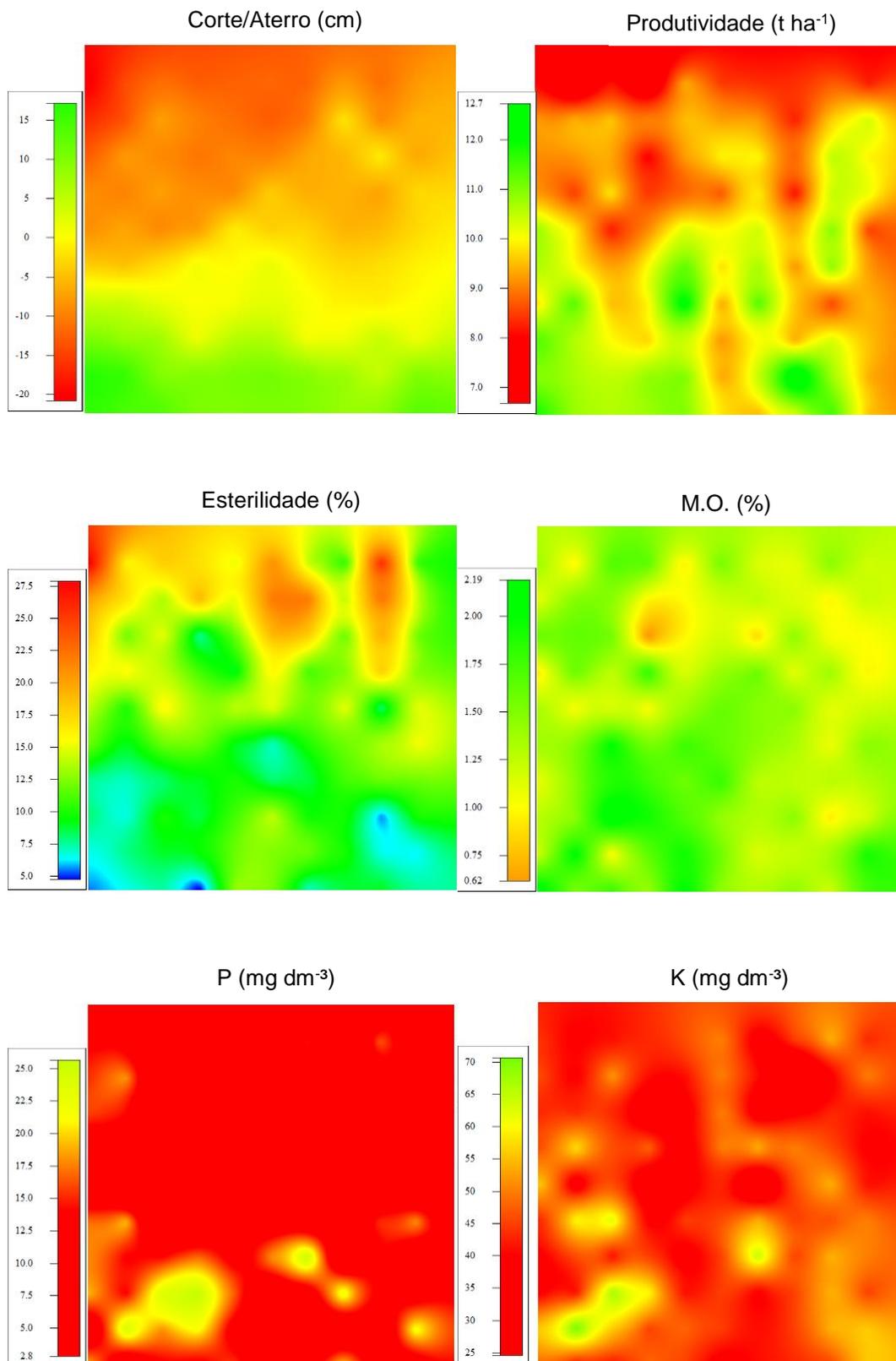


Figura 6A - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro, da produtividade do arroz irrigado e dos atributos químicos do solo.

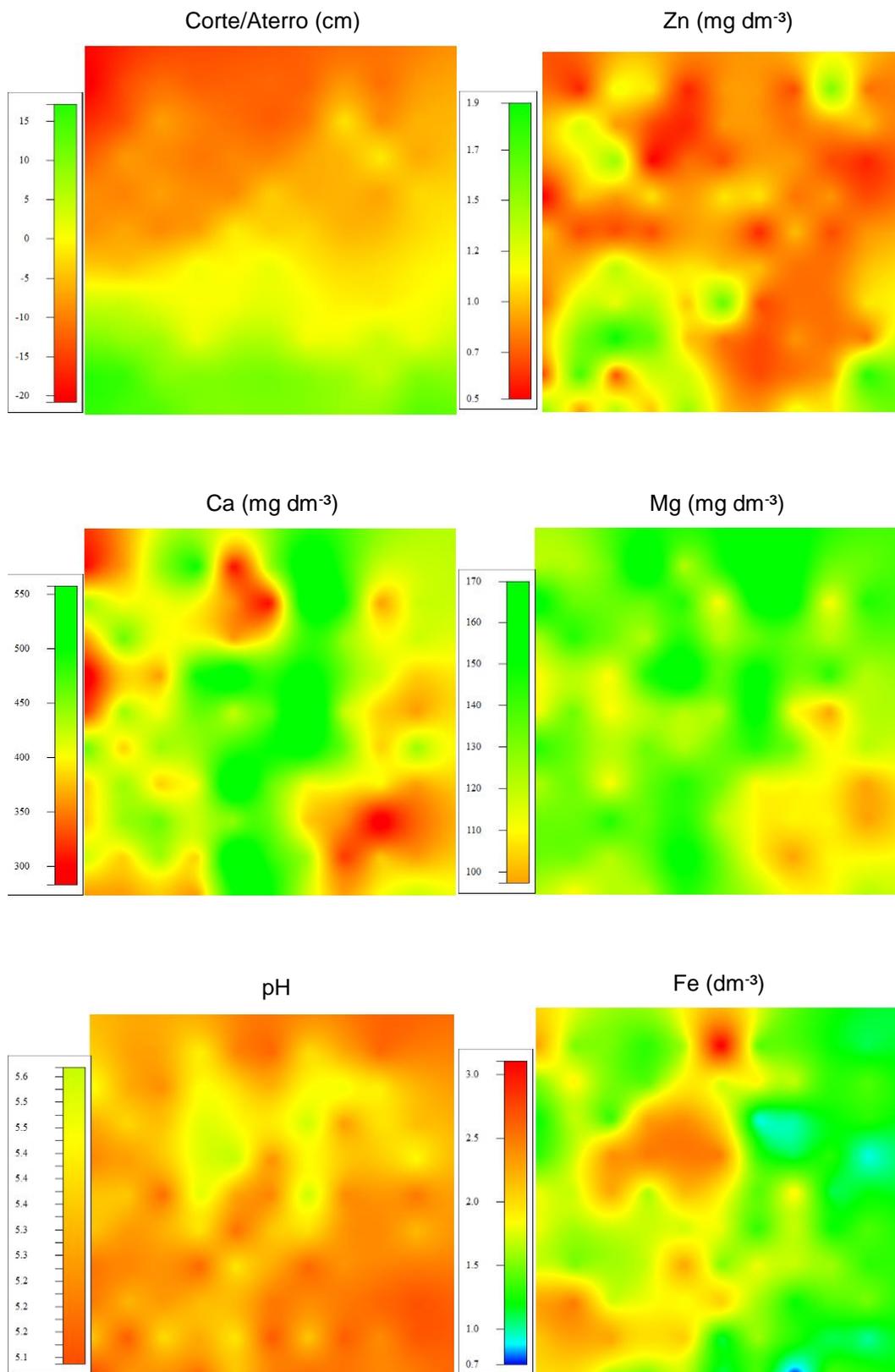


Figura 7B - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro, dos atributos químicos do solo.

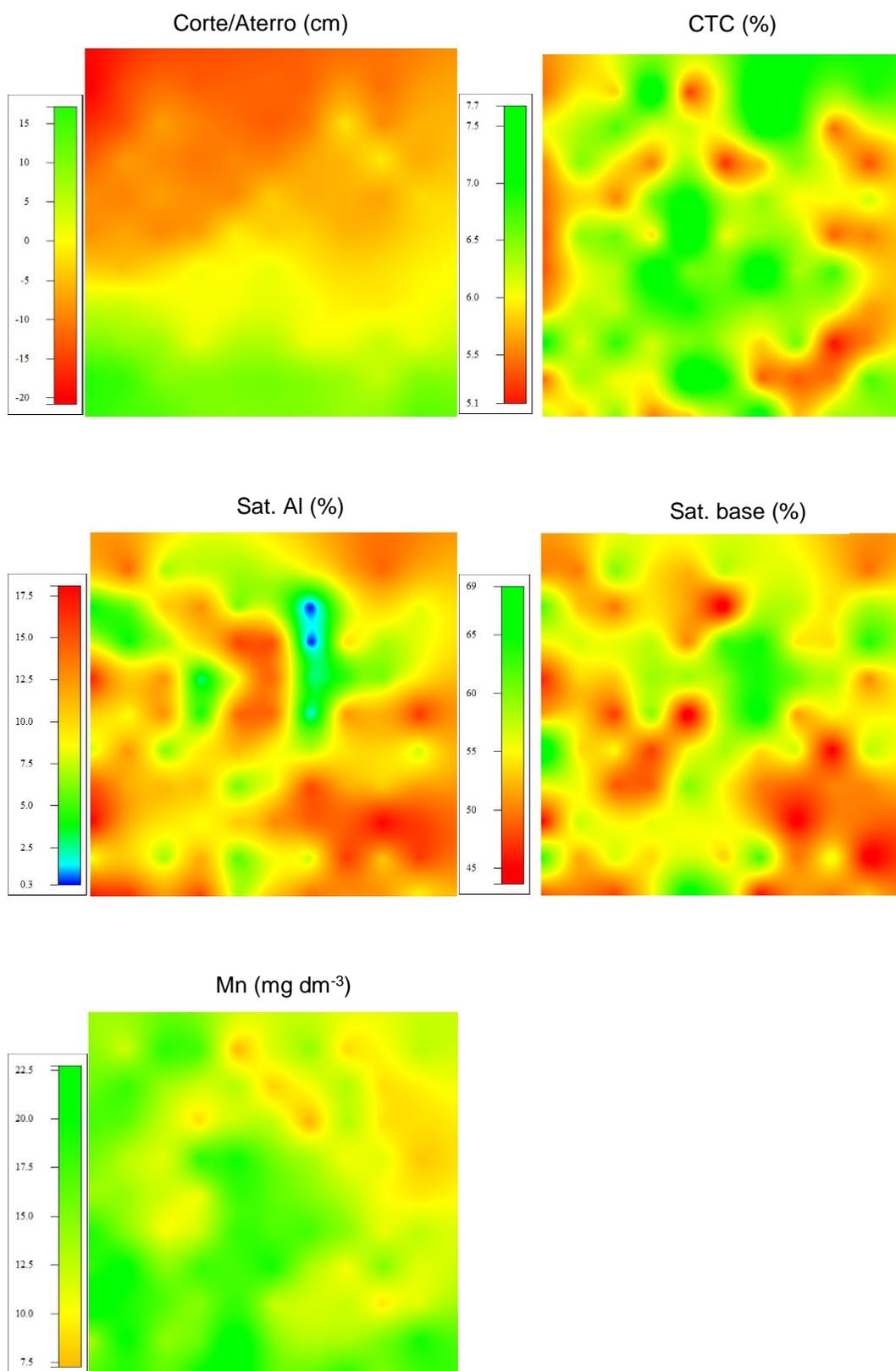


Figura 8C - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro, dos atributos químicos do solo.

Meurer (2006) cita que no processo de mineralização da matéria orgânica e formação de substâncias húmicas, ocorre a liberação de íons NO_3^- e H^+ ; os ânions NO_3^- são neutralizados pelos cátions da solução como Ca e Mg, diminuindo o V%, e os H^+ permanecem na solução diminuindo o pH.

As maiores produtividades do arroz ocorreram em áreas com maior saturação por alumínio, o que não é esperado, segundo Fageria; Zimmermann (1979) o excesso de alumínio inibe a formação normal da raiz restringindo a absorção de nutrientes e água, o que pode afetar o rendimento. No entanto, nas áreas de aterro onde foram maiores as produtividades, a saturação por alumínio variou entre 7 e 14%, ou seja, entre baixo e médio conforme a classificação proposta pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (CQFS-RS/SC, 2004), por isso e pelo fato dessas áreas serem mais férteis é que possivelmente a maior presença de alumínio no solo não afetou a produtividade do arroz irrigado por inundação.

Das variáveis correlacionadas negativamente ao primeiro componente (Figura 5) observa-se quanto a sua distribuição espacial que as maiores porcentagens de esterilidade de grãos ocorreram nas áreas de corte (Figura 6), que são as áreas de menor fertilidade, sobretudo com menores teores de P e K. Barberena et al. (2011) avaliaram o desenvolvimento e produtividade de arroz irrigado em resposta a diferentes doses de fósforo e potássio e observaram o menor número de grãos estéreis nas doses de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 e K_2O quando comparadas as doses de 50 e 0 kg ha^{-1} .

No estudo da correlação entre os atributos químicos do solo, as áreas de corte e aterro e a produtividade do cornichão a análise de componentes principais considerou os dois primeiros fatores, resultantes da combinação linear de 15 variáveis, que tiveram autovalor acumulado de 53,87%. O primeiro componente explicou 27,33% da variância total, ao passo que o segundo componente 26,54%.

O primeiro componente correlacionou positivamente as variáveis corte/aterro, matéria orgânica (MO), K, P, Mn, Zn, Cu, CTC e saturação por alumínio (m), e negativamente as variáveis Ca, Mg, V, pH (Figura 7). Este componente pode ser interpretado como o resultado da sistematização sobre os atributos químicos do solo.

Observa-se que aquelas correlacionadas positivamente apresentaram os maiores valores nas áreas de aterro, no entanto a produtividade do cornichão não se distribuiu espacialmente conforme as áreas de corte/aterro. Um dos fatores, provavelmente, deve-se à complexidade do solo sistematizado, que é um sistema dinâmico onde a sua funcionalidade é composta por interações entre componentes físicos, químicos e biológicos (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Entretanto estas interações edafoclimáticas durante o ciclo da cultura aumenta a complexidade do entendimento dos fatores que governam o desempenho das culturas.

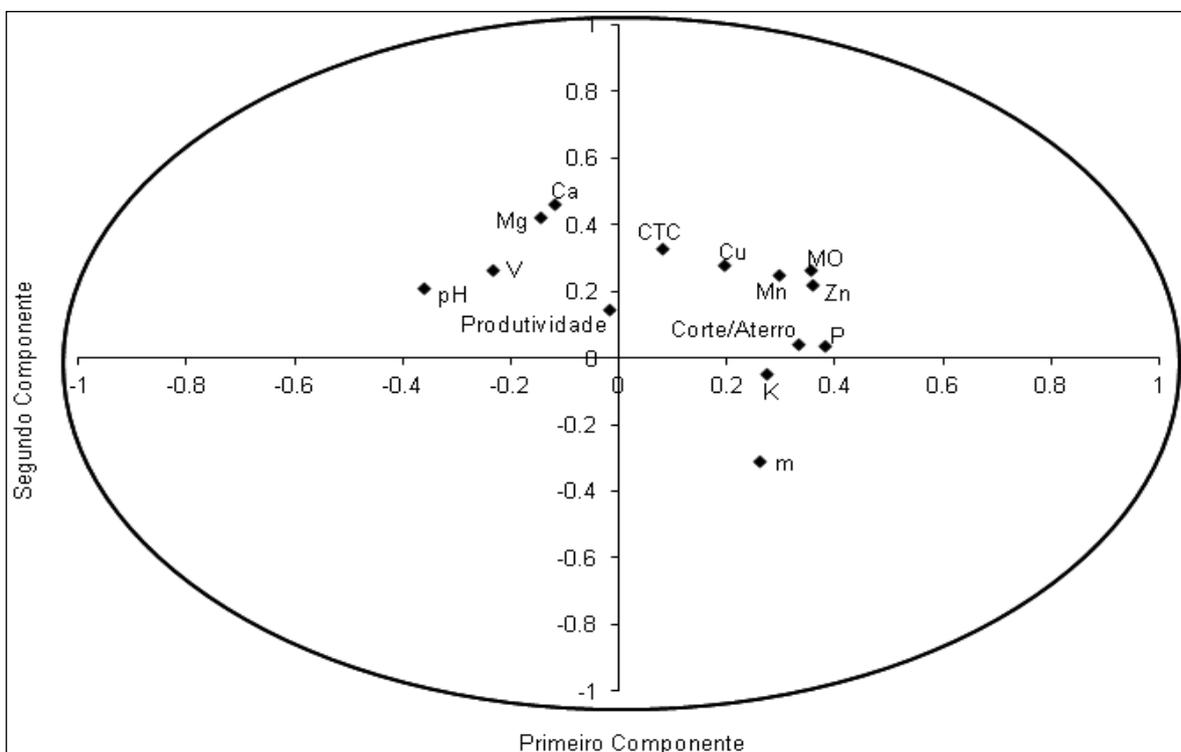


Figura 9 - Autovetores das variáveis químicas do solo, da produtividade de matéria seca do cornichão e das magnitudes de corte e aterro.

Não se observou uma relação da produtividade do cornichão com os atributos químicos do solo e com as áreas de corte e aterro. Já no segundo componente, assim como na análise feita para cultura do arroz, as variáveis Ca e Mg apresentaram as maiores correlações positivas e a variável saturação por Al a maior correlação negativa (Figura 7 e Figura 8).

Os mapas de distribuição espacial das variáveis, os valores são obtidos pelos parâmetros ajustados nos modelos teóricos de semivariogramas ($C+c_0$, c_0 e alcance), Anexo 2, correlacionadas no primeiro componente para a cultura do cornichão estão apresentados na Figura 8.

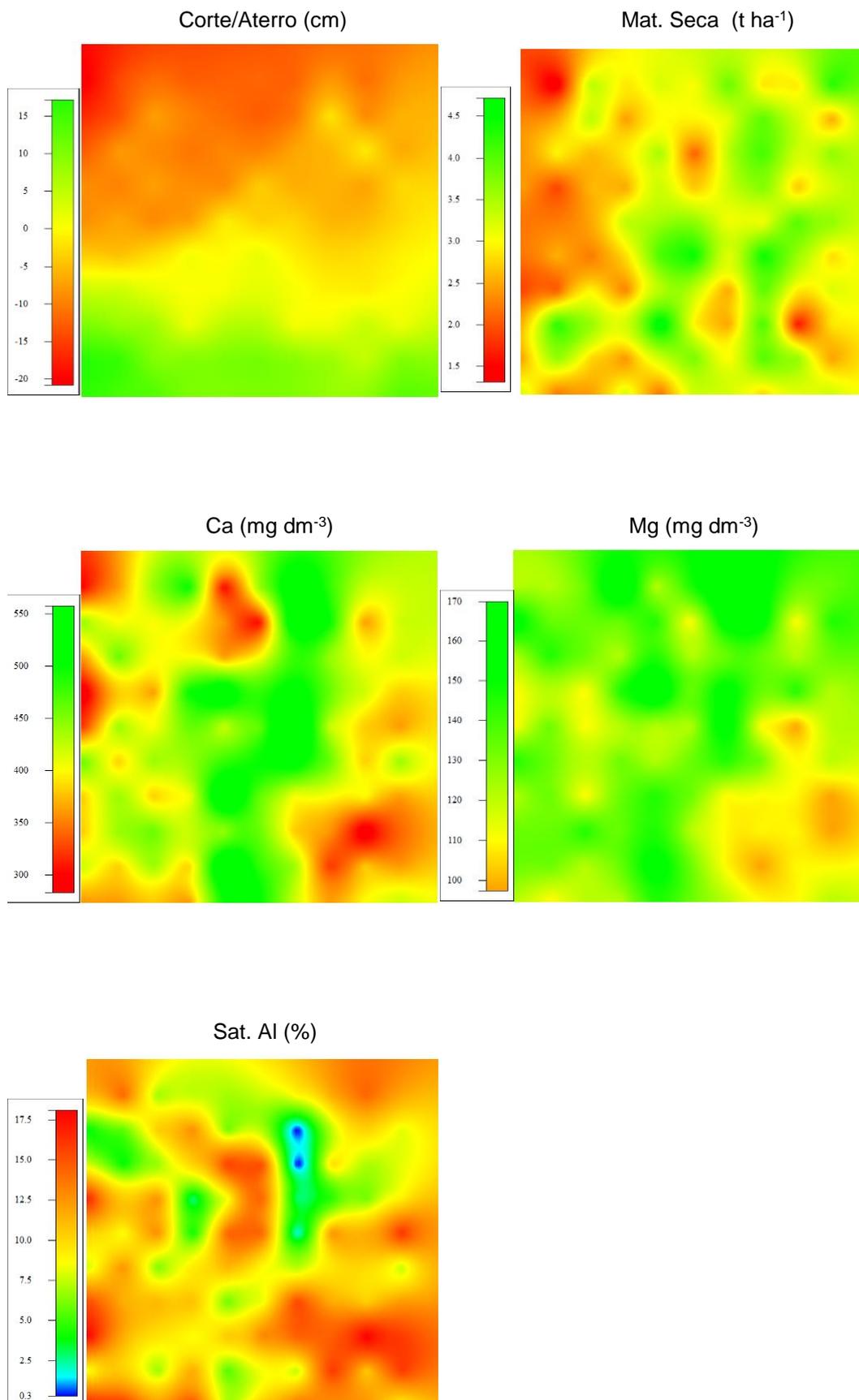


Figura 10 - Mapas de distribuição espacial das áreas de corte/aterro, da produtividade do cornichão e dos atributos químicos do solo.

5.3.2.2 Magnitude de cortes e aterros e desempenho agrônômico do cornichão e do arroz

Houve diferenças significativas entre a produtividade do arroz irrigado em relação às magnitudes de cortes e aterros. Na figura 9 são apresentados os resultados de produtividade do arroz irrigado em função da magnitude de cortes e aterros.

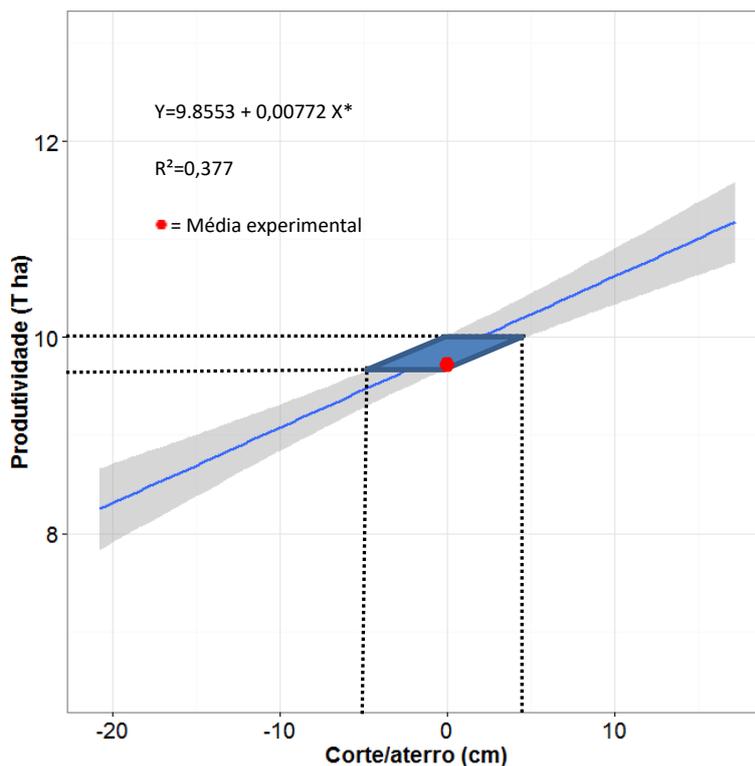


Figura 11 - Análise de regressão simples da produtividade do arroz irrigado na safra 2014/15 em função de cortes e aterros provocados pela sistematização em 2008. (*significativo ao nível de 5% pelo teste f).

Pode-se verificar que a produtividade do arroz irrigado foi afetada pela magnitude dos cortes e aterros provocados pela sistematização de forma significativa correlacionada com os cortes e aterros provocados pela sistematização, onde quanto maior o corte menor a produtividade e vice-versa. Entretanto, em uma avaliação geral de toda a área, não pode afirmar que este efeito é negativo já que houve uma compensação pelo aumento da produtividade nas áreas que foram aterradas.

Avaliando a produtividade no ponto “zero” ou seja, sem corte e sem aterros, observamos que a produtividade neste ponto, considerando o intervalo

de confiança da variável, a produtividade varia de $9,70 \text{ t ha}^{-1}$ até 10 t ha^{-1} , ficando a média, $9,73 \text{ t ha}^{-1}$ dentro do intervalo de confiança. Desta forma a sistematização, embora tenha causado prejuízos de produtividade nas áreas de corte, esta foi compensada pelo acréscimo de produtividade nas áreas de aterro.

Ainda sobre o arroz irrigado, a produtividade média da área de corte foi de $9,34 \text{ t ha}^{-1}$ e da área de aterro $10,39 \text{ t ha}^{-1}$. Este resultado está de acordo com os encontrados por Walker et al (2003) e Jat et al. (2009) que verificaram uma redução de 25% e 7,5% na produtividade do arroz irrigado nas áreas de corte respectivamente. Por outro lado, Quezada et al. (2013) não verificou diferenças significativas de produtividade de arroz irrigado em função dos cortes e aterros provocados pela sistematização.

Quanto a produtividade de matéria seca do cornichão, verificou-se que a mesma não apresentou diferenças estatísticas significativas em função das dos cortes e aterros (Figura 10).

Avaliando-se as produtividades médias das áreas de corte e aterro, a produtividade média de matéria seca do cornichão nas áreas de corte foi de $3,05 \text{ t ha}^{-1}$ e nas áreas de aterro $3,07 \text{ t ha}^{-1}$, demonstrando mais uma vez que a magnitude de corte e aterro não afetou a produtividade de matéria seca.

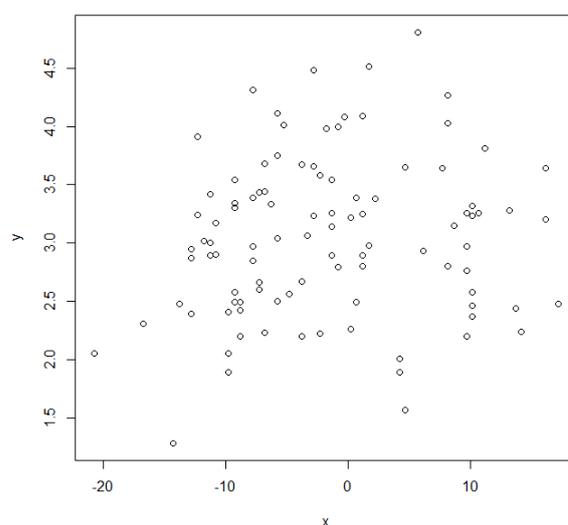


Figura 12 - Dispersão dos dados de produtividade de matéria seca do cornichão na safra 2014 em função dos cortes e aterros provocados pela sistematização em 2008.

5.4 Conclusão

1. As áreas de aterro apresentam maior fertilidade, sobretudo quanto aos teores de P e K o que reflete diretamente na produtividade do arroz irrigado.
2. A produtividade do arroz irrigado é menor nas áreas de corte do que nas áreas de aterro, entretanto a produtividade média não se altera por haver certa compensação pelo aumento de produtividade nas áreas de aterro.
3. A produtividade do cornichão não é afetado pelos cortes e aterros provocados pela sistematização.

6 Capítulo II – Distribuição espacial e estabilidade temporal dos teores do fósforo e potássio no solo e da produtividade do arroz em área sistematizada.

6.1 Introdução

A prática da agricultura é uma atividade econômica que precisa ser minimamente sustentável, as áreas utilizadas para cultivo não são obrigatoriamente uniformes, mesmo dentro de pequenas porções de uma gleba existirão diferenças no solo e no relevo que podem significar a demanda por tratamentos diferenciados (MOLIN et al., 2015).

Agricultores têm, por longo tempo, procurado maximizar a produção física e econômica das culturas, variando a aplicação de insumos de acordo com os tipos de solos e desempenho das culturas. Recentemente com o desenvolvimento do Sistema de Posicionamento Global – GPS, associado a equipamentos capazes de medir a variabilidade (monitores de colheita) e aplicação de insumos (fertilizantes, herbicidas, sementes, etc.) a taxas variáveis, é possível fazer o manejo das culturas de modo mais específico, caracterizando a agricultura de precisão (COELHO, 2005).

Deve-se ressaltar que a necessidade do uso da agricultura de precisão é ainda maior na atualidade, devido ao aumento do tamanho das propriedades cultivadas. Por exemplo, um agricultor que se utiliza de manejo convencional em uma propriedade com 1.000ha tem menor conhecimento da variabilidade espacial da fertilidade do solo do que 10 agricultores que anteriormente cultivavam essa mesma área em lotes de 100 ha, pois esses últimos tinham um conhecimento maior sobre cada faixa do terreno em relação a sua fertilidade (SOUSA et al., 2016).

Souza et al. (2008) comparam os teores de P e K no solo determinados pela média (método convencional de amostragem) e pela distribuição espacial, e observaram que maior parte da área (54,30%) apresentou teores de P menores que o indicado na amostragem convencional, e que para o K, 84,40% da área apresentaram teores menores que o teor médio obtido na forma convencional.

Quando se usa a média dos valores dos atributos como base para a tomada de decisão sobre a realização do manejo químico do solo, em alguns locais, a dose recomendada de fertilizantes ou corretivos estará

subdimensionada; em alguns, será adequada e, em outros, poderá haver aplicação excessiva de determinado fertilizante ou corretivo. Isto resulta em prejuízos econômicos, tanto pela aplicação desnecessária, quanto pelo desequilíbrio entre as quantidades de nutrientes que serão disponibilizados para as plantas, além do efeito deletério que essa prática pode ocasionar sobre o meio ambiente (CORÁ et al., 2004)

O uso de mapas de variabilidade permite localizar geograficamente áreas mais problemáticas, o que não ocorre nos procedimentos clássicos, quando se utiliza a média do conjunto de dados de cada variável para a análise (AZEVEDO, 2004).

Existe a variabilidade espacial natural dos atributos do solo e ainda o efeito do manejo do solo sobre a distribuição espacial destes atributos. Segundo Corá et al. (2004), áreas pedologicamente idênticas podem apresentar variabilidade distinta em atributos, quando submetidas às diferentes práticas de manejo. Da mesma forma, áreas pedologicamente diferentes, quando submetidas ao mesmo manejo, podem apresentar-se semelhantes em seus atributos.

Entre as técnicas de manejo do solo, sobretudo em solos de várzea, cita-se a sistematização. A sistematização consiste no processo de adequação da superfície natural do terreno de forma a transformá-lo num plano. Durante esse processo ocorrem movimentos de solo com cortes nas partes relativamente altas e aterros nas partes relativamente baixas, acarretando alterações no ambiente em que a planta se desenvolve (PARFITT et al., (2014).

Segundo Marchezan et al. (2001) o nivelamento das áreas, executado durante o processo de sistematização, provoca desuniformidade nas características físico-químicas do solo entre as áreas de corte e aterro, especialmente nos primeiros anos de cultivo, assim o crescente aumento de áreas sistematizadas no Rio Grande do Sul suscita questionamentos a respeito da recuperação da produtividade nas áreas de corte através da aplicação diferencial de nutrientes.

As relações entre os atributos do solo e as profundidades de cortes e aterro sugerem que o mapa de corte e aterro poderia ser utilizado pelo produtor como uma ferramenta prática para o sistema de produção (PARFITT et al., 2014). Reichert et al. (2008) verificaram que a sistematização provocou aumento da

variabilidade espacial nos atributos do solo. Parfitt et al. (2013) observaram que a sistematização do solo afetou negativamente a fertilidade do solo na camada superficial de 0-20 cm, e que isso poderia afetar negativamente a produtividade das culturas no futuro.

Um fator de grande destaque e importância no cultivo do arroz e muito explorado pelos centros de pesquisa nacional é o manejo correto da adubação, podendo muitas vezes ser considerado junto com o melhoramento vegetal, o responsável pelos ganhos em produtividades até o momento alcançadas no Brasil (SOUZA et al., 2010).

As tecnologias da agricultura de precisão e as práticas relacionadas possibilitam a coleta de uma grande quantidade de informações e dados das áreas dos agricultores (COELHO, 2005). Segundo Blackmore (2003) a primeira fase no processo consiste em determinar fatores importantes que indicam ou afetam a eficiência do crescimento da planta. As duas abordagens principais são a criação de mapas de produtividade através de instrumentação do sistema de colheita ou a avaliação de parâmetros do solo por amostragem. Ambas as técnicas dão informações sobre diferentes partes do sistema de cultivo. Uma vez que a variabilidade foi medida, deve ser avaliada para ver o quão significativo é para o manejo.

O uso de mapas de produtividade e de atributos do solo tem papel importante na agricultura de precisão e a maioria dos produtores que adotam a AP faz mapas todos os anos, mas não interpretam a distribuição espacial e a estabilidade temporal em conjunto (BLACKMORE, 2000; SERRANO et al., 2015). A estabilidade temporal pode ser muito importante porque se os padrões espaciais dos parâmetros do solo variarem muito significativamente de ano para ano, a gestão intra-parcelar (ou gestão diferenciada dentro da parcela) pode não ser praticável (XU et al., 2006).

Assim o objetivo deste estudo foi conhecer a distribuição espacial e a estabilidade temporal dos teores de fósforo e potássio do solo e da produtividade do arroz irrigado em área sistematizada e adubada com taxa variada.

6.2 Materiais e Métodos

O estudo foi conduzido em área experimental pertencente à Estação Experimental Terras Baixas (ETB), da Embrapa Clima Temperado, localizada no município de Capão do Leão/RS nas coordenadas 52° 27'59" W, 31° 40' 12.75" S e altitude 16 m. O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico nas partes altas e como Gleissolo Háplico Eutrófico solódico nas partes relativamente baixas (EMBRAPA, 2006).

A área experimental de 1 ha foi sistematizada com Scraper equipado com controle por raios *laser*, segundo um plano com declividade de 0,15%. Durante a sistematização movimentou-se um volume de terra equivalente a 519 m³ ha⁻¹. A profundidade máxima de corte foi de 0,208 m e a profundidade máxima de aterro, de 0,172 m. Para a elaboração do projeto de sistematização da área, foi estabelecida uma malha de 10 m x 10 m totalizando 100 pontos de amostragens, sendo que cada área (10 x 10 m) constitui uma unidade experimental.

Em 2009 após a sistematização, foram determinados os teores de P e K em cada unidade experimental. A área foi cultivada com arroz irrigado nas safras 2009/10, 2010/11, 2011/12 realizando-se adubação de manutenção em taxa fixa de 300 kg ha⁻¹ da fórmula 5-20-20, permanecendo em pousio na safra 2012/13. Em 2013, em cada unidade experimental, foi realizada uma nova coleta de solo, e foram determinados os teores de P e K. Com base nos resultados obtidos através da análise química do solo foram utilizadas as doses recomendadas de correção de fósforo e potássio, individualmente em cada unidade experimental, configurando-se assim uma aplicação em taxa variada.

A adubação foi feita com base nas recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004), as quantidades de P₂O₅ e K₂O aplicadas em cada unidade experimental foram calculadas com base nas regressões apresentadas na (Figura 11), sendo a dose máxima aplicada de 120 kg ha⁻¹ para ambos os nutrientes.

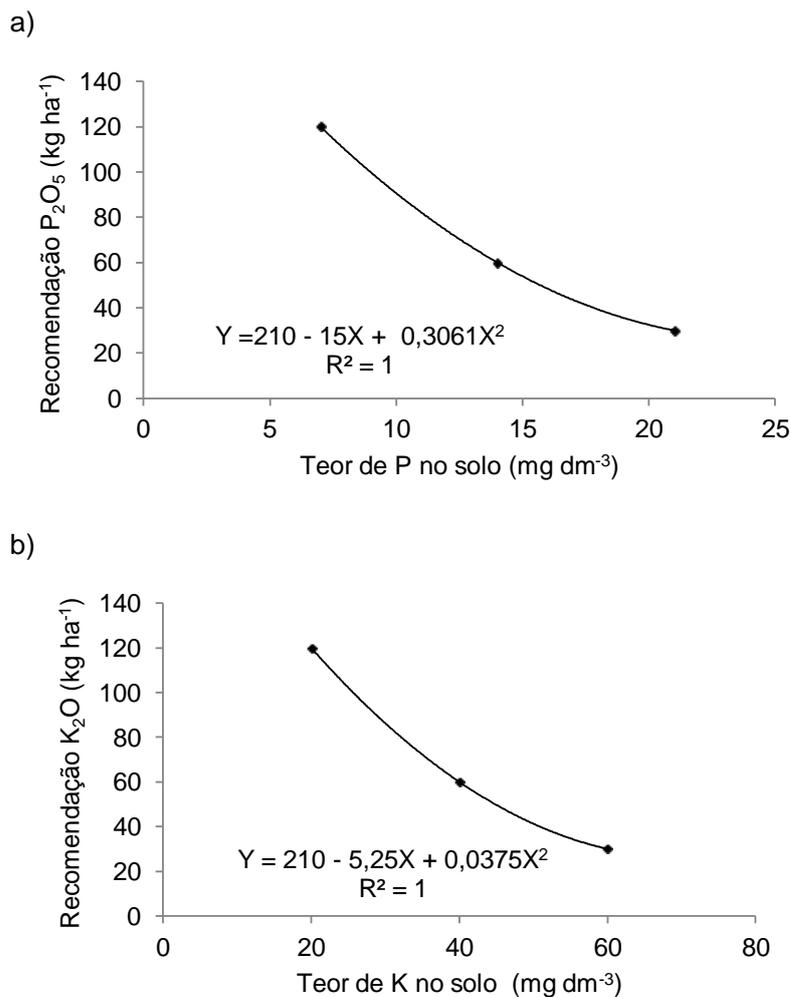


Figura 13 - Regressão linear das doses recomendadas de fósforo (a) e potássio (b) em função do teor do nutriente no solo adaptado pelo Manual de Adubação e Calagem para o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina de 2004.

As unidades experimentais, depois de medidas, foram delimitadas com calcário para a identificação dos limites e facilitar a visualização no campo experimental (Figura 12), e a correção do P e do K do solo foi realizada em cobertura, juntamente com a aplicação de $1,5\ t\ ha^{-1}$ de calcário (PRNT 70) e imediatamente incorporada com grade niveladora na camada de 0 a 0,20 m (Figura 13).



Figura 14 - Distribuição dos fertilizantes nas unidades experimentais.



Figura 15 - Incorporação da adubação de correção com a utilização de grade niveladora.

Em 2014, após a correção da fertilidade do solo a área foi cultivada com cornichão El Rincon (*Lotus subbiflorus*), semeada a lanço em 23/04/2014, com densidade de sementes de 8 kg ha^{-1} em sistema convencional de preparo de solo. Após a coleta das amostras para a determinação da matéria seca do cornichão, a área foi dessecada com glifosato na dose de $2,5 \text{ L ha}^{-1}$ ($360 \text{ g i.a. L}^{-1}$).

Nos dias 15/10/2014 e 30/10/2015 foram realizadas as semeaduras do arroz irrigado, 1ª e 2ª safras, em sistema de plantio direto, em linhas espaçadas de 0,175 m, com densidade de semeadura de 110 kg ha⁻¹ da cultivar BRS Pampa. Na oportunidade foi utilizado 300 kg ha⁻¹ da formula NPK 5-20-20 na base e 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio em cobertura aplicado 50% na entrada d'água e 50% em R0. Em ambas as safras o arroz foi colhido durante o mês de março de cada ano.

Em agosto 2015, antecedendo-se a semeadura do arroz irrigado, realizou-se nova amostragem do solo em cada unidade experimental e determinados os teores de P e K. Assim os teores de P e K do solo foram determinados em 3 tempos (2009, 2013 e 2015) sempre conforme metodologias descritas em Tedesco et al. (1995).

A produtividade do arroz foi determinada em duas safras 2014/15 e 2015/16 para tal foram colhidas 6 linhas no centro da unidade experimental por 5 m de comprimento totalizando uma área de 5.25 m². A colheita foi realizada com colheitadeira experimental da WINTERSTEIGER modelo Classic, que realiza automaticamente a trilha para a retirada das impurezas e a determinação da umidade da amostra colhida.

A estabilidade temporal dos teores de P e K no solo e da produtividade do arroz irrigado foi determinada pelo cálculo do CV de cada ponto de amostragem ao longo do tempo (Equação 1) utilizando o método previamente apresentado por Blackmore (2000) e utilizado por Xu et al. (2006) para avaliação da estabilidade temporal da produtividade de culturas e que vem sendo utilizado na avaliação dos atributos do solo (SERRANO et al., 2013 e MEDEIROS et al., 2016).

$$CV_i = \frac{\left(\frac{n \sum_{t=1}^{t=n} y_{it}^2 - (\sum_{t=1}^{t=n} y_{it})^2}{n(n-1)} \right)^{0,5}}{\bar{y}_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

CV_i = o coeficiente de variação de cada ponto de amostragem (i) ao longo do tempo;

y_{it} = a concentração dos parâmetros do solo nos pontos de amostragem (i) no tempo t e n é o número de anos de amostragem;

\bar{y} = o valor médio do parâmetro no ponto de amostragem (i) no conjunto dos anos de amostragem.

O coeficiente de variação médio ($CV_{médio}$) para o período analisado (3 anos) e para o conjunto de todos os pontos de amostragem (100 pontos) foi calculado de acordo com a Equação 2 (XU et al., 2006):

$$CV_{médio} = \frac{\sum_{i=1}^m CV_i}{m} \quad (2)$$

Onde:

m = o número de pontos de amostragem do solo.

Todos os conjuntos dos dados foram submetidos a uma análise estatística exploratória e ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (KS) a um nível de significância de 5%, utilizando o “software R” (R CORE TEAM, 2016).

Para a análise da estrutura de variabilidade espacial dos dados, realizou-se o cálculo do semivariograma experimental isotrópico e ajustaram-se modelos teóricos de semivariogramas para cada um destes obtendo os parâmetros efeito pepita (c_0), patamar (c_0+C) e alcance (A).

A partir disto, foram elaborados os mapas dos atributos por meio da krigagem, quando o atributo apresentou uma estrutura de variabilidade adequadamente identificada, e do interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IDW), quando não apresentou. Os ajustes dos modelos teóricos foram avaliados por meio do coeficiente de determinação ajustado (Ra^2) e do Grau de Dependência Espacial (GDE) (CAMBARDELLA et al., 1994). Os mapas foram

construídos no programa GS+ (Gamma Design Software, 2005).

Mapas de distribuição espacial dos teores de P e K no solo nos três tempos e da produtividade de arroz irrigado nas duas safras foram elaborados com a finalidade de ilustrar a variabilidade espacial, sobretudo após a adubação com taxa variada, e a relação entre estas variáveis. Mapas da distribuição espacial dos coeficientes de variação temporal dos teores de P e K no solo e da produtividade do arroz foram gerados para identificar as áreas que apresentaram estabilidade temporal destas variáveis.

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Análises descritivas e teste de normalidade

Na Tabela 3 estão descritos os valores da análise descritiva exploratória. Tanto os teores de P como de K no solo, tiveram um acréscimo nos níveis de fertilidade ao longo do tempo. O P que em 2009 após a sistematização tinha teores de 0,52 mg/dm³, 8,4 mg/dm³ e 16,27 mg/dm³ para mínimo, média e máximo respectivamente, e um coeficiente de variação de 44,58%. Em 2013 apresentou teores de 2,7 mg/dm³, 11,1 mg/dm³ e 26 mg/dm³ para as mesmas variáveis e coeficiente de variação de 52,53 %. Este incremento nos teores pode ser relacionado ao fato de esta área ter sido cultivada com arroz irrigado com adubação em taxa contínua por 3 safras seguidas, o que pode ter deixado um efeito residual na área. Já no ano de 2015, após a correção da fertilidade em taxa variada, observa-se os teores de 13,3 mg/dm³, 23 mg/dm³ e 42,8 mg/dm³ para mínimo, média e máximo respectivamente, e um coeficiente de variação de 23,27%. Este efeito no coeficiente de variação indica que a adubação em taxa variada tendeu a padronizar os teores de P no solo.

O K teve um comportamento semelhante ao P ao longo do tempo. Em 2009 após a sistematização tinha teores de 18,16 mg/dm³, 37,8 mg/dm³ e 64 mg/dm³ para mínimo, média e máximo respectivamente, e um coeficiente de variação de 31,78%. Em 2013 apresentou teores de 24 mg/dm³, 45 mg/dm³ e 71 mg/dm³ para as mesmas variáveis e coeficiente de variação de 17,41 %. Este incremento nos teores pode ser relacionado ao fato de esta área ter sido cultivada com arroz irrigado com adubação em taxa contínua por 3 safras seguidas, o que pode ter deixado um efeito residual na área. Já no ano de 2015, após a correção da

fertilidade em taxa variada, observa-se os teores de 39 mg/dm³, 68 mg/dm³ e 113 mg/dm³ para mínimo, média e máximo respectivamente, e um coeficiente de variação de 15,78%.

Tabela 3 - Análise estatística exploratória e teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (K-S) aplicados aos atributos P e K, produtividade e a adubação de P₂O₅ e K₂O antes, logo após (três meses) e após cinco anos e sete meses da sistematização.

	Média	Med	Máx	Mín	C.V (%)	AS	C	K-S	P-valor
P-Mehlich (mg/dm³)¹	8,4	8,8	16,27	0,52	44,58	-0,02	-0,83	0,06	0,80 N
P-Mehlich (mg/dm³)²	11,1	10,6	26,0	2,7	52,30	0,56	-0,31	0,07	0,64 N
P-Mehlich (mg/dm³)³	23,0	22,0	42,8	13,3	23,27	1,23	2,06	0,13	0,06 N
K (mg/dm³)¹	37,8	35,2	64,08	18,16	31,78	0,41	-0,95	0,11	0,12 N
K (mg/dm³)²	45,6	45,0	71,0	24,0	17,41	0,52	1,20	0,16	0,01 N
K (mg/dm³)³	68,9	68,0	113,0	39,0	15,78	1,12	3,13	0,12	0,12 N
Produtividade 14/15	9,7	9,7	12,84	6,64	11,04	-0,01	0,52	0,07	0,74 N
Produtividade 15/16	8,8	9	12,25	5,31	18,44	-0,09	-0,63	0,07	0,68 N
Adubação P₂O₅	50,96	49,68	105,6	26,28	47,69	0,26	-1,11	0,10	0,33 N
Adubação K₂O	91,44	85,42	120,0	26,23	27,19	0,93	2,55	0,10	0,29 N

¹= depois da sistematização (2009); ²= no ano de 2013; ³= no ano de 2015; Med= mediana; Máx=máximo; Min=mínimo; C.V (%) = Coeficiente de Variação; AS= Assimetria; C= Curtose; K-S= Kolmogorov-Smirnov.

6.3.1 Distribuição espacial e estabilidade temporal do potássio no solo

A distribuição espacial das áreas de corte e aterro da área experimental sistematizada em 2008, figura 14, apresenta uma pequena área que a magnitude do aterro foi superior a 10 cm (o máximo aterro foi de 17,2 cm), na maior parte da zona de aterro este variou entre 3,8 e 10 cm. Já a magnitude dos cortes variou mais e na maior parte da área cortada foi superior a 8,5 cm. A maior profundidade de corte foi de 20,8 cm.

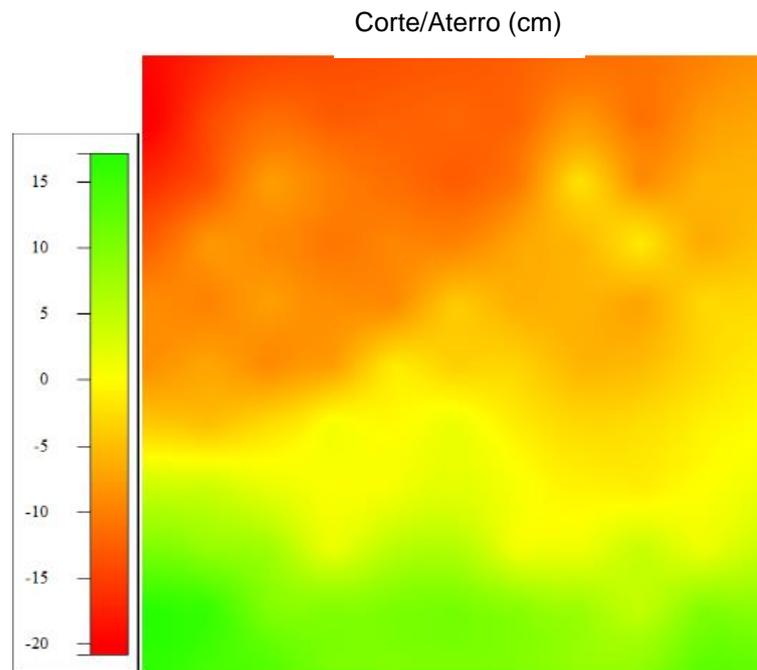


Figura 16 - Distribuição espacial das zonas de corte e aterro da área experimental sistematizada.

Os teores de K no solo em 2008 (Figura 15) variaram em função das magnitudes das zonas de corte e aterro resultantes da sistematização (Figura 14), diminuindo gradativamente em função do aumento da magnitude dos cortes. Parfitt et al. (2013) avaliaram a relação dos atributos químicos: K (mg dm^{-3}) no solo com a zonas de corte e aterro nesta mesma área experimental, entre todos os atributos analisados o potássio foi o que apresentou o maior coeficiente de relação ($r^2=0,79$) com as áreas de corte e aterro, quanto menores as magnitudes de corte e maiores as de aterro maiores eram os teores de K no solo.

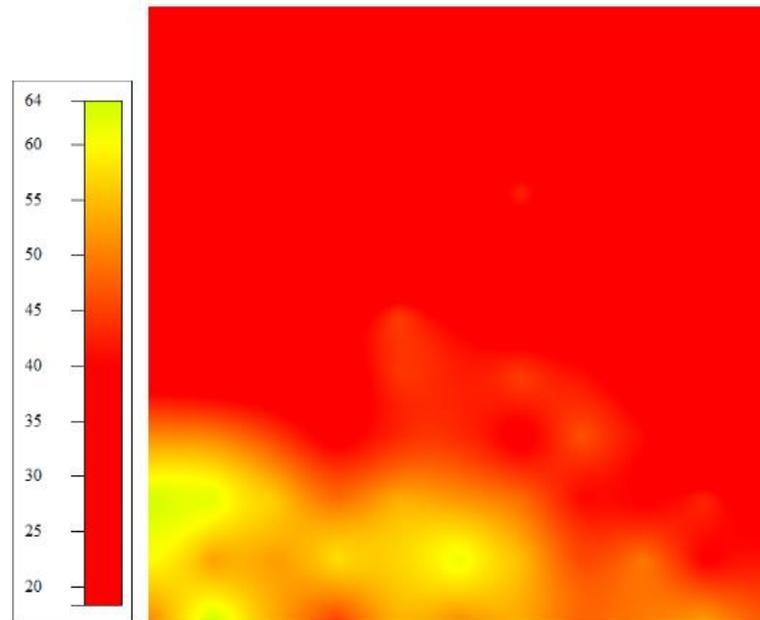


Figura 17 - Distribuição espacial dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada em 2009.

Conforme a classificação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004) em 2009 os teores de K no solo variaram entre muito baixo e baixo na maior parte das áreas de corte, nas áreas de aterro os valores estiveram entre baixo e médio (Figura 13), os valores de K no solo foram interpretados com base na classe de CTC_{pH7} entre 5,1 e 15 $cmol_c\ dm^{-3}$. Sartori et al. (2016) também observaram que as áreas de aterro, em geral, apresentam melhor fertilidade, e que os valores K no solo eram menores nas áreas de corte.

Na Figura 16 pode-se observar a distribuição espacial dos teores de K no solo em 2013, após 3 anos de cultivo de arroz em plantio direto, com adubação em taxa contínua de 300kg da fórmula NPK 5-20-20. Conforme a classificação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004) em 2013, os teores de K no solo variaram entre baixo e médio na maior parte das áreas de corte, na maior parte das áreas de aterro os valores foram médios, os valores de K no solo foram interpretados com base na classe de CTC_{pH7} entre 5,1 e 15 $cmol_c\ dm^{-3}$.

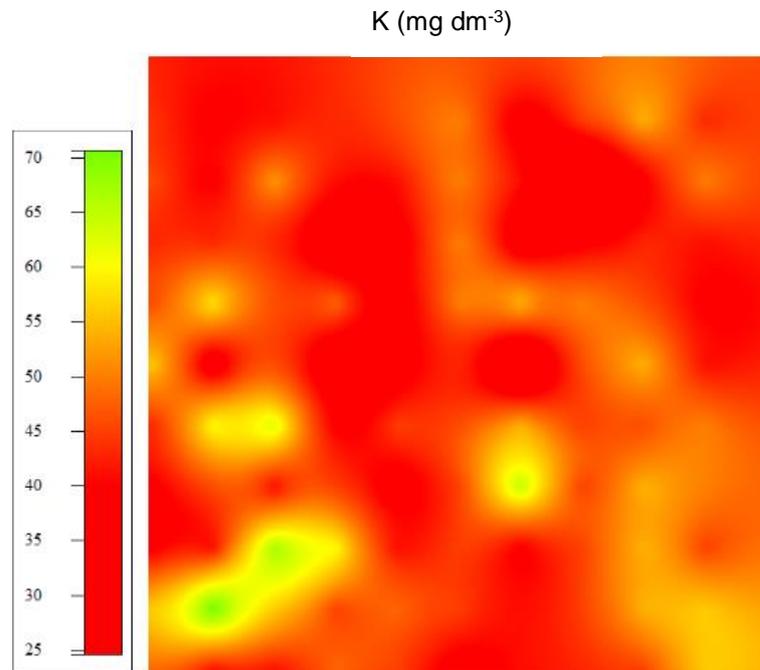


Figura 18 - Distribuição espacial dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada em 2013.

Nota-se que enquanto em 2009 o teor mínimo de K no solo encontrado nas áreas de corte foi de 19,9 mg dm⁻³ (Figura 15) em 2013 nas mesmas áreas o mínimo foi de 30,4 mg dm⁻³ (Figura 16), a elevação dos teores de K no solo se deve a adubação e cultivo da área pelo período de 3 safras.

Embora em 2013 tenha havido uma distribuição mais homogênea dos teores de K no solo, nas áreas de maior magnitude de corte os teores foram menores que os das áreas de aterro, evidenciando que após 5 anos da sistematização ainda existe efeito das áreas de corte e aterro na fertilidade do solo, e que adubação da área sistematizada com taxa contínua pode não ser o melhor para corrigir a fertilidade do solo após a sistematização.

Com base nos teores de K do solo determinados em 2013 foi feita uma adubação potássica com taxa variada (Figura 17).

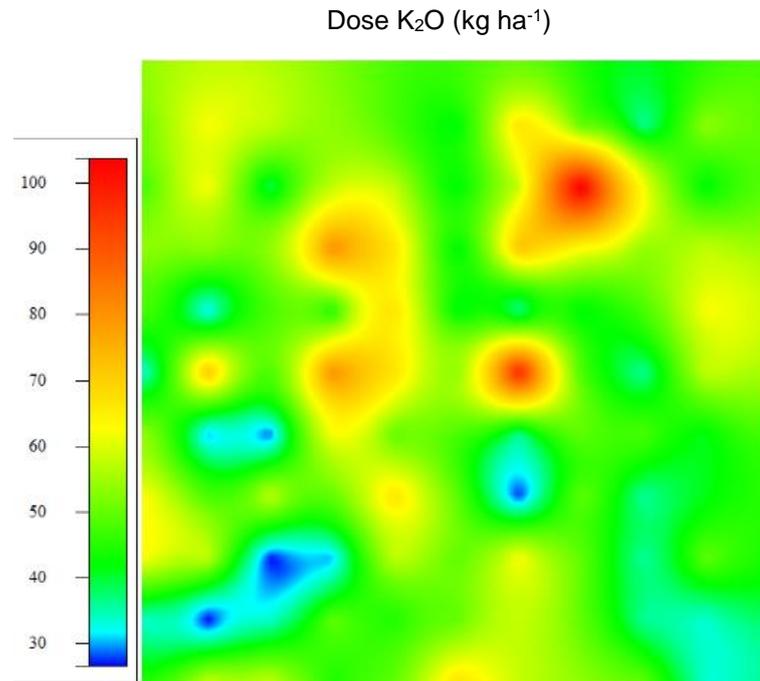


Figura 19 - Distribuição espacial das doses de K₂O aplicadas em taxa variada na área experimental em 2013.

De maneira geral na área de corte, a menor dose de K₂O recomendada foi de 52 kg ha⁻¹ enquanto que na área de aterro essa foi a maior dose recomendada (Figura 15). Isso evidencia a importância do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo para que o manejo seja feito da melhor forma. Segundo Souza et al. (2008), é importante determinar não só a quantidade de insumo aplicada numa área, mas também sua distribuição espacial, objetivando atingir, em toda área, o máximo do potencial produtivo.

Na Figura 18 está apresentada a distribuição espacial dos teores de K no solo determinados em 2015. Após a aplicação da adubação com taxa variada, o cultivo do cornichão e o cultivo do arroz irrigado safra 2014/2015, conforme a classificação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004) em 2015 os teores de K no solo variaram entre médio e alto, os valores foram interpretados com base na classe de CTC_{pH7} (5,1-15 cmol_c dm⁻³).

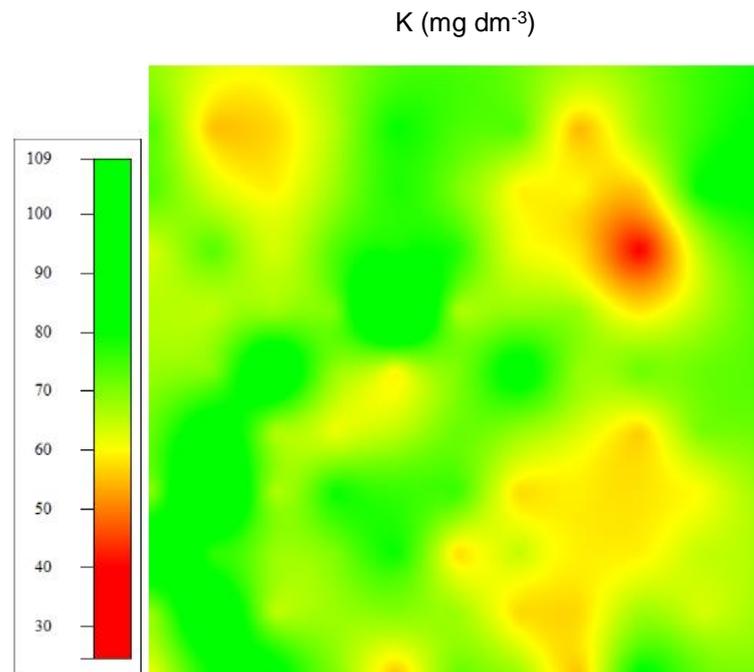


Figura 20 - Distribuição espacial dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada em 2015.

Em 2015 após a adubação de correção total com taxa variada o padrão da distribuição espacial dos teores de K no solo, não foi definido pelas zonas de corte e aterro resultantes da sistematização, apresentando uma distribuição mais homogênea na maior parte da área os valores variaram entre 70 e 100 mg dm⁻³ (Figura 18).

Na Figura 19 observa-se a distribuição espacial dos coeficientes de variação temporal. Segundo classificação proposta por Blackmore (2000) existe estabilidade temporal quando o CVi < 30%, valores de CVi superiores a 30% indicam a instabilidade da variável ao longo do tempo. Assim para o período observado identificou-se a estabilidade temporal do K no solo na maior parte da área de aterro e nas áreas de corte foram observados os maiores valores de CVi indicando a maior instabilidade temporal dos teores de K no solo dessas áreas.

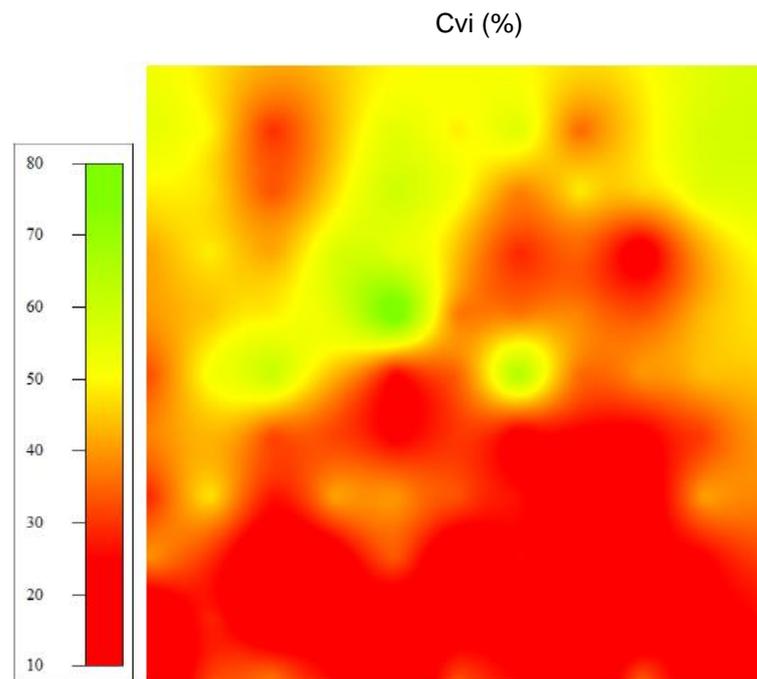


Figura 21 - Distribuição espacial dos Coeficientes de variação temporal (CVi) dos teores de potássio (K) no solo da área sistematizada para o período 2009-2015.

O $CV_{\text{médio}}$ dos teores de K no solo foi de 35,2%, o que indica que os teores de K no solo ainda variam no tempo, mas estão próximos da estabilidade temporal. Segundo Serrano et al. (2014) em estudo realizado em áreas de pastagem, os progressos para a utilização mais eficiente do K e, conseqüentemente, para a sustentabilidade dos sistemas requerem que as recomendações tenham em consideração os processos que regulam a dinâmica do K no solo e a sua variabilidade espacial e temporal.

Observa-se também na figura19 que os maiores coeficientes de variação temporal são encontrados na região onde ocorreu os cortes, que conseqüentemente apresentou níveis mais baixos de teores de K recebendo assim, doses mais elevadas do fertilizante afim de padronizar a área em níveis altos de fertilidade.

6.3.2 Distribuição espacial e estabilidade temporal do fósforo no solo

Os teores de P no solo em 2009, assim como o K, variaram em função das zonas de corte e aterro resultantes da sistematização, os menores teores de P no solo ocorreram nas zonas de corte. Conforme a classificação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004), os teores de P no solo das zonas de corte variaram entre médio e alto, já nas zonas de aterro os teores variaram entre alto e muito alto (Figura 20).

Essa variabilidade espacial dos macronutrientes entre as zonas de corte e aterro é esperada, segundo Marchezan et al. (2001), o processo de sistematização, provoca desuniformidade nas características físico-químicas do solo entre as áreas de corte e aterro, especialmente nos primeiros anos de cultivo

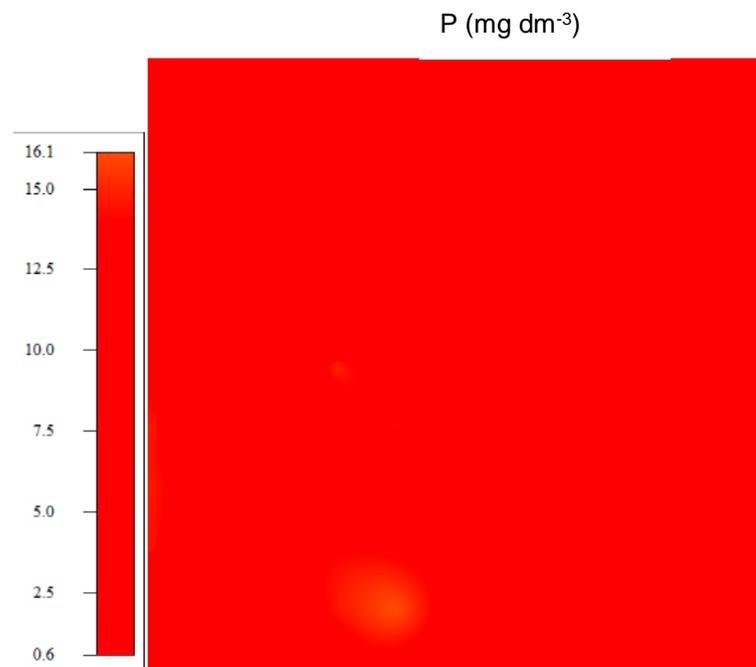


Figura 22 - Distribuição espacial dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada em 2009.

Em 2013, após 3 anos de cultivo de arroz em plantio direto, com adubação em taxa contínua de 300kg da fórmula NPK 5-20-20, observa-se que ainda existe uma variação dos teores de P no solo de acordo com as zonas de corte e aterro (Figura 21), os maiores teores de P ocorreram nas zonas de aterro. Conforme a classificação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004), em 2013, os teores de P no solo variaram entre médio e alto na maior parte das áreas de corte, na maior parte das áreas de aterro os valores variaram entre alto e muito alto. Assim como

aconteceu com os teores de K, houve um aumento dos teores de P no solo no ano de 2013, em resposta aos 3 anos de adubação e cultivo da área.

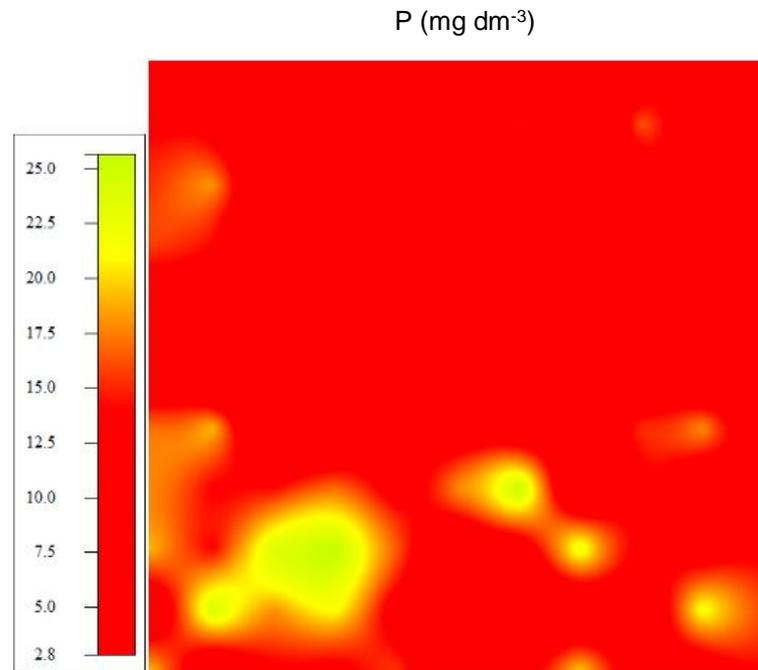


Figura 23 - Distribuição espacial dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada em 2013.

Com base nos teores de P do solo determinados em 2013 foi feita uma adubação fosfatada com taxa variada (Figura 22). Assim como se observou na adubação com taxa variada do potássio, de maneira geral a maior dose recomendada de P nas áreas de corte correspondeu a menor dose aplicada nas zonas de aterro. Segundo Parfitt et al. (2014) devido a relação entre os atributos químicos e a profundidade dos cortes e/ou aterros, o mapa de cortes e aterros, obtido no projeto da sistematização, é uma ferramenta útil para a recuperação do solo nas zonas degradadas através de adição de corretivos e/ou fertilizantes químicos ou orgânicos.

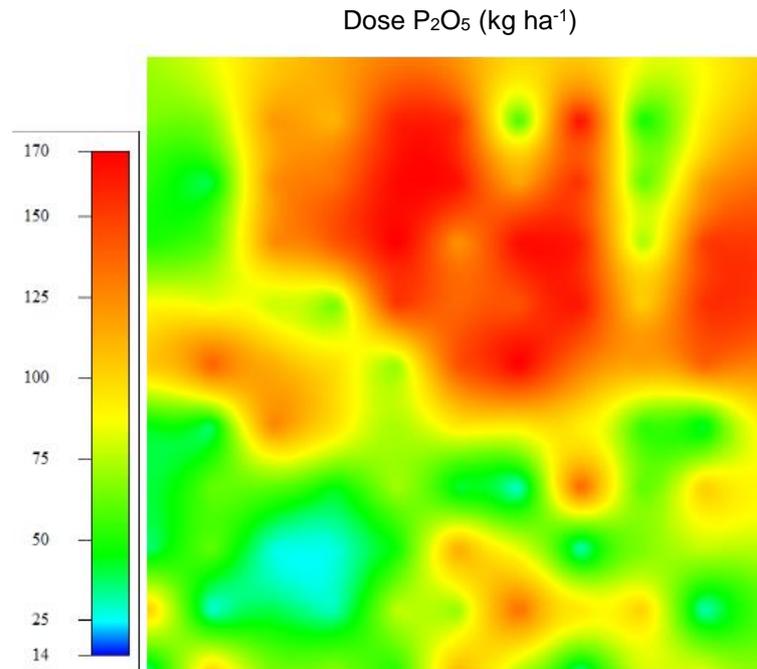


Figura 24 - Distribuição espacial das doses de P_2O_5 aplicadas em taxa variada na área experimental em 2013.

Na Figura 23 está apresentada a distribuição espacial dos teores de P no solo em 2015, após adubação com taxa variada e cultivo da safra 2014/15 de arroz irrigado. Observa-se que após a adubação com taxa variada o padrão da distribuição espacial dos teores de P no solo não foi definido pelas zonas de corte e aterro resultantes da sistematização, houve uma distribuição mais homogênea e em toda a área (Figura 21) os valores P foram muito altos de acordo com a classificação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004).

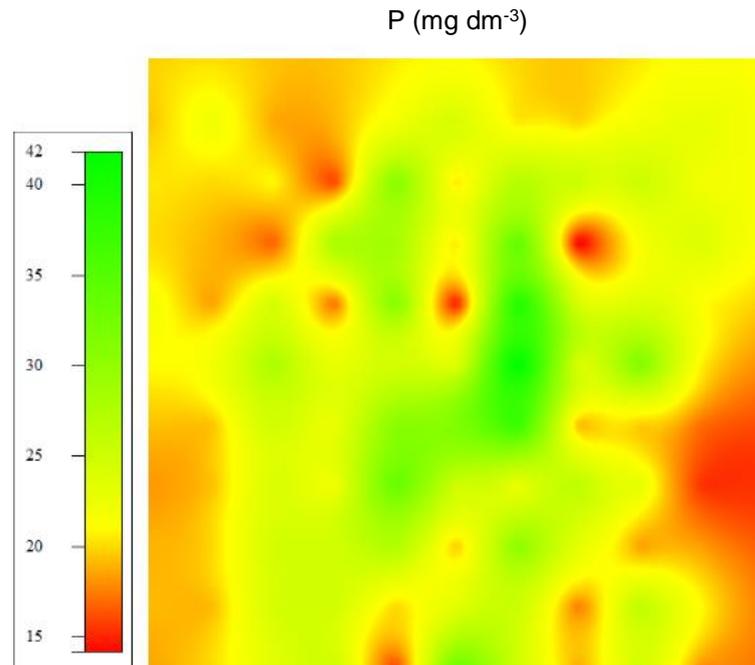


Figura 25 - Distribuição espacial dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada em 2015.

Na Figura 24 observa-se a distribuição espacial dos coeficientes de variação temporal (CVi) para os teores de P no solo, para o período observado com exceção de 3 pontos, em toda área o CVi foi superior a 30% indicando a instabilidade temporal dos teores de P no solo. Salienta-se que os menores valores de CVi foram observados nas áreas de aterro, indicando que a estabilidade temporal dos teores de P ocorreria mais rapidamente nesta área, o que também foi observado para os teores K no solo. O CV_{médio} dos teores de P no solo foi de 62,6%, o que indica que os teores de P no solo ainda variavam muito no tempo. Conforme Serrano et al. (2012), o CV_{médio} evidencia a magnitude relativa da variação temporal dos parâmetros em análise, assim valores elevados de CV indicam considerável variação temporal.

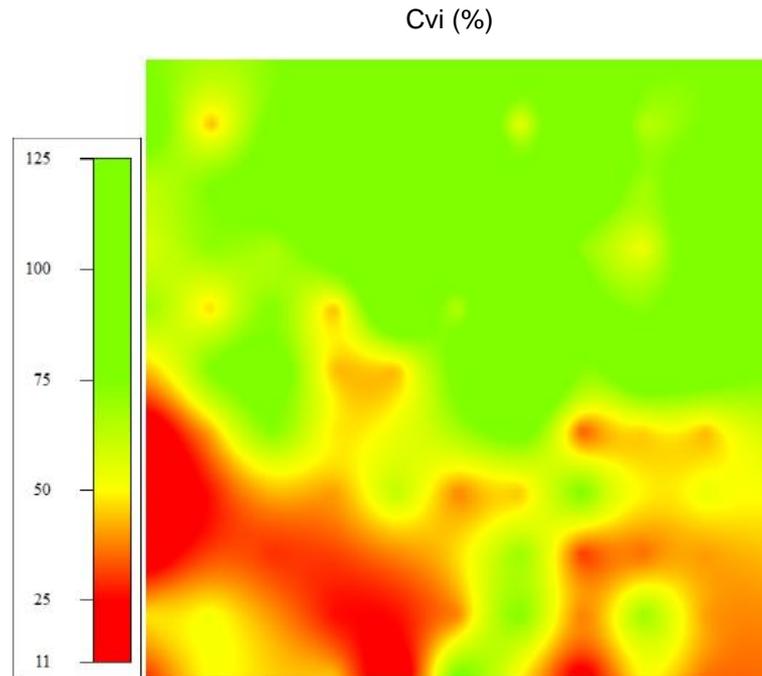


Figura 26 - Distribuição espacial dos coeficientes de variação temporal (CVi) dos teores de fósforo (P) no solo da área sistematizada para o período 2009-2015.

Após a sistematização existe a modificação da fertilidade do solo da área, as áreas de corte sofrem maior perda da fertilidade, assim a estabilidade temporal da fertilidade nas áreas de corte demora mais tempo para ser identificada. Sartori et al. (2016) realizaram um estudo em área de várzea sistematizada e observaram que após 15 anos embora os teores de K e P nas áreas de aterro fossem maiores que os das áreas de corte não havia diferença significativa entre eles.

Estes resultados reforçam a importância de se estudar a distribuição espacial e a estabilidade temporal dos atributos químicos do solo, de forma que o manejo da adubação considere estas características para garantir uma aplicação viável economicamente e garantido o melhor manejo do solo. Segundo Tesfahunegn et al. (2011), informações científicas sobre a variabilidade e distribuição espacial de atributos do solo são essenciais a tomada de decisões sustentáveis relativas ao manejo do solo e das culturas.

6.3.3 Distribuição espacial e estabilidade temporal da produtividade do arroz irrigado

Na safra 2014/15 a produtividade do arroz irrigado foi menor nas áreas de corte, de forma que quanto maior a magnitude do corte menor a produtividade (Figura 25). Os mapas foram elaborados através dos resultados obtidos pelo c_0 , c_0+C e A , sendo que apresentou uma variação no estimador conforme a o ano de produtividade, sendo que no ano de 2014/2015 apresentou um gaussiano, passado para um esférico, com isso os valores de c_0 e A diminuíram conforme o ano, sendo que para $c_0 + C$ os valores aumentaram. Enquanto isso o GDE (%) apresentou ser forte ($>25\%$) em ambos os anos. Para a produtividade cvi (%) da safra de 2014/2015 apresentou um estimador exponencial com um A de 29,91m, tendo um GDE (%) moderado ($25\% < GDE \leq 75\%$), anexo 3.

Na maior parte da zona de corte onde a magnitude variou entre 2,3 e 8,5 cm a produtividade foi superior a 11 t ha^{-1} mesma produtividade das zonas de aterro, nas zonas de corte com magnitude entre 8,5 e 14,6 cm a produtividade variou entre 8,9 e $9,9 \text{ t ha}^{-1}$, quando a magnitude do corte foi superior a 14,6 cm a produtividade foi inferior a $8,9 \text{ t ha}^{-1}$.

Walker et al. (2003) avaliaram a produtividade do arroz em áreas sistematizadas e observaram que a porcentagem de perda na produtividade nas zonas de corte quando comparadas as zonas de aterro eram diretamente proporcionais ao volume de solo movido por hectare no processo de sistematização.

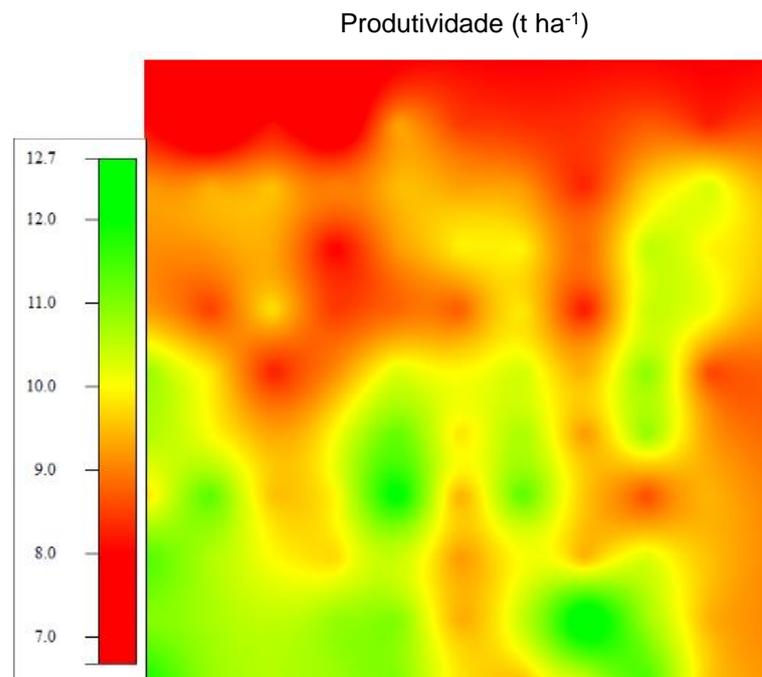


Figura 27 - Distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado na safra 2014/15.

As áreas de menor produtividade da safra 2014/15 correspondem aquelas com menores teores de P e K nos anos 2009 e 2013. Embora a adubação com taxa variada tenha sido realizada antes desta safra observa-se que para a primeira safra, após o manejo diferenciado da adubação em taxa variada, ainda não teve o efeito esperado, que seria homogeneizar a produtividade ao longo das áreas de corte e aterro.

Na safra 2015/16 houve variabilidade espacial da produtividade do arroz (Figura 26), mas esta não apresentou o padrão bem definido entre as zonas de corte e aterro observado na safra anterior. Isto pode ter ocorrido porque assim como para os teores de K (Figura 18) e P (Figura 23) em 2015, 2 safras após a adubação com taxa variada, a distribuição espacial das variáveis não estiveram relacionadas as zonas de corte e aterro.

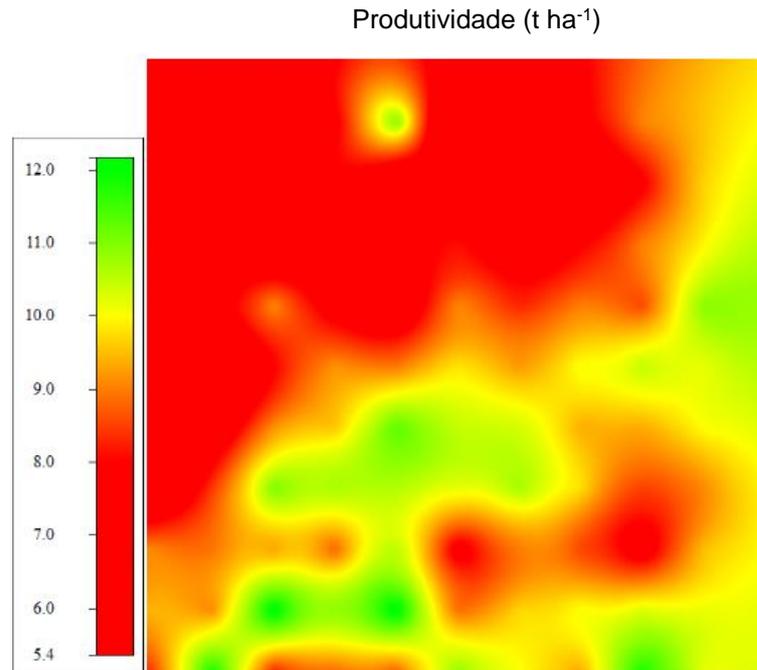


Figura 28 - Distribuição espacial da produtividade do arroz irrigado na safra 2015/16.

Observa-se na Figura 26 que embora algumas zonas de corte apresentassem produtividades tão altas quando as zonas de aterro, as menores produtividades ainda ocorreram nas zonas de corte.

Com base no coeficiente de variação temporal (CV_i) da produtividade (Figura 27) observa-se que houve estabilidade temporal desta variável em toda a área (CV_i < 30%). O CV_{médio} da produtividade foi de 11,26 % indicando uma pequena variação temporal da produtividade do arroz.

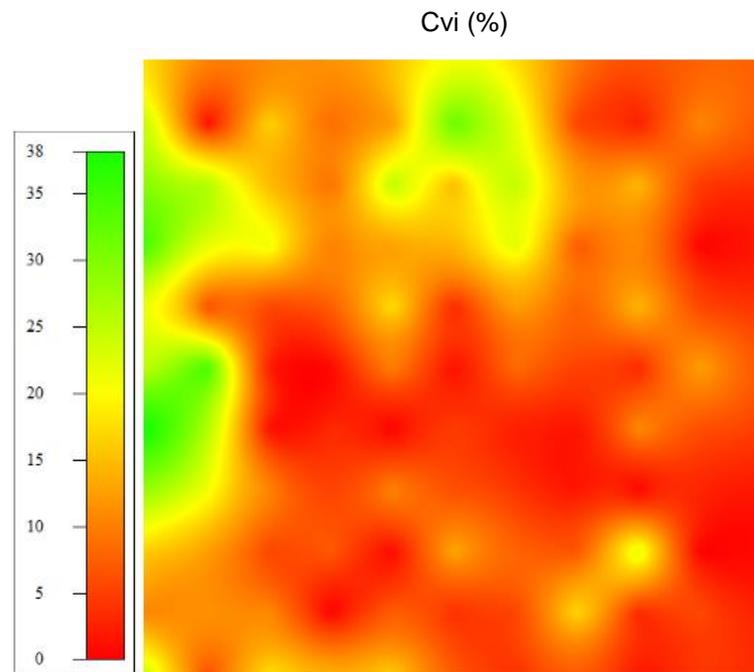


Figura 29 - Distribuição espacial dos coeficientes de variação temporal (Cvi) da produtividade do arroz irrigado para as safras 2014/15 e 2015/16.

A estabilidade temporal confirma o padrão da distribuição espacial das produtividades, as zonas de aterro apresentaram as maiores produtividades em ambas as safras, e embora a produtividade tenha aumentado em zonas de corte na safra 2015/16 nestas áreas foram obtidas as menores produtividades em ambas as safras.

De maneira geral observou-se que a distribuição espacial dos teores de P e K do solo bem como da produtividade do arroz foram mais influenciadas pelas zonas de corte e aterro antes da adubação com taxa variada, evidenciando a importância da utilização desta técnica. Segundo Serrano et al. (2014), a tecnologia de aplicação variável pode ser uma interessante estratégia para garantir o equilíbrio de nutrientes no solo e para otimizar a produtividade.

Os teores de K no solo e a produtividade do arroz irrigado apresentaram menor variação temporal, a menor estabilidade temporal do P no solo pode ter ocorrido porque o fósforo tem seu comportamento mais influenciado pelo alagamento do solo, conforme a CQFS (2004) em solos alagados ocorre reações de redução que aumentam o pH e a disponibilidade de fósforo.

6.4 Conclusões

1– A distribuição espacial das zonas de corte e aterro do solo sistematizado influenciam a variabilidade espacial dos teores de fósforo e potássio no solo e da produtividade do arroz irrigado quando a adubação é feita em taxa contínua.

2 – Após a adubação com taxa variada a distribuição espacial dos teores de fósforo e potássio do solo é mais homogênea e não se relaciona as zonas de corte e aterro da área sistematizada.

3– O teor de potássio no solo e a produtividade do arroz irrigado apresentaram estabilidade temporal, já os teores de fósforo do solo apresentam maior variação temporal.

4- A Adubação em taxa variada diminui a variabilidade do P e do K ao longo do tempo.

Considerações Finais

A sistematização dos solos de terras baixas no RS proporcionara um melhor ambiente para a diversificação do sistema produtivo neste ambiente. Em que pese, através das novas tecnologias disponíveis, será possível conhecer mais a respeito dos efeitos deste procedimento na variabilidade espacial da fertilidade, atributos físicos e biológicos e conseqüentemente a produtividade das culturas.

Assim, o desenvolvimento de pesquisas em áreas sistematizadas é de fundamental importância para o desenvolvimento e o aprimoramento técnico para tomada de decisão no ajuste de projetos.

Referências

AZEVEDO, E. C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso**. 2004. 141 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

AYALA, W.; BERMÚDEZ, R. Caracterização produtiva de melhoramentos de campo em base a Lotus El Rincón e LotusMaku. In.: JORNADA DE UTILIZACIÓN DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO EM LA ZONA ESTE DEL PAÍS, 33., 2001, Rocha. [Informações] [S.l.], 2001.

BLACKMORE, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.26, p. 37-51, 2000.

BLACKMORE, S. **The role of yield maps in Precision Farming**. 2003.162 f. Tese de Doutorado. Cranfield University, Bedfordshire, 2003.

BRYE, K. R.; SLATON, N. A.; NORMAN, R. J. Soil physical and biological properties as affected by land leveling in a clayey Aquert. **Soil Science Society of America Journal**, 70:631-642, 2006.

CAMBARDELLA, C.A.; MOOMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEM, D.L.; TURVO, R.F. & KONOPA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science of America Journal**., 47:1501-1511, 1994.

CARÁMBULA, M. Fertilización fosfatada: un insumo determinante de éxito en los suelos con restricciones de la Región Este. In: SEMINARIO DE ACTUALIZACIÓN TÉCNICA: FERTILIZACIÓN FOSFATADA DE PASTURAS EN LA REGIÓN ESTE, 2004, Montevideo, Uruguay. **Palestras...** Montevideo: INIA - Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 2004. 132p

CARLOS, F.S.; MARAFON, A.J.; ANDREAZZA, R.; ANGHINONI, I.; TEDESCO, M.J.; DE OLIVEIRA CAMARGO, F.A. Alterações eletroquímicas e dinâmica de nutrientes na solução do solo em arroz irrigado com lixiviado industrial tratado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 466-474, n. 2, 2015.

COELHO, A. M. **Agricultura de Precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas**. Documentos 46 - Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, 2005.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBSC-NRS/EMBRAPA-CNPT, 2004. 400 p.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

COSTA NETO, P.L.O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 266p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo segundo levantamento, setembro 2013**. Brasília: CONAB. 2013. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_09_10_16_05_53_boletim_portugues_setembro_2013.pdf. Acesso em: 24 set. 2015.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, Madison, v. 102, p. 267-322, 2009.

CRESSIE N. A. C.; HAWKINS, D. M. **Robust estimation of the variogram**. *Mathematical Geology*, New York, v.12, n.2, p.115-125, 1980.

CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura Brasileira. *Informações Agrônomicas*, Piracicaba, v. 145, p. 1-13, 2015

DARIO, G. J. A. Sistematização de áreas para o cultivo do arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado e suas conseqüências. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO II, 2001, Porto alegre. Anais. Porto Alegre: Instituto Riograndense do Arroz, 2001. v.1, p.161.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Embrapa Solos, 2006. 306p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise do solo. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Embrapa Solos. 1997, 212p.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A; SILVA, E. A. da; JOHANN, J. A. & BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:463-476, 2008.

FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.14, n.2, p.141-147, 1979.

FLORES, R.A.; SHEFFER-BASSO, S.M.; DALL'AGNOL, M. Caracterização morfofisiológica de genótipos de trevo branco. **Revista Brasileira de Agrocência**, v.8, n.1, p.21-28, 2004.

GODOY, S. G. de; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. de B.; COBUCCI, T.; LACERDA, M. C. Correlação entre produtividade do arroz no sistema semeadura direta e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.119-125, 2015.

GOMES, J. F., REIS, J. C. L. Produção de Forrageiras Anuais de Estação Fria no Litoral Sul do Rio Grande do Sul. **Rev. bras. zootec.**, v.28, p.668-674, 1999.

GONÇALVES, G. K.; Meurer, E.J., Bortolon, L.; Gonçalves, D.R.N. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1633-1639, 2011.

GS+ for Windows. 2005. Gamma Design Software: Version 7.0.24. Plainwell, MI.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ - IRGA, 2015, disponível em <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20090828095727.pdf>, acesso em 6 de setembro de 2015

JAT, M.L.; GATHALA, M.K.; LADHA; J.K.; SAHARAWAT, Y.S.; JAT, A.S.; KUMAR, V.; SHARMA, S.K.; KUMAR, V.; GUPTA, R. Evaluation of precision land leveling and double zerotill systems in the rice–wheat rotation: water use, productivity, profitability and soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, v.105, p.112–121, 2009.

LITTLE, T.M.; HILLS, F.J. **Agricultural experimentation - Design and Analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1978. 350p.

LIU, Z.; ZHOU, W.; SHEN, J.; HE, P.; LEI, Q.; LIANG, G. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. **Geoderma**, v. 235, p. 39-47, 2014.

KOSMAS, C.; GERONTIDIS, S.T.; MARATHIANOU, M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesvos (Greece). **Catena** 40: 51–68, 2000.

KUOTSU, K.; DAS, A.; LAL, R.; MUNDA, G. C.; GHOSH, P. K.; NGACHAN, S. V. Land forming and tillage effects on soil properties and productivity of rainfed groundnut

(*Arachis hypogaea* L.) – rapeseed (*Brassica campestris* L.) cropping system in northeastern India. **Soil & Tillage Research**, v.142, p.15-24, 2014.

MAGALHÃES JÚNIOR, A.M., A. M., MORAES, O.P., FAGUNDES, P.R., MOURA NETO, F.P., FRANCO, D.F., NEVES, P.C.N., NUNES, C.D.N., RANGEL, P.H.N, PETRINI, J.A., SEVERO, A.C. **BRS Pampa: Cultivar de Arroz Irrigadode Alta Produtividade e Excelência na Qualidade de Grãos**. Pelotas: Embrapa Clima temperado, 2012. 8p. (Embrapa Clima Temperado. Comunicado técnico n° 282).

MATHERON, G. **Traite de geostatistique applique, Tome II: Le krigeage. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières**. n. 24, Paris: Editions Bureau de Recherche Géologiques et Minières, 1963.

MEDEIROS, W. N.; DE QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; DE CARVALHO PINTO, F. D. A.; MELO, C. A. D. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. **Bioscience Journal**, v. 32, p. 150-159, 2016.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre, Evangraf, 2006. 285p.

MOLIN, J.P.; AMARAL, L.R.; COLAÇO, A. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 224p.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. *Engenharia Agrícola*, v. 22, p. 83-92, 2011.

NUNES, M.L.; KLAMT, E.; REICHERT, J.M.; DALMOLIN, R.S.D. Características de solos sistematizados em duas áreas cultivadas com arroz sob inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.395-406, 2002

PARFITT, J.M.B.; PINTO, M.A.B.; TIMM, L.C. **Efeito da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos de um solo de várzea no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014. 30p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n° 189).

PARFITT, J.M.B.; TIMM, L.C.; REICHARDT, K.; PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; CASTILHOS, D.D. Chemical and biological attributes of a lowland soil affected by land leveling. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 1489-1497, 2013.

PARFITT, J. M. B. **Impacto da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológico em solos de várzea**. 2009. 92 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em solos. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas – Brasil.

PARFITT, J.M.B.; SILVA, C.A.S.; PETRINI, J.A. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES Jr, A.M. (eds.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. 1º ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. p. 23-44.

PAZ-GONZÁLEZ, A.; VIEIRA, S.R.; CASTRO, M.T.T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, v.97, p.272-292, 2000.

PETER, K. D.; D'OLEIRE-OLTMANN, S.; RIES, J. B., MARZOLFF, I.; HSSAINE, A. A. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. **Catena**, 113, 24-40, 2014.

PINTO, L. F. S.; MIGUEL, P.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea e terras baixas. In: Emygdio, M.B; Rosa, A.P.S.A da; Oliveira, A.C.B de. (Ed.) **Cultivo de Soja e Milho em Terras Baixas do Rio Grande do Sul**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 23-43.

PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S., et al. **Caracterização de solos de várzea**. In: GOMES, S.G., PAULETTO, E. A. Manejo do solo e da água em áreas de várzea. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. Cap.1. p.11-36.

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. da. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, v. 38, p.981-988, 2008.

QUEZADA C., SANDOVAL M., HERNÁIZ S., TIZNADO G. Efecto de lanivelacion láser em las propiedades físicas y químicas de um suelo acuichaploxeralfs. **Chilean journal agric. anim. sci.**, (2013) 29(1): 65-72.

SARTORI, G. M. S.; MARCHESAN, E.; DAVID, R. D.; DONATO, G.; COELHO, L. L.; AIRES, N. P.; ARAMBURU, B. B. Sistemas de preparo do solo e de semeadura no rendimento de grãos de soja em área de várzea. **Ciência Rural**, v. 46, p. 492-498, 2016.

SERRANO, J.; SILVA, J. M. D.; SHAHIDIAN, S.; & CARVALHO, M. D. Variabilidade espacial e estabilidade temporal do carbono orgânico do solo num sistema silvo-pastoril Mediterrâneo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, p. 563-573, 2015.

SERRANO, J.; SILVA, J. M. D.; & SHAHIDIAN, S. Avaliação do potencial para aplicação diferenciada de potássio em pastagens permanentes no Alentejo: estudo de caso. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 37, p.69-79, 2014.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S. E MARQUES DA SILVA, J. Small scale soil variation and its effect on pasture yield in Southern Portugal. **Geoderma**, v. 195, p. 173-183, 2013.

SERRANO, J. M.; PEÇA, J. O.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. D. Efeito da topografia na estabilidade temporal dos parâmetros do solo numa pastagem permanente mediterrânica. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, p. 59-68, 2012.

SHARIFI, A.; GORJI, M.; ASADI, H.; POURBABAEI, A. A. Land leveling and changes in soil properties in paddy fields of Guilan province, Iran. **Paddy and water environment**, v. 12, n. 1, p. 139-145, 2014.

SILVEIRA, M.F.; DIAS, A.M.O.; MENEZES, L.F.G.; MARTINELLO, C.; VONZ, D.; CAREGNATTO, N.E. Produção e qualidade da forragem decornichãosobresemeado em diferentes densidades de semeadura em pastagem de estrela africana e azevém. **Bioscience Journal**, v. 31, p. 1801-1808, 2015.

SOUSA, S. S.; MOREIRA, S. G.; DE CASTRO, G. F. Avaliação da fertilidade do solo por Agricultura de Precisão e Convencional. **Revista Agrogeoambiental**, v. 8, p. 33-46, 2016.

SOUZA, G. S.; de SOUZA LIMA, J. S.; de ASSIS SILVA, S. Variabilidade espacial do fósforo, potássio e da necessidade de calagem numa área sob pastagem. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, p. 384-391, 2008.

SOUZA, L., DE SÁ, M., MARTINS, H., ABRANTES, F., SILVA, M., & ARRUDA, N. Produtividade e qualidade de sementes de arroz em resposta a doses de calcário e nitrogênio. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 4, p. 27-35, 2010.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas, RS: SOSBAI, 2007.161p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Itajaí, SC: SOSBAI, 2012.179p.

STRECK, E.V., KÄMPF, N., DALMOLIN, R.S.D., KLAMT, E., NASCIMENTO, P.D., SCHNEIDER, P., GIASSON, E. AND PINTO, L.F.S., **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR.2008.

SKONIESKI, F. R.; VIÉGAS, J.; BERMUDEZ, R. F.; NÖRNBERG, J. L.; ZIECH, M. F.; COSTA, O. A. D.; MEINERZ, G. R.; Composição botânica e estrutural e valor

nutricional de pastagens de azevém consorciadas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 550-556, 2011.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2a ed. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TESFAHUNEGN, G.B., TAMENE, L., VLEK, P.L.G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. **Soil Tillage Research**, v.117, p.124–139, 2011.

VAHL, L. C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. 1991. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.743-755, 2009.

WALKER, T.W.; KINGERY, W.L.; STREET, J.E.; LOX M.S.; OLDHAM, J.L.; GERARD, P.D.; HAN, F.X. Rice yield and soil chemical properties as effected by precision landleveling in alluvial soils. **Agronomy Journal**. 95: 1483-1488. 2003.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L.P.; SMECK, N.E. & HALL, G.F. eds. Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions. Amsterdam, Elsevier Science, 1983. cap.4, p.83-116.

YOSHIDA, S. Growth and development of the rice plant. In: **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños :International Rice ResearchInstitute, p. 1-63, 1981.

Xu, H.W.; Wang, K.; Bailey, J.; Jordan, C.; Withers, A. Temporal Stability of Sward Dry Matter and Nitrogen Yield Patterns in a Temperate Grassland. **Pedosphere**, v.16, p.735-744, 2006.

Anexos

Anexo 1

Modelo teórico de semivariograma individual dos atributos químicos do solo, coeficiente de determinação dos ajustes (R_a^2) e grau de dependência espacial (GDE %)

	Estimador	Modelo	CO	CO+C	A	R_a^2	GDE %
pH água	Gaussiano	Robusto	0.007	0.013	39.2	0.21	53.85
Índice SMP	-	-	-	-	-	-	-
Al (cmol/dm ³)	Gaussiano	Clássico	0.013	0.021	10.32	0.01	61.90
Ca (cmol/dm ³)	Exponencial	Clássico	0.001	0.11	11.58	0.32	0.91
Mg (cmol/dm ³)	Exponencial	Robusto	0.003	0.016	20.64	0.27	18.75
K (mg/dm ³)	Esférico	Robusto	4.97	54.35	16.27	0.03	9.14
M.O (%)	Esférico	Clássico	0.01	0.10	24.03	0.34	10.00
P-Mehlich (mg/dm ³)	Gaussiano	Clássico	21.771	55.643	66.95	0.27	39.13
Na (mg/dm ³)	Esférico	Clássico	10.77	20.32	107.51	0.2	53.00
B (mg/dm ³)	Esférico	Clássico	7.543x ⁻⁰⁶	6.412x ⁻⁰⁵	65.27	0.13	11.76
Cu (mg/dm ³)	Esférico	Robusto	0.01	0.02	51.6	0.13	50.00
Mn (mg/dm ³)	Exponencial	Clássico	5.46	16.11	30.96	0.42	33.89
Zn (mg/dm ³)	Exponencial	Robusto	0.04	0.10	56.00	0.14	40.00
Fe (mg/dm ³)	Exponencial	Clássico	0.06	0.23	27.06	0.36	26.09
CTC efetiva (cmol/dm ³)	Gaussiano	Clássico	0.02	0.16	13.29	0.33	12.5
CTC pH7 (cmol/dm ³)	Exponencial	Clássico	0.28	0.43	17.65	0.04	65.12
H+Al (cmol/dm ³)	-	-	-	-	-	-	-
SAT Base (%)	Gaussiano	Clássico	22.48	33.13	17.14	0.005	67.85
SAT Al (%)	Esférico	Clássico	0.31	16.28	14.4	0.15	1.90

Anexo 2

Modelo teórico de semivariograma individuais da matéria seca do cornichão e a produtividade do arroz e respectivos parâmetros de ajustes, coeficiente de determinação dos ajustes (R_a^2) e grau de dependência espacial (GDE %)

Produtividade							
Atributos	Estimador	Modelo	C₀	C₀+C	A	R_a²	GDE (%)
Mat. Seca Cornichão (t ha ⁻¹)	Gaussiano	Clássico	0.37	0.55	57.22	0.18	67.27
Produtividade (kg ha ⁻¹)	Gaussiano	Clássico	0.71	3.68	126.51	0.37	19.29
Esterilidade	Exponencial	Clássico	9.42	45.15	115.89	0.42	20.86

Anexo 3

Modelos teóricos de semivariogramas para os atributos P e K, produtividade e a adubação de P_2O_5 e K_2O e respectivos parâmetros de ajustes, coeficientes de determinação referentes aos ajustes (R_a^2) e grau de dependência espacial (GDE)

Atributos	Estimador	Modelo	C_0	C_0+C	A	R_a^2	GDE (%)
P-Mehlich (mg/dm³) ¹	Gaussiano	Clássico	4.68	28.46	69.06	0.61	16.44
P-Mehlich (mg/dm³) ²	Gaussiano	Clássico	21.77	55.64	66.95	0.27	39.13
P-Mehlich (mg/dm³) ³	Gaussiano	Clássico	24.54	35.48	25.75	0.11	69.17
P-Mehlich cvi (%)	Gaussiano	Clássico	359.16	1302.67	58.88	0.48	27.57
K (mg/dm³) ¹	Gaussiano	Clássico	21.84	340.68	77.8	0.8	6.41
K (mg/dm³) ²	Esférico	Robusto	4.97	54.35	16.27	0.03	9.14
K (mg/dm³) ³	Gaussiano	Clássico	92.99	124.03	19.27	0.13	74.97
Kcvi (%)	Gaussiano	Clássico	104.14	313.66	57.88	0.44	33.20
Produtividade 14/15	Gaussiano	Clássico	0.71	3.68	126.51	0.37	19.29
Produtividade 15/16	Esférico	Clássico	0.78	3.44	109.37	0.52	22.67
Produtividade cvi (%) (safras 14/15 e 15/16)	Exponencial	Clássico	28.08	91.33	29.91	0.39	30.75
Adubação P_2O_5	Gaussiano	Clássico	0.11	0.26	47.22	0.37	42.31
Adubação K_2O	Esférico	Clássico	0.00	0.02	10.33	0.91	0.00

¹= depois da sistematização (2009); ²= no ano de 2013; ³= no ano de 2015;