

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E  
RESPOSTA DO ARROZ IRRIGADO À ADUBAÇÃO EM SISTEMAS INTEGRADOS  
DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

**Luiz Gustavo de Oliveira Denardin  
(Dissertação de Mestrado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E  
RESPOSTA DO ARROZ IRRIGADO À ADUBAÇÃO EM SISTEMAS  
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**

LUIZ GUSTAVO DE OLIVEIRA DENARDIN  
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Dissertação apresentada como  
um dos requisitos à obtenção do  
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Fevereiro de 2017

### CIP - Catalogação na Publicação

Denardin, Luiz Gustavo de Oliveira  
VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO  
SOLO E RESPOSTA DO ARROZ IRRIGADO À ADUBAÇÃO EM  
SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA / Luiz  
Gustavo de Oliveira Denardin. -- 2017.  
86 f.

Orientador: Ibanor Anghinoni.  
Coorientador: Felipe de Campos Carmona.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa  
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-  
RS, 2017.

1. Integração lavoura-pecuária. 2. arroz irrigado.  
3. terras baixas. 4. intensificação sustentável. 5.  
variabilidade espaço-temporal. I. Anghinoni, Ibanor,  
orient. II. Carmona, Felipe de Campos, coorient.  
III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LUIZ GUSTAVO DE OLIVEIRA DENARDIN

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E  
RESPOSTA DO ARROZ IRRIGADO À ADUBAÇÃO EM SISTEMAS  
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em  
Ciência do Solo.

Aprovada em 17 de fevereiro de 2017  
Homologada em 07 de maio de 2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Tales Tiecher  
UFRGS

Dr. Danilo Menezes Sant'Anna  
EMBRAPA – Pecuária Sul

Dra. Amanda Posselt Martins  
UFRGS

Orientador – Prof. Ibanor Anghinoni  
UFRGS

***“A grandeza não consiste  
em receber honras, mas em merecê-las”***  
(Aristóteles)

*Aos meus pais, **Vera e Luiz Artur**,  
que me ensinaram os verdadeiros valores da vida,  
e sempre estiveram presentes me apoiando em todas as etapas  
dessa caminhada, dedico este trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar todas as dificuldades.

A minha mãe (Vera), heroína e sem dúvida a pessoa mais importante na minha vida; ao meu pai (Luiz) e irmãos (Alessandra e Rafael), pela formação, carinho e apoio incondicional em todas minhas decisões.

À UFRGS e à Faculdade de Agronomia, por proporcionar um ensino de qualidade e excelência; e ao PPGCS, pela oportunidade em realizar esse estudo.

Ao professor Ibanor Anghinoni, pela orientação durante o período de graduação e pós-graduação, sendo sem dúvida o principal responsável pelo estímulo à minha continuação na carreira acadêmica.

Ao meu co-orientador, Felipe Carmona, por todas as oportunidades e auxílio na condução dos estudos desenvolvidos, além da amizade durante esses anos.

À Amanda Martins, minha “segunda orientadora”, que, além de amiga/irmã, foi sem dúvida uma das pessoas mais importantes para mim durante o mestrado.

Ao Marcelo Schmidt e ao Dionata Filippi, meus irmãos de coração, pela amizade mais pura e verdadeira e pelos ensinamentos, principalmente em “dar valor às coisas mais simples da vida”.

Aos amigos Ana Luísa, Gabriel Garcia, Israel Machado, Murilo Veloso, Tales Tiecher, Tiago Stumpf e Vitor Ambrosini, pela amizade, parceria e apoio das diferentes formas em todos os momentos.

A todos os colegas do PPGCS e do Laboratório de Química e Fertilidade do Solo, principalmente ao Adãozinho, Artur, Diego, Arnuti, Jean, Bernardo Leonardo, Murilo e Walker.

A SIA, por todo aprendizado e oportunidade de trabalho em conjunto.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro dos estudos.

**A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado!**

# VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E RESPOSTA DO ARROZ À ADUBAÇÃO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA<sup>1</sup>

Autor: Eng<sup>o</sup>. Agr<sup>o</sup>. Luiz Gustavo de Oliveira Denardin  
Orientador: Prof. Ph.D. Ibanor Anghinoni  
Co-orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Carmona

## RESUMO

Sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) propõem diversificação pela rotação de cultivos de grãos e pastagens. Como resultado, esses sistemas promovem maior variabilidade de atributos do solo, propiciando menor dependência de uso de insumos, como fertilizantes, pela maior eficiência de uso de nutrientes (eco-eficiência). Dessa forma, os SIPA aparecem como alternativa para garantir eco-eficiência nas terras baixas arrozeiras, as quais, com o sistema tradicional de monocultivo, não demonstram se sustentar no tempo. O objetivo deste estudo foi, no ambiente das terras baixas: i) avaliar o impacto de diferentes SIPA na variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo e, ii) verificar a resposta do arroz irrigado à adubação em dois sistemas de produção, denominados de “convencional” (arroz-pousio, com preparo do solo) e “integrado” (SIPA) (arroz-azevém pastejado, em semeadura direta). O estudo foi realizado na fazenda Corticeiras, em um Planossolo Háplico, no município de Cristal/RS. Os atributos químicos de solo avaliados em relação à variabilidade espacial e temporal foram o pH e os teores de matéria orgânica (MO) e alumínio trocável (Al), com coleta de 90 amostras georreferenciadas, nos anos de 2013 e 2015. Para a mensuração da resposta à adubação, os níveis de fertilizantes adicionados variaram, em função da análise do solo, e corresponderam às expectativas de resposta do arroz irrigado (em kg ha<sup>-1</sup> de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O): (i) testemunha, sem adubação; (ii) baixa (60-20-20); (iii) média (90-30-35); (iv) alta (120-40-50) e (v) muito alta (150-50-65). A variabilidade espacial do solo aumentou conforme mais diversificado o sistema, para os atributos pH e MO, demonstrando que os SIPA tendem a ser mais complexos e heterogêneos. Sistemas com maior frequência temporal do componente animal em pastejo apresentaram diminuição do pH, além de aumentos no teor de MO ao longo do tempo. A resposta do arroz à adubação no SIPA foi menor, em relação ao sistema convencional, apresentando maiores produtividades com menor fornecimento de nutrientes. Os resultados obtidos demonstram que os SIPA garantem aumento da eco-eficiência do sistema de produção de arroz irrigado nos subtrópicos, indo em direção à intensificação sustentável das terras baixas.

<sup>1</sup> Dissertação de mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (86 p.). Fevereiro de 2017. Trabalho financiado com o apoio financeiro do CNPq e da CAPES.

# SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES AND RICE RESPONSE OF FERTILIZATION IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS<sup>1</sup>

Author: Luiz Gustavo de Oliveira Denardin

Adviser: Ibanor Anghinoni

Co-adviser: Felipe de Campos Carmona

## ABSTRACT

Integrated crop-livestock systems (ICLS) propose diversification by the rotation of cash crops and grazed pastures. As a result, these systems promote greater variability of soil attributes, providing less dependence on the use of inputs, such as fertilizers by the greater efficiency of nutrient use (eco-efficiency). Therefore, ICLS appear as alternative to ensure eco-efficiency in rice lowlands, which, with the traditional system of monoculture, do not show support in time. The objective of this study was, in the lowland environment: i) to evaluate the impact of different ICLS on the spatial and temporal variability of soil chemical attributes and, ii) to verify the response of irrigated rice to fertilization in two production systems, known as "conventional" (rice-fallow, with soil tillage) and "integrated" (ICLS)(winter grazing, under zero tillage). The study was carried out at the Corticeiras farm, in a Planossolo Háplico, in the Cristal/RS County. Soil chemical attributes evaluated in relation to spatial and temporal variability were pH and organic matter (OM) and exchangeable aluminum (Al), with the collection of 90 georeferenced samples in the years 2013 and 2015. In order to measure the response to fertilization, the levels of fertilizer added varied according to the soil analysis, and corresponded to the expected response to fertilization of irrigated rice (in kg ha<sup>-1</sup> of N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O): (i) No-fertilizer application; (ii) Low (60-20-20); (iii) Medium (90-30-35); (iv) High (120-40-50) and (v) Very high (150-50-65). The spatial variability of the soil increased as the system diversified, for the attributes pH and MO, demonstrating that the ICLS tend to be more complex and heterogeneous. Systems with higher frequency of the animal presented decrease in pH, in addition to increases in OM content over time. The response of rice to fertilization in ICLS was lower than the conventional system, presenting higher yields with lower nutrient supply. The results show that the ICLS ensure an increase in the eco-efficiency of the irrigated rice production system in the subtropics, towards the sustainable intensification of the lowlands.

---

<sup>1</sup> M.Sc. Dissertation in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (86 p.). February, 2017. Research supported by CNPq and CAPES.



## SUMÁRIO

	Pág.
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1. Produção de arroz irrigado no Brasil e Rio Grande do Sul .....	4
2.1.1. Impacto dos sistemas tradicionais de cultivo no solo .....	6
2.1.2. Sistemas conservacionistas .....	8
2.2. O solo no contexto das terras baixas.....	10
2.3. Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas .....	122
2.3.1. Adoção da semeadura direta.....	133
2.3.2. Inserção do animal no sistema .....	145
2.3.3. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo .....	166
2.4. Uso de insumos e eficiência de aproveitamento de nutrientes.....	188
<b>3. CAPÍTULO II - MATERIAL E MÉTODOS GERAL.....</b>	<b>22</b>
3.1. Localização geográfica, clima, solo e histórico da área experimental....	22
3.2. Tratamentos, delineamento e condução do experimento .....	23
<b>4. CAPÍTULO III – ESTUDO 1: VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS EM SEMEADURA DIRETA.....</b>	<b>28</b>
4.1 Introdução.....	28
4.2 Material e Métodos .....	30
4.2.1 Amostragem e análises químicas do solo .....	30
4.2.2 Análises estatísticas .....	31
4.3 Resultados.....	31
4.4 Discussão .....	378
4.5 Conclusões .....	402
<b>5. CAPÍTULO IV – ESTUDO 2: ZERO TILLAGE AND WINTER GRAZING CONTRIBUTE TO DECREASE FERTILIZER REQUIREMENT OF IRRIGATED RICE.....</b>	<b>423</b>
5.1 Introduction .....	423
5.2 Material and Methods .....	445
5.2.1 Treatments and experimental design.....	456
5.2.2 Plant analyses .....	467
5.2.3 Statistical analysis .....	478
5.3 Results.....	479
5.3.1 Nutritional status and nutrient accumulation .....	479
5.3.2. Shoot dry matter and grain yield .....	491
5.3.3 Nutrient use efficiency .....	524
5.4 Discussion .....	535
5.5 Conclusions .....	557
<b>6. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>568</b>

<b>7. PERSPECTIVAS FUTURAS DE PESQUISA .....</b>	<b>579</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>60</b>
<b>9. RESUMO BIOGRÁFICO.....</b>	<b>586</b>

## RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Disposição dos sistemas (S1, S2, S3, S4 e S5) em três blocos (B1, B2 e B3), identificação da estrada de acesso e da taipa, no protocolo experimental SIPA terras baixas, Cristal/RS. .... 23
- Figura 2.** Atributos químicos do solo (Matéria orgânica, pH e Al trocável), dispostos em mapas por interpolação de dados por krigagem, no ano de 2013 e 2015 na unidade experimental. .... 32
- Figure 3.** Flag leaf nitrogen (A), phosphorus (B) and potassium (C) contents affected by fertilization levels in the third growing season of different irrigated rice production systems..... 48
- Figure 4.** Irrigated rice shoot dry matter affected by fertilization levels in the third growing season (2014/2015) of different production systems. .... 50
- Figure 5.** Irrigated rice grain yield affected by fertilization levels in the third growing season (2015/2016) of different production systems.. .... 51

## RELAÇÃO DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Disponibilidade de nutrientes no solo em função da remoção de N, P e K para produção de 1 tonelada de grãos (em kg por t de grãos produzidas).	20
<b>Tabela 2.</b> Detalhamento das adubações realizadas nos diferentes SIPA nos anos de 2013 a 2015.....	27
<b>Tabela 3.</b> Estatística descritiva com média, valores mínimo e máximo, erro padrão, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e n amostral dos diferentes sistemas no ano de 2013 e 2015 para os atributos pH, Matéria orgânica (MO) e Alumínio trocável (Al). .....	34
<b>Tabela 4.</b> Evolução dos valores de pH, Matéria orgânica (MO) e Al trocável ao longo dos anos de 2013 a 2015, nos diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. ....	36
<b>Table 5.</b> Soil chemical attributes (0-20 cm layer) in different irrigated rice production systems after 30 months of its adoption, immediately before the addition of different fertilization levels for the irrigated rice of 2015/2016 growing season in Brazilian subtropics. ....	45
<b>Table 6.</b> Nitrogen, phosphorus and potassium accumulation in shoot dry matter of irrigated rice affected by fertilization levels in the third growing season (2015/16) of different production systems. ....	49
<b>Table 7.</b> Nitrogen, phosphorus and potassium accumulated in shoot per ton of grain as affected by fertilization levels on different rice production systems. ...	52

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor de arroz das Américas e apresenta a nona maior produção do mundo, sendo geradas aproximadamente 12 milhões de toneladas ao ano (FAOSTAT, 2013). Dentro do país, destaca-se o Estado do Rio Grande do Sul (RS), onde anualmente são cultivados entre 1,0 e 1,2 milhão de hectares desse cereal, irrigado por inundação, com produção anual superior a 8 milhões de toneladas (CONAB, 2016).

Nos últimos anos, houve um expressivo aumento da produtividade do arroz no RS, passando de uma produtividade média de 5,5 Mg ha<sup>-1</sup> na safra 2001/2002 para 7,6 Mg ha<sup>-1</sup> na safra 2010/2011. Esses avanços foram possibilitados pela adoção de práticas de manejo integrado (Menezes et al., 2012; SOSBAI, 2016) e pelo surgimento da tecnologia Clearfield® (CL), proporcionando um controle mais efetivo de plantas daninhas como o arroz vermelho (Sudianto et al., 2013). Isso trouxe como uma das consequências, um aumento no cultivo sucessivo do arroz (monocultivo) na mesma área (Menezes et al., 2012; SOSBAI, 2016).

No entanto, o uso excessivo e descontrolado da tecnologia CL, combinado ao fluxo natural de genes entre plantas mutantes e não mutantes, resultou no surgimento precoce de plantas resistentes (Villa et al., 2006; Sudianto et al., 2013). Além disso, o sistema de produção predominantemente utilizado se baseia no intenso e frequente revolvimento do solo, onde há efeitos na mudança da dinâmica dos fluxos de carbono (Kukal et al., 2016), sendo ainda potencializados quando somados ao monocultivo do arroz nesses ambientes (Ono et al., 2015). Sistemas tradicionais como esses têm sido avaliados em diversos continentes, e os estudos têm evidenciado perdas na qualidade do solo, envolvendo tanto atributos químicos (El-Shahway et al.,

2016), quanto físicos (Tran Ba et al., 2016) e biológicos (Martins et al., 2017). Assim, o sistema de produção de arroz baseado no monocultivo intensivo do solo está provando ser insustentável, especialmente do ponto de vista ambiental.

Levando-se em consideração os sistemas puramente agrícolas, sabe-se que os mesmos exigem grandes quantidades de insumos (fertilizantes e biocidas) para a obtenção de altas produtividades, criando um conflito entre os modelos de produção de alimentos e a sustentabilidade e a segurança alimentar (FAO, 2012). Nesse contexto, são necessárias práticas de manejo conservacionista do solo, garantindo maior sustentabilidade econômica e ambiental das terras baixas do subtrópico brasileiro. Como possíveis alternativas ao sistema de cultivo utilizado atualmente nos solos arroseiros, tem-se os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA), os quais propõem a rotação entre o cultivo de grãos e pastagens, sob os preceitos do mínimo revolvimento do solo (semeadura direta), da rotação de culturas e da inserção do animal no sistema. Embora o conhecimento científico sobre essas práticas sejam conhecidas e difundidas para as terras altas, em ambientes de terras baixas ainda há um conhecimento bastante limitado.

A adoção de SIPA apresenta diversas vantagens, dentre elas, a manutenção e melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, a maior eficiência do uso dos recursos naturais e o controle da poluição (Moraes et al., 2014). O componente animal atua como catalisador no sistema, modificando e acelerando o fluxo dos nutrientes pela ingestão da biomassa. Cerca de 70-95% dos nutrientes da planta ingeridos retornam para o solo através da deposição da excreta dos animais (Russelle, 1997). A deposição de dejetos (fezes e urina) pelos animais em pastejo exerce uma forte influência na concentração de nutrientes e nas comunidades microbianas, tendo como resultado a melhoria na disponibilidade de N e na decomposição da MO (McNaughton, 1992). Essas alternativas podem resultar em maior qualidade do solo, a partir da mais eficiente regulação dos ciclos biogeoquímicos, contribuindo para um maior equilíbrio entre insumos e produtos utilizados (Hendrickson et al., 2008; Ryschawy et al., 2012; Lemaire et al., 2014; Lal, 2015).

Além de o animal modificar o fluxo de nutrientes no sistema pela distribuição de dejetos, de forma desuniforme e inconstante no ambiente (Augustine & Frank, 2001; McNaughton, 1985; Chávez et al., 2011) ainda provoca alteração dos padrões de vegetação influenciados pelo pastejo (Olofsson, 2008; Laca, 2009). A produção de forragem sofre alteração pelo pastejo, com um crescimento contínuo e, conseqüentemente, as plantas acabam prolongando sua demanda por nutrientes, podendo assim, contribuir com a mitigação das suas perdas (lixiviação ou escoamento superficial) (Moraes et al., 2014). Por conseguinte, o pastejo tende a potencializar a disponibilidade de nutrientes no solo, pelo aumento e melhoria da qualidade da biomassa das plantas (Bardgett et al., 1998), pelo efeito sobre a imobilização microbiana e por alterar o fluxo de carbono das plantas em direção ao solo (Stark & Grellmann, 2002).

Além de promover mudanças no aporte de resíduos, o animal também modifica a dinâmica dos nutrientes, com uma oferta constante de elementos essenciais através de diferentes fontes em decomposição (resíduos orgânicos e dejetos animais) (Larcher, 2000) – redistribuindo, separando e ao mesmo tempo concentrando o retorno dos nutrientes ao solo (Auerwald et al., 2010). Essas mudanças podem acabar modificando a variabilidade espaço-temporal de atributos químicos do solo, aumentando o grau de complexidade do sistema com o aumento de sua diversidade nos componentes agrícola e animal. Tendo em vista as mudanças que diferentes sistemas de produção agropecuária podem causar no solo, este estudo objetivou avaliar a variabilidade espaço-temporal de atributos do solo, e a resposta do arroz irrigado sob diferentes níveis de adubação.

## **2. CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Produção de arroz irrigado no Brasil e Rio Grande do Sul**

O arroz (*Oryza sativa* L.), segundo diversos historiadores e cientistas, teve como local de origem a região do sudeste asiático. O Brasil foi o primeiro país do continente americano a cultivar esse cereal. Os registros datam que, em 1587, já se tinham instaladas lavouras de arroz na Bahia, chegando, por volta de 1745, aos solos do Maranhão. Assim, a prática da orizicultura no Brasil teve início em meados do século XVIII, e daquela época até a metade do século XIX o país foi um grande exportador de arroz (CONAB, 2015). Quanto ao RS, atualmente o Estado que mais produz arroz (68% da produção nacional), o início dos cultivos se deu em 1904, no município de Pelotas, com o surgimento da primeira lavoura empresarial de arroz irrigado (CONAB, 2015).

O arroz é produzido em diversos sistemas de cultivo. Tem-se o cultivo de arroz irrigado e o cultivo de sequeiro, este também chamado de “cultivo em terras altas”, o qual é totalmente dependente da precipitação pluvial (Santos et al. 2006). Em geral, o sistema de cultivo de sequeiro proporciona uma baixa produtividade de grãos. Esse fato se deve principalmente à inexistência de cultivares com alta produtividade adaptadas às regiões produtoras, associado ao baixo nível tecnológico e pouca utilização de insumos. Assim, a falta de cultivares com características desejáveis se torna uma restrição ao aumento da produção de arroz de sequeiro no país. A sua maior contribuição é explorada na abertura de novas áreas, onde o arroz é cultivado anteriormente à soja, gerando um incremento de 250 a 500 kg ha<sup>-1</sup> de



soja, possivelmente pela atuação da palhada deixada no cultivo do cereal (CONAB, 2015).

No Estado do RS, entretanto, a produção de arroz é advinda totalmente de cultivos irrigados por inundação. A partir do final da década de 1960, devido ao desenvolvimento tecnológico da mecanização e ao lançamento de novas variedades e novas práticas agronômicas, se iniciaram os avanços na produção arrozeira, com forte atuação do IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz). Como resultado, a produtividade foi elevada para 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> na década de 1970, passando a 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> na década de 1980. O ano de 1981 foi marcado pelo surgimento de cultivares modernas, como a BR-IRGA 409 e BR-IRGA 410, tornando possível a estabilidade produtiva durante vários anos (SOSBAI, 2015).

A partir do início da década de 1990 ocorreram importantes mudanças no manejo do sistema produtivo. A utilização das entaipadoras de base larga, acompanhadas do surgimento de semeadoras articuladas, foi decisiva para garantia de avanços no sistema, permitindo a realização da semeadura do arroz sobre taipas. Isso proporcionou, além de ganhos de área utilizada, menores perdas em sementes e fertilizantes, propiciando condições para se dobrar a produtividade rapidamente. Esses eventos deram subsídio para a mudança do sistema de cultivo, passando de um sistema convencional para um sistema de “cultivo mínimo”, permitindo o preparo do solo com antecedência e facilitando a semeadura no período ideal, com um melhor aproveitamento de mão de obra e maquinários (Gomes & Magalhães Jr, 2004; Menezes et al., 2012).

Na safra 2001/2002, a partir de um trabalho conjunto de extensão e pesquisa do IRGA com produtores de arroz, surgiu o Projeto 10. Este projeto consistia em estratégias de manejo para o aumento da produtividade, competitividade e sustentabilidade da lavoura de arroz no RS (Menezes et al., 2012). O projeto proporcionou um expressivo aumento da produtividade e tinha como prioridades: adequação de época de semeadura, melhoria do estado de nutrição das plantas, manejo eficiente da água de irrigação, melhor controle de ervas daninhas, escolha correta de cultivares, uso de sementes de qualidade, maior eficiência no manejo de pragas, doenças e fertilidade do solo (Menezes et al., 2012). A interação desse conjunto de diferentes práticas agronômicas

oportunizou a obtenção de altas produtividades, com a média gaúcha de produtividade alcançando atualmente  $7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (IRGA, 2016).

Embora se tenha alcançado altos patamares de produtividade, a sustentabilidade da lavoura arrozeira no RS ainda deixa a desejar. Segundo Schoenfeld et al. (2012), mesmo com a fertilidade química do solo corrigida e o fornecimento recomendado de nutrientes para uma alta expectativa de resposta da cultura, os sistemas tradicionais de cultivo do RS geram um balanço negativo de nutrientes do solo. Isso demonstra que tais sistemas não contam com uma retroalimentação e não se sustentam ao longo do tempo, acarretando em perdas excessivas de nutrientes, além da diminuição da fertilidade do solo e da contaminação de corpos hídricos.

### 2.1.1. Impacto dos sistemas tradicionais de cultivo no solo

Os sistemas tradicionais de cultivo do arroz no RS sempre tiveram como princípio o preparo do solo. Independentemente do sistema de cultivo (convencional, mínimo ou pré-germinado), sempre se preconizou o frequente e intenso revolvimento do solo, em busca de se cultivar o arroz em uma área com maior homogeneidade possível. O cultivo mínimo, caracterizado pela redução de práticas mobilizadoras do solo, é atualmente o sistema mais utilizado (60% da área cultivada) (SOSBAI, 2016). Ele recebe destaque pela realização do preparo antecipado do solo, viabilizando a semeadura na época preferencial de cultivo. No entanto, mesmo nesse sistema, ainda há o revolvimento do solo após a colheita, com finalidade de incorporar a palha e deixar o solo com maior homogeneidade física (SOSBAI, 2016). Os demais sistemas de cultivo, convencional e pré-germinado, que apresentam maior dano ao solo pelas recorrentes atividades de mobilização ocorrem em menor frequência: 30 e 10% da área, respectivamente (SOSBAI, 2016).

O preparo do solo, realizado nesses e em quaisquer outros sistemas com mobilização de solo, acarreta no rompimento de macroagregados, permitindo haver maior oxidação do carbono (Six, 1999; Six, 2000). Em decorrência disso, o revolvimento tem sido a principal causa dos aumentos nos níveis de degradação do solo (Lal, 2015). Estudos como os de Cassman et al. (1995) e Flinn & De Datta, (1984) têm demonstrado maior degradação do solo

por meio da diminuição do pH, CTC e menor eficiência do uso de nutrientes, bem como perdas em produtividade na cultura em experimentos de longo prazo submetidos a sistemas convencionais de cultivo intensivo de arroz irrigado. Além disso, essas condições levam à redução dos níveis de fertilidade, deteriorando propriedades químicas e físicas e conseqüentemente levando a um declínio da produtividade, causando preocupações referentes à sustentabilidade do sistema (Bhushan et al., 2007; Cheng et al., 2007; Joshi et al., 2007). Nesse âmbito, a incorporação da palha do arroz, uma prática realizada em praticamente todos os sistemas de cultivo (com exceção da semeadura direta), favorece a aceleração da decomposição dos resíduos e, conseqüentemente, impede aumentos significativos nos teores de MO do solo (Sá et al., 2013). Embora a expressiva quantidade residual de matéria seca de arroz apresente bom potencial de humificação, o revolvimento do solo afeta diretamente a taxa anual de perda do carbono orgânico do solo ( $K_2$ ), aumentando a decomposição da MO (Bayer et al., 2006a). Nesse sentido, se idealiza, além do alto aporte de resíduos, práticas que adotem como base a semeadura direta, pelo simples fato desse sistema apresentar menores perdas quando comparado aos sistemas convencionais de cultivo com mobilização do solo. Essa importância ganha ainda mais destaque na conservação de solos arenosos, onde há menor quantidade de argila, a qual atua diretamente na proteção física da matéria orgânica (MO) através das interações organo-minerais (Bayer et al., 2006a; Sá et al., 2013). Assim, quantificando os solos mais ocorrentes nos ambientes de terras baixas (Planossolos, Gleissolos e Plintossolos) (Pinto et al., 2004), todos possuem como característica uma natural predominância de textura franco-arenosa no horizonte superficial (Streck et al. 2008), enfatizando a importância da adoção de sistemas conservacionistas.

Quanto ao acúmulo de MO, os ambientes alagados possuem certo favorecimento, pelo alto aporte de resíduos pelas culturas (principalmente do arroz), aliado às baixas taxas de decomposição da MO (Sahrawat, 2012). Nesses ambientes, a decomposição ocorre na ausência de oxigênio, dependendo de fontes alternativas de receptores de elétrons, como formas oxidadas de nitrato, manganês, ferro e enxofre, resultando na oxidação parcial do carbono (Ponnamperuma et al., 1966; Li et al., 2012). Entretanto,

considerando levantamento realizado por Boeni et al. (2010), em todas as regiões arrozeiras do RS verifica-se predominância (71%) de solos com teor baixo de MO ( $\leq 2,5\%$ ). Além disso, esse levantamento comprova a predominância da textura arenosa nos solos das terras baixas do RS. A Zona Sul e as Planícies Costeiras Externa e Interna apresentam a maior frequência (96, 94 e 92%, respectivamente) de solos com  $< 25\%$  de argila (Boeni et al., 2010). Dessa forma, os baixos teores de MO nesses solos promove efeitos prejudiciais no desempenho produtivo do arroz. Isso ocorre, principalmente, em consequência da baixa atividade microbiológica do solo, capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de nutrientes (Beutler et al., 2014). Em contraponto, a semeadura direta representa um sistema alternativo na produção arrozeira devido aos seus benefícios potenciais, sendo o principal deles a conservação do solo (Joshi et al., 2007), além de garantir sustentabilidade e obtenção de aumentos no conteúdo de MO do solo (Sahrawat, 2005; Sahrawat, 2012; Beutler et al., 2014).

### 2.1.2. Sistemas conservacionistas

A adoção de sistemas conservacionistas, como a semeadura direta (ausência de preparo do solo e revolvimento apenas no sulco de semeadura) no mundo tem apresentado um constante crescimento. No ano de 1999, a adoção da semeadura direta já alcançava a marca de 45 milhões de hectares, passando para 72 milhões de hectares em 2003 e atingindo, no ano de 2009, 105 milhões de hectares (Derpsch & Friedrich, 2009). No Brasil, essa tendência não foi diferente. A área cultivada com essa prática teve um grande aumento em um curto período, passando de uma área de 3 milhões de hectares na safra de 1993/1994, para 21,8 milhões de hectares apenas dez anos após (safra 2003/2004). Segundo dados da FEBRAPDP (2016), na safra 2012/2013 a área total utilizada em semeadura direta no Brasil atingiu aproximadamente 32 milhões de hectares, que corresponde a cerca de 45% da área agricultável do país. Embora seja uma prática amplamente utilizada e recomendada para as terras altas de ambientes tropicais e subtropicais, nas terras baixas – sobretudo em áreas arrozeiras –, a semeadura direta ainda não é utilizada em seu conceito pleno. Considerando as terras baixas arrozeiras em todo o mundo, a

adoção desse sistema ocupa somente 15% da área (aproximadamente 16 milhões de hectares), sendo que mais de 90% dessa área está situada na Ásia (Xiau et al., 2005).

Conforme abordado anteriormente (item 2.1.1), nas terras baixas do subtropical brasileiro, praticamente todo o cultivo do arroz é realizado sob um sistema embasado em práticas não conservacionistas, com revolvimento de solo e cultivos contínuos na mesma área (SOSBAI, 2016). Em contraponto, além da ausência de revolvimento, a rotação de culturas constitui uma importante alternativa técnica para obtenção de maior sustentabilidade em ambientes de terras baixas do RS. Nos últimos anos, a soja surgiu como principal alternativa de cultura de grãos para rotação em sistemas arroseiros, principalmente pelo momento de valorização econômica da oleaginosa. Além disso, o seu cultivo é uma ferramenta importante para auxiliar na rotação de princípios ativos de herbicidas, auxiliando no controle do arroz vermelho, principal planta invasora do cultivo do arroz irrigado no RS (Vedelago et al., 2012; Thomas & Lange, 2014). Além da soja, o milho e as pastagens para produção animal também se destacam como alternativas de rotações (CONAB, 2015). Apesar do aumento da diversificação, a presença de sistemas conservacionistas em terras baixas ainda é muito pequena. O principal motivo da não adoção se deve às características intrínsecas encontradas nesses ambientes, como a maior susceptibilidade à saturação por água, ou alagamentos periódicos, apresentando restrição ao cultivo de plantas de sequeiro (Floss, 2008). Aliado a isso, o sistema de cultivo predominante do arroz irrigado no RS, por sistematização em desnível, conta com a necessidade de construção de taipas, a fim de manter uma altura de lâmina de água ideal sobre o solo (SOSBAI, 2016). Embora tenha havido um crescimento considerável das áreas com sistematização em nível, as quais dispensam a necessidade de construção de taipas, essas áreas representam apenas 13% da área total produtora de arroz do RS (Farsul, 2016). Assim, esse manejo inviabiliza a adoção de um sistema com total ausência de mobilização do solo, fazendo com que o conceito de semeadura direta passe a ter um significado diferente para os ambientes de terras baixas, admitindo-se sempre um mínimo revolvimento do solo.

## 2.2. O solo no contexto das terras baixas

As áreas de várzea no RS ocupam o equivalente a 6,4 milhões de hectares, representando 23% do território estadual (Chaves et al., 2014). Entre as classes de solos mais ocorrentes nesses ambientes, cerca de 55% dos solos são Planossolos, 8% são Plintossolos e 7% são Gleissolos (Pinto et al., 2004). Essas classes ocorrem em relevo plano a suave ondulado e apresentam características comuns de hidromorfismo, geradas tanto pela posição topográfica quanto pela presença de um horizonte subsuperficial adensado e hidromórfico, oriundo da iluviação de argila (Streck et al., 2005). Dessa forma, esses solos, posicionados em cotas mais baixas na paisagem, ficam sujeitos à saturação por água ou a alagamentos periódicos. Isso faz com que o seu comportamento seja completamente distinto do observado em ambientes bem drenados, onde essa situação altera o equilíbrio natural dos elementos, desencadeando uma série de transformações nas características físicas, biológicas, eletroquímicas e químicas do solo (Sousa et al., 2015).

As modificações físicas do solo são as principais responsáveis pela alteração das demais propriedades do solo nessas condições. Em situação de alagamento, a água substitui o ar contido nos espaços porosos do solo (Sousa et al., 2015). A diminuição do potencial redox, o aumento da condutividade elétrica e dos valores de pH são as principais alterações eletroquímicas ocorrentes após o alagamento (Camargo et al., 1999). Destes, o mais importante do ponto de vista agrônômico é o pH. O alagamento aumenta o pH do meio, estabilizando próximo à neutralidade (6,5 – 7,0). Esse aumento está associado à redução do solo e apresenta benefícios relacionados à nutrição do arroz devido ao favorecimento da liberação de N e P, suprimentos adequados de Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn e Zn, e estabilização abaixo dos teores tóxicos da concentração de elementos potencialmente tóxicos, como o Al, Fe, Mn, CO<sub>2</sub>, ácidos orgânicos e H<sub>2</sub>S (Sousa et al., 2015).

A respiração microbiana proporciona depleção dos níveis de oxigênio e o aumento de CO<sub>2</sub> em anaerobiose. A necessidade de energia para realização dos processos biológicos dos microrganismos aeróbios faz com que o oxigênio livre desapareça rapidamente (Camargo et al., 1999). Na ausência de oxigênio, os microrganismos anaeróbios facultativos e obrigatórios acabam

usando fontes alternativas de eletroceptores na sua respiração, obedecendo a uma ordem de preferência, segundo maior afinidade em receber elétrons, na qual segue: nitrato, óxidos de manganês, óxidos de ferro, sulfato (Barlett e James, 1993). Dessa forma, a presença de aerênquima em plantas de arroz, criando um ambiente oxidado ao redor das raízes, não só garante a sobrevivência da planta em um ambiente saturado como também a protege de elementos tóxicos, como o  $\text{Fe}^{+2}$ , produzidos pela redução desses compostos (Luxmoore et al., 1970).

Além dos receptores inorgânicos, os microrganismos podem utilizar receptores de origem orgânica, caracterizando um processo conhecido como fermentação. Na fermentação, compostos orgânicos complexos são transformados em substâncias mais simples, sendo os mais comuns os ácidos alifáticos de cadeia curta (fórmico, acético, propiônico e butírico) (Stevenson, 1967), os quais têm sido detectados em solos do RS utilizados para o cultivo do arroz irrigado sob semeadura direta (Bohnen et al., 2005). Nesse estudo se encontrou maiores quantidades de ácidos orgânicos no cultivo do arroz irrigado em semeadura direta quando comparado com aos sistemas convencional e pré-germinado. No entanto, esses valores se mantiveram apenas superiores nesse sistema até um período de 10 dias. Após isso, as quantidades de ácido acético, propiônico e butírico se tornaram semelhantes entre os três sistemas (Bohnen et al., 2005). Em solos com altos teores de MO ou em situações de fornecimentos contínuos e em grandes quantidades de resíduo ao solo, a concentração desses ácidos pode atingir níveis tóxicos, prejudicando a cultura do arroz. Os principais prejuízos se devem ao comprometimento das funções fisiológicas, responsáveis pela produção de energia, além da diminuição da divisão celular e do crescimento radicular, comprometendo a absorção de nutrientes (Sousa et al., 2015).

Avaliando-se o efeito da adoção do manejo do solo sob semeadura direta no cultivo do arroz irrigado, não se verificou efeitos prejudiciais em produtividade (Beutler et al., 2012; 2014). Mesmo havendo possível tendência de diminuição da produtividade do arroz conforme maiores quantidades de resíduos sobre a superfície antecedendo o seu cultivo, com quantidades de palha residual de até  $11 \text{ Mg ha}^{-1}$  não se evidenciou diferença nos componentes de rendimento e na produtividade do arroz irrigado por inundação em

semeadura direta (Beutler et al., 2014). A partir disso, os autores concluem que quantidades superiores a 24 Mg ha<sup>-1</sup> de palha na superfície do solo não reduzem a produtividade do arroz em semeadura direta (Beutler et al., 2012; Beutler et al., 2014). Isso ocorre devido ao fato de que, em condições de campo, o fluxo superficial de água dilui os efeitos prejudiciais dos ácidos orgânicos que poderiam causar redução da produtividade nos grãos (Swarowsky et al., 2006). Por outro lado, em experimentos de vaso com o manejo da palha moída e incorporada ao solo antes da semeadura, se verificaram reduções de 07 e 46% na produtividade com quantidades de palha de 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Camargo et al. 2001). Embora represente reduções expressivas, essas quantidades de palha são bem acima das comumente encontradas a campo e as condições de vaso não simulam a situação do campo.

### **2.3. Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas**

Os SIPA, também conhecidos como Integração Lavoura-Pecuária (ILP) (Carvalho et al., 2014), propõem basicamente a diversificação dos sistemas agrícolas, explorando os benefícios alcançados pela rotação de cultivos de grãos e pastagens (Moraes et al., 2014). A filosofia envolvida nesses sistemas tem como base a geração de sinergismos e propriedades emergentes, frutos de interações nos compartimentos solo-planta-animal-atmosfera de áreas que integram atividades de produção agrícola e pecuária continuadas no tempo (Anghinoni et al., 2013). Tendo como base a diversificação vegetal e de seres heterotróficos (herbívoros e decompositores), esses sistemas buscam mimetizar os processos e funções dos ecossistemas naturais. Com o planejamento das rotações no espaço e no tempo e a escolha dos componentes vegetal e animal é possível chegar mais próximo de sistemas mais resilientes, garantindo maior sustentabilidade ao sistema (Moraes et al., 2014).

A utilização desses sistemas, além de não acarretar prejuízos ao produtor, com adequado manejo da carga animal (Moraes et al., 2014; Martins et al., 2015), promove diversos benefícios, principalmente no âmbito econômico



e produtivo (Oliveira et al., 2014), mas também na melhoria de atributos químicos (Flores et al., 2008; Martins et al., 2014), físicos (Conte et al., 2008; Moreira et al., 2012; Cecagno et al., 2016) e biológicos do solo (Souza et al., 2010; Chávez et al., 2011; Silva et al., 2011; Martins et al., 2017).

Considerando-se as terras altas do RS, os SIPA já são bastante estudados e difundidos em diversos arranjos. No entanto, em se tratando das terras baixas do subtropical brasileiro, onde as áreas agricultáveis apresentam maior aptidão ao cultivo de arroz irrigado, pela abundância de recursos hídricos e solos favoráveis, esse tipo de sistema e os estudos que comprovam sua viabilidade ainda são bastante incipientes (Anghinoni et al., 2013; Martins et al., 2017).

### 2.3.1. Adoção da semeadura direta

A semeadura direta é considerada um dos principais requisitos para adoção de sistemas conservacionistas como os SIPA. Embora escassos, alguns estudos mostram a influência da semeadura direta em atributos do solo em ambientes de terras baixas, baseado no sistema de cultivo do arroz. Em relação às características físicas, a compactação frequentemente é alvo de estudos e pesquisas por influenciar diretamente o crescimento radicular e, conseqüentemente, a produção dos cultivos (Derpsch, 2003). Enquanto alguns estudos mostram aumento da densidade do solo após a adoção da semeadura direta (Zhuang et al., 1999; Iijima et al., 2005; Beutler et al., 2012), outros demonstram uma diminuição da compactação a partir desses sistemas (Chen et al., 1993; Feng et al., 2006). No entanto, esse tipo de característica se torna pouco importante sob condições de alagamento do solo pelo rompimento dos agregados e estrutura fluida ocorrente no solo alagado (Ambassa-Kiki et al., 1996; Beutler et al., 2012).

Diferente das alterações que ocorrem nas características químicas do solo sob revolvimento e cultivos contínuos de arroz, os quais apresentam diminuição do pH e dos teores de cátions trocáveis (El-Shahway et al., 2015), os solos manejados sob semeadura direta são mais ricos em MO e nutrientes na camada superficial do solo (Lal, 1986; Feng et al., 2006; Tang et al., 2007). Além de modificações nos atributos químicos, estudos também demonstram

alterações nos atributos microbiológicos do solo. As enzimas presentes no solo são sensíveis a distúrbios ocorridos, sendo, dessa forma, a atividade enzimática apontada como um indicador de qualidade do solo (Dick, 1997). Em sistemas mais diversificados em semeadura direta têm se observado maior atividade enzimática (Gao et al., 2004a; Martins et al., 2017). Existe uma evidência crescente de que os atributos microbiológicos do solo são potenciais indicadores antecipados de mudanças em sua qualidade, pois são mais sensíveis que as características químicas e físicas do solo (Miller e Dick, 2005; Bandick e Dick, 1999; Bending et al., 2004; Peixoto et al., 2010).

Embora a adoção de sistemas conservacionistas em terras baixas proporcione melhorias na qualidade do solo, Huang et al. (2015) demonstram, por meio de uma meta-análise realizada na China, que somente a adoção dessa prática não garante incrementos em produtividade na cultura do arroz. Entretanto, a referida mudança gera um importante efeito nos componentes de rendimento, havendo uma redução na quantidade de panículas produzidas por área em semeadura direta, compensada pelo aumento do número de grãos por panícula e maior enchimento de grãos. No entanto, em condições meteorológicas desfavoráveis (maior nebulosidade e frio), o arroz em sistema convencional apresenta menor produtividade, por reduzir o perfilhamento e conseqüentemente o número de panículas por hectare (Huang et al., 2015). Em estudo realizado no Brasil, no entanto, a semeadura direta proporcionou acréscimos no rendimento do arroz em relação ao convencional ao longo do tempo. No longo prazo, inclusive, o arroz sob semeadura direta apresentou produtividades superiores ao plantio convencional, corroborando também aumentos do teor de MO nesse sistema e demonstrando a importância do tempo na consolidação do sistema (Carmona et al., 2017). Isso demonstra a necessidade e importância da adoção de sistemas conservacionistas em ambientes arrozeiros do subtropical brasileiro, aumentando a produtividade e melhorando atributos de qualidade do solo.

### 2.3.2. Inserção do animal no sistema

O animal desempenha um papel essencial nos SIPA, sendo o principal agente diversificador do sistema. Esse componente promove

mudanças tanto no aporte de resíduos quanto no balanço de nutrientes, havendo uma oferta constante de nutrientes, uma vez que existem diferentes fontes de decomposição (resíduos orgânicos e dejetos animais) (Larcher, 2000). Enquanto os diferentes componentes vegetais encontrados no sistema incorporam nutrientes e energia (Vezzani & Mielniczuk, 2009; 2011), os animais funcionam como catalisadores ao introduzirem variabilidade e novas vias de fluxos de nutrientes e água, sendo o solo o compartimento mediador dos processos (Anghinoni et al., 2013).

A introdução dos animais no sistema modifica e acelera o fluxo dos nutrientes pela ingestão da biomassa, retornando 70-95% dos nutrientes da planta para o solo via fezes e urina (Russelle, 1997; Whitehead, 2000). Dessa forma, acaba por ser esse um processo contínuo em que a magnitude e a direção dependem da intensidade de pastejo (Anghinoni et al., 2013). Assim, o sucesso do sistema é essencialmente dependente do arranjo espaço-temporal, sendo fortemente influenciado pelas condições de manejo da pastagem (intensidade do pastejo) (Carvalho et al., 2010).

A utilização de pastagens cultivadas no período hibernar em rotação com o arroz irrigado é um exemplo de sistema que apresenta grande potencial de uso nas terras baixas do subtropical brasileiro. Saibro & Silva (1999) relatam ganhos em 18% na produtividade do arroz após três ciclos de pastejo com espécies leguminosas em consórcio com gramíneas no referido sistema, quando comparado ao sistema convencional de cultivo. Assim, em SIPA conduzidos nesses ambientes, são recomendadas, além de gramíneas adaptadas como o azevém (Marchezan et al., 2005), o cultivo de outras forrageiras, dentre elas espécies leguminosas, principalmente na forma de pastagens consorciadas (Gomes et al., 1993).

Segundo Saibro & Silva (1999), o consórcio de azevém com espécies leguminosas, além de gerar significativo ganho animal, pode representar acréscimo de 25% na produtividade do arroz irrigado, com substancial decréscimo da adubação requerida. Para Reis et al. (2008), a correta adubação das pastagens consorciadas pode também dispensar a aplicação de fósforo e potássio no arroz irrigado em sucessão. Os SIPA promovem mudanças na dinâmica dos nutrientes, devido à adoção da semeadura direta e à inserção do animal e/ou à intensidade de pastejo

utilizada. Tais diferenças foram estudadas e reportadas no Sul do Brasil, apenas em terras altas, para acidez do solo (Flores et al., 2008; Martins et al., 2014), fósforo (Costa et al., 2014), potássio (Ferreira et al., 2011; Martins et al., 2014), cálcio e magnésio (Martins et al., 2014; Martins et al., 2016), no entanto já demonstram como esse tipo de manejo pode afetar atributos e propriedades do solo, deixando-os mais diversificados e promovendo, assim, maior complexidade e variabilidade do sistema.

### 2.3.3. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo

A variabilidade espacial do solo resulta de variações do material de origem, clima, relevo e organismos vivos existentes, potencializados pelo tempo. Em suma, está estritamente relacionada aos processos de formação do solo e/ou ao efeito das práticas de manejo na área (McGraw, 1984). A variabilidade pode ser dividida em duas categorias, sendo composta por uma variação sistemática e outra aleatória. A sistemática é representada por mudanças nos atributos do solo de forma gradual, seguindo certa tendência dos efeitos, ocorrendo em função da forma do relevo, dos elementos geomorfológicos e dos fatores de formação do solo e/ou ação antrópica (Jenny, 1941; Belobrov, 1976). A variabilidade sistemática muitas vezes se torna altamente complexa e difícil de discernir, representando mudanças nas características do solo que não são relacionadas a uma causa conhecida – neste caso, é conhecida como variabilidade aleatória (Wilding & Drees, 1983). No entanto, ao se investigar em maior detalhe, uma parte da variação originalmente considerada aleatória pode ser reconhecida como sistemática. Em um âmbito geral da variabilidade do solo, segundo Reichert et al. (2008), é comum os solos de terras baixas apresentarem alta variabilidade espacial, afetando significativamente a produtividade dos cultivos. No mesmo estudo, a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo afetou a produtividade de soja em ambiente de terras baixas.

A adoção de sistemas conservacionistas, tendo como base a semeadura direta, aumenta a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, tanto no sentido horizontal, pela distribuição irregular de palha na superfície do solo (Klepker & Anghinoni, 1995), quanto no sentido vertical,

pelas diferenças entre os teores de uma camada mais superficial em relação à outra mais profunda (Eltz et al., 1989; Amaral & Anghinoni, 2001). De acordo com Werner (2004), as acentuadas variações nos teores de nutrientes no solo frequentemente encontrados numa gleba decorrem do cultivo intensivo e do uso indiscriminado de fertilizantes. Assim, o estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo é particularmente importante em áreas onde o solo está submetido a diferentes tipos de manejo, com diferentes arranjos e rotações espaço-temporais (Carvalho et al., 1998; Carvalho et al., 2002), principalmente quando há presença de componentes provedores de maior complexidade do sistema, como o animal (Anghinoni et al., 2013).

O componente animal no sistema tem um papel fundamental na indução de variabilidade dos atributos químicos do solo. O pastoreio pode afetar os padrões espaciais dos atributos do solo através da utilização da pastagem, promovendo a heterogeneidade do ambiente pelos distintos fatores microambientais ofertados, incluindo água, luz e nutrientes (Laca, 2009). A principal fonte de variação ocorre pela distribuição de dejetos (fezes e urina), os quais são depositados de forma inconstante e desuniforme, influenciando a concentração de nutrientes (Augustine & Frank, 2001; McNaughton, 1985) e a comunidade microbiana no solo (Chávez et al., 2011). Aliado a isso, os animais podem indiretamente influenciar a distribuição espacial das características do solo pela mudança dos padrões de vegetação (Olofsson, 2008), por meio do pastejo, fruto da seleção da dieta pelo animal, conforme a disponibilidade de forragem à qual está submetido (Laca, 2009; Nunes, 2016). De acordo com Dumont et al. (2012), essa variação ocorrente na vegetação se deve ao pastejo seletivo, através do qual os herbívoros criam e mantêm um mosaico de pastos mais baixos, superpastejados, e mais altos, subpastejados. O pastejo seletivo ocorre tanto por características do pasto, o qual apresenta distinta composição bromatológica em função do pastejo, além da sua acessibilidade (Laca et al., 1994; Carvalho et al., 2001), e pelo evitamento de áreas contaminadas por fezes e urina (Willms et al., 1988). Por conseguinte, a variabilidade proporcionada na pastagem acaba por influenciar a disposição dos dejetos pelos animais, redistribuindo, separando e ao mesmo tempo concentrando o retorno dos nutrientes ao solo (Auerswald et al., 2010).

Além da redistribuição dos dejetos promover heterogeneidade no sistema pela sua disposição irregular, a composição química das fezes e urina por si se diferem. Ocorrem maiores excreções de nitrogênio e potássio na urina, enquanto que nas fezes há maiores concentrações de fósforo, por exemplo (Whitehead, 2000). Dessa forma, as diferentes ocupações no espaço das fezes e da urina podem resultar em desequilíbrios de nutrientes, e, conseqüentemente, em uma produção de biomassa heterogênea (Hirata et al., 1991; Shiyomi et al., 1998). Além das diferenças na composição química, os dejetos animais normalmente diferem dos resíduos vegetais quanto ao tempo e forma de liberação de nutrientes ao solo (Haynes & Williams, 1993; Damian et al., 2014; Assmann et al., 2017; Martins et al., 2017).

Esses diversos fatores transmitem complexidade e heterogeneidade, resultando em um sistema dinâmico e heterogêneo (Salton & Carvalho, 2007). De acordo com Anghinoni et al. (2013), diversidade e complexidade são propriedades inerentes aos SIPA, e o grau de interações sinérgicas é dependente do quão complexo é o sistema com relação à diversificação, temporalidade e espacialização. Desse modo, a diversificação e a temporalidade (tempo com que os diferentes arranjos de integração se repetem) possuem relação positiva e a espacialização (espaço entre os componentes da integração) possui relação negativa com a possibilidade de ocorrência de sinergismos no sistema. Em outras palavras, quanto mais diversos os sistemas, mais se aproximam dos processos ecossistêmicos naturais, mimetizando seu funcionamento e equilíbrio (Kirschenmann, 2007).

#### **2.4. Uso de insumos e eficiência de aproveitamento de nutrientes**

O modelo atual da agricultura brasileira, centrado em ganhos de produtividade, tem gerado aumento crescente no uso de fertilizantes. A comercialização de insumos aumentou fortemente nos últimos anos, sendo superior a 31 milhões de toneladas de fertilizantes em 2016 (ANDA, 2016). Embora o consumo de todos os nutrientes tenha crescido, o potássio é o que apresenta o maior crescimento relativo e, juntamente com o fósforo, são os nutrientes mais utilizados. O menor consumo do nitrogênio está associado à

fixação biológica deste nutriente no cultivo da soja. Considerando a quantidade de fertilizante utilizada por área plantada, de 1992 para 2010 houve um aumento no consumo de aproximadamente 123%, passando de 69,4 kg ha<sup>-1</sup> para 155 kg ha<sup>-1</sup>, sendo 43,7 kg N ha<sup>-1</sup>, 51,8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> e 59,6 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Em termos de consumo de fertilizantes, a liderança brasileira fica com o Estado do Mato Grosso, estando o consumo gaúcho em terceiro lugar (ANDA, 2016).

A cultura do arroz irrigado é considerada uma das mais exigentes em fertilizantes. Esse insumo tem grande representatividade nos custos da produção do cereal e, se usado indevidamente, pode poluir o ambiente e/ou diminuir a eficiência da produção (Fageria et al., 2003). Além dos menores teores de MO encontrados em solos de terras baixas (item 2.2), o alagamento induzido durante o ciclo de cultivo do arroz irrigado restringe a liberação do N oriundo do material orgânico, requerendo altas doses de N via fertilizante para sustentar a produção de grãos (Olk et al., 1996). Corroborando isso, os sistemas intensivos atuais de produção agrícola incentivam o aumento do uso de fertilizantes nitrogenados com objetivo de produzir e manter altas produtividades. Conseqüentemente, as perdas de N no ambiente também aumentam (Schmied et al., 2000), tornando-se um objetivo a melhoria da eficiência de uso do N pelo arroz em sistemas de produção sustentáveis. Assim, no contexto das práticas conservacionistas, aumentar a produção de arroz por unidade de área e por unidade de nutriente utilizada, a partir de práticas adequadas de manejo de nutrientes, tornou-se um componente essencial da agricultura moderna (Fageria et al., 2003).

Uma das principais formas de se avaliar a eficiência de utilização de nutrientes é a partir da sua absorção (Fageria & Baligar, 2005), avaliada pelo teor total de nutriente acumulado na matéria seca da parte aérea na maturação fisiológica, apresentando alta correlação com a produção de grãos (Floss, 2008). Segundo Dobermann & Fairhurst (2000), para os principais macronutrientes (N, P e K), há uma taxa ótima de absorção para atingir o potencial na produção de grãos (**Tabela 1**). Esses valores são calculados pela eficiência de uso dos nutrientes requeridos em maior quantidade, com avaliação de um balanço adequado entre eles. Com base nisso se encontra um valor intermediário de nutriente absorvido para que não haja falta ou excesso para a planta, garantindo alta produção de grãos. Em sistemas tradicionais de

cultivo de arroz irrigado, com manejo convencional do solo (arações e gradagens), 1 kg de N, P e K tem eficiência de uso interno em produzir cerca de 68, 385 e 69 kg de grãos de arroz, respectivamente (Dobermann & Fairhurst, 2000).

**Tabela 1.** Disponibilidade de nutrientes em função da remoção de N, P e K para produção de 1 Mg de grãos (em kg por Mg de grãos produzidas).

Disponibilidade de nutriente	Nitrogênio	Fósforo	Potássio
	--- Nutriente exportado para o grão* (kg Mg <sup>-1</sup> ) ---		
Máxima limitação	≤ 10	≤ 1,6	≤ 9
Limitação	11 - 13	1,7 - 2,3	10 - 13
Ótimo nutricional	14 - 16	2,4 - 2,8	14 - 16
Excedente	17 - 23	2,9 - 4,8	17 - 27
Máximo excedente	≥ 24	≥ 4,9	≥ 28

(\*) Relação entre a produção de grãos e o acúmulo de nutrientes considerando um máximo de 80% da produtividade. Fonte: Adaptado de Dobermann & Fairhurst (2000).

Diferente dos sistemas atuais, a adoção de sistemas conservacionistas em terras baixas pode promover significativos aumentos no teor de MO oriundos da retenção de resíduos, além de melhorar a fertilidade do solo, contribuindo para a produção sustentável de arroz (Yadvinder-Singh et al., 2005). No entanto, a adoção da semeadura direta modifica a dinâmica de nutrientes no sistema. Sem revolvimento do solo, o acúmulo de resíduo na superfície do solo pode resultar em maior imobilização microbiana de N (Thuy et al., 2008; Xu et al., 2010). Em sistemas mais diversificados e complexos, quando com a inserção do animal, caracterizando um SIPA, também se identificam diferenças em demais atributos químicos de solo, como na dinâmica da acidez do solo (Flores et al., 2008; Martins et al., 2014), do fósforo (Costa et al., 2014), do potássio (Ferreira et al., 2011; Martins et al., 2014), do cálcio e magnésio (Martins et al., 2014). Isso demonstra a importância de se realizar estudos envolvendo a dinâmica dos nutrientes nesses ambientes, buscando-se explorar os processos responsáveis pela maior eficiência de uso dos principais nutrientes.





### **3. CAPÍTULO II - MATERIAL E MÉTODOS GERAL**

#### **3.1. Localização geográfica, clima, solo e histórico da área experimental**

Os estudos referentes a este trabalho foram conduzidos desde 2013 em uma área experimental de 18 hectares pertencente à Fazenda Corticeiras, localizada no município de Cristal, região arrozeira da Planície Costeira Interna, RS, Brasil. (30°97'26" S latitude, 51°95'04" O longitude). A altitude do local é de 28 metros e o clima caracteriza-se como subtropical úmido e quente (Cfa), segundo a classificação de Köppen (Kottek et al., 2006), com temperatura média anual de 18,3°C e precipitação média anual de 1.522 mm (CEMETRS, 2017).

O solo é classificado como PLANOSSOLO Háplico Eutrófico típico (EMBRAPA, 2006), com relevo plano a suavemente ondulado e declividade máxima de 0,04 m m<sup>-1</sup>. Apresenta má drenagem e textura franca com 240, 230 e 530 g kg<sup>-1</sup> das frações granulométricas argila, silte e areia, respectivamente.

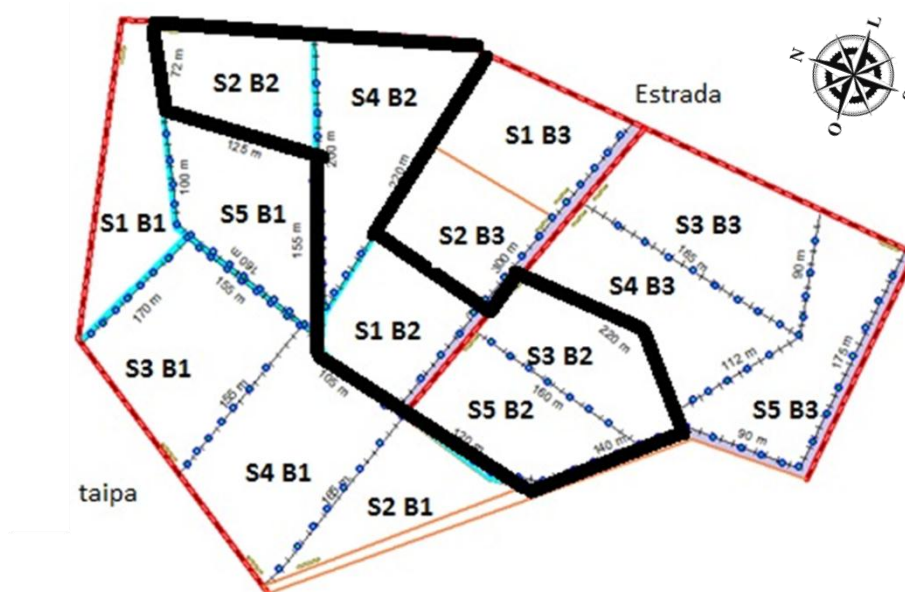
A área destinada ao protocolo experimental era cultivada com arroz irrigado intercalado com períodos variáveis de pousio desde a década de 1960. Seu último cultivo de arroz foi em 2009, sendo após esse período utilizada com produção de ovinos. Em março de 2013, imediatamente antes da implantação do experimento, amostras de solo foram coletadas na camada 0-20 cm e apresentaram as seguintes características químicas (Tedesco et al., 1995): 5,5 de pH em água; 18 g kg<sup>-1</sup> de MO; 10 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo (Mehlich 1); 76 mg dm<sup>-3</sup> de potássio (Mehlich 1); 3,5, 2,3 e 0,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de cálcio, magnésio e

alumínio trocáveis ( $\text{KCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ), respectivamente;  $\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$  de  $10,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; e saturação por bases de 56%.

Na implantação do experimento, foi realizado preparo convencional de toda a área experimental com o uso de arado e duas operações com grade niveladora. No intervalo entre as gradagens, foi aplicado calcário dolomítico para correção da acidez da camada de 0-20 cm, com objetivo de se aumentar o pH até 6,0 (CQFS RS/SC, 2004), a partir de uma aplicação de  $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (PRNT 70%).

### 3.2. Tratamentos, delineamento e condução do experimento

O protocolo experimental inclui cinco sistemas de produção de arroz (tratamentos), distribuídos em um delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições, conforme apresentado na **Figura 1**.



**Figura 1.** Disposição dos sistemas (S1, S2, S3, S4 e S5) em três blocos (B1, B2 e B3) e identificação da estrada de acesso e da taipa, no protocolo experimental SIPA em terras baixas, Cristal/RS.

Os sistemas em estudo envolvem as variáveis diversidade especial e temporal de cultivos e intensidade temporal do cultivo de arroz, de modo a representar modelos de produção para os diferentes cenários das terras baixas

do RS, tendo o arroz como a cultura de referência. As características de cada sistema são descritas a seguir:

**Sistema 1:** arroz – pousio – arroz. É o sistema dominante na maioria das lavouras arrozeiras no RS, denominado sistema tradicional, e serve de testemunha em relação aos demais sistemas, caracterizando-se como monocultivo. Este tratamento consiste no cultivo mínimo, com operações de gradagem e preparo de solo, logo após a colheita e muito antes da semeadura do arroz. Neste sistema não ocorre pastejo animal. O pousio caracteriza-se como restos culturais da cultura do arroz e vegetação espontânea.

**Sistema 2:** arroz – azevém (*Lolium multiflorum*) – arroz. Este modelo enseja o perfil das pequenas e médias propriedades da Depressão Central e Planícies Costeiras, Interna e Externa, com cultivo anual de arroz irrigado. A implantação de azevém no inverno conta com o pastejo animal e, por consequência, uma melhor utilização da terra no período normalmente ocioso.

**Sistema 3:** arroz – azevém – soja (*Glycine max*) – azevém – arroz. Este modelo está sendo implementado nas seis regiões orizícolas do Estado, tanto em pequenas, quanto em médias e grandes propriedades.

**Sistema 4:** azevém + trevo branco (*Trifolium repens*) – capim sudão (*Sorghum sudanense*) – azevém + trevo branco – soja – azevém + trevo branco – milho (*Zea mays*) – azevém + trevo branco – arroz. Este cenário visa atender as demandas das médias e grandes propriedades das regiões da Campanha, Fronteira Oeste e Zona Sul do RS. Busca otimizar um sistema de rotação que prevê o cultivo de arroz a cada quatro anos, com grande diversificação de espécies e consequente diminuição de risco, pelo acréscimo de outras variáveis de renda que, no longo prazo, determinam maior sustentabilidade do sistema. Neste sistema, o capim sudão é utilizado como forrageira em pastejo no verão.

**Sistema 5:** azevém + trevo branco + cornichão (*Lotus corniculatus* L.) – campo de sucessão - azevém + trevo branco + cornichão – campo de sucessão... – arroz. Este cenário também engloba as médias e grandes propriedades das regiões da Campanha, Fronteira Oeste e Zona Sul do RS. Representa um sistema já amplamente utilizado nessas regiões, mas com deficiência de dados de pesquisa regionalizados e transferência de tecnologia. No verão, o campo

de sucessão é composto pelo prolongamento das pastagens hibernais e estabelecimento natural de espécies nativas. O cultivo hibernar e o campo de sucessão são pastejados e o arroz irrigado é cultivado a cada quatro anos.

Com exceção do Sistema 1, todos os demais sistemas são conduzidos em semeadura direta. O único evento de mobilização do solo ocorre na restauração das taipas antes do cultivo do arroz e o sulco de semeadura nas demais culturas de verão.

As culturas são manejadas (inoculação e/ou tratamento de sementes, adubação, herbicidas, inseticidas e fungicidas) de acordo com recomendações técnicas para cada cultura, quais sejam: pastagens – CQFS RS/SC (2004; 2016); arroz – SOSBAI (2012; 2014; 2016); milho e sorgo – FEPAGRO (2009) e soja – EMBRAPA (2012).

O pastejo realizado nos Sistemas 2, 3, 4 e 5 foi realizado pelo método contínuo com lotação variável, composto por três animais-teste (*testers*) por unidade experimental e por animais reguladores que entram e saem da pastagem conforme a necessidade de ajuste da altura, seguindo a metodologia de Mott e Lucas (1952). Para isso, são utilizados animais jovens recém-desmamados com 10 meses de idade média, machos castrados contendo cerca de 200 kg de peso vivo. O início do pastejo ocorreu no momento em que a altura do pasto atinge aproximadamente 15 cm (em torno de 1.500 kg de matéria seca ha<sup>-1</sup>), mantendo-se essa altura ao longo do ciclo do pastejo, que se estende até meados de outubro – novembro, dependendo da cultura em sucessão. O acompanhamento da altura do pasto é realizado cada 15 dias, por meio de um bastão graduado (*Sward stick*) (Bircham, 1981; Barthram, 1986), cujo marcador corre por uma “régua” até tocar a primeira lâmina foliar, procedendo-se então à leitura da altura. Em cada parcela, realizava-se cerca de 150 leituras (pontos), em caminhar aleatório, a fim de definir a altura média do pasto (altura entre o primeiro toque da lâmina móvel nas folhas e o solo). A entrada dos animais é feita após pesagens dos animais, acompanhada de jejum prévio de 15 horas, com vermifugação e identificação dos animais com brincos. No ciclo estival (Sistema 4 e 5), são utilizados animais machos castrados, com cerca de 15 meses de idade e 300 kg de peso vivo, aproximadamente.

A semeadura das pastagens, realizada nos Sistemas 2, 3, 4 e 5, tem como densidade de semeadura de azevém, trevo branco e cornichão, de 30, 3 e 6 kg ha<sup>-1</sup> de semente, respectivamente. O arroz e o capim sudão foram semeados em outubro, com espaçamento entrelinhas de 17 cm e uma densidade de 100 e 25 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os cultivos de soja são iniciados em novembro, com espaçamento de 45 cm entrelinhas e densidade de 31 sementes m<sup>-2</sup>. As variedades de soja, arroz e capim sudão utilizadas foram as seguintes: TECIRGA 6070, IRGA 424 e BRS Estribo, respectivamente.

A adubação nos diferentes sistemas, desde a implantação do experimento (2013), até o último ano de análise do presente estudo (2015), está especificada e detalhada na **Tabela 2**. A adubação dos diferentes Sistemas seguiu a recomendação e o padrão nos invernos com: ausência de adubação no Sistema 1; adubação do azevém solteiro nos Sistemas 2 e 3, e no azevém consorciado com trevo branco e/ou cornichão nos Sistemas 4 e 5. No verão, seguiu-se as recomendações para a cultura do arroz irrigado (Sistemas 1 e 2); da soja (Sistema 3 – 2013/14 e Sistema 4 – 2014/15), do capim sudão (Sistema 4 – 2013/14) e do campo de sucessão (Sistema 5).

**Tabela 2.** Detalhamento das adubações realizadas nos SIPA nos anos de 2013 a 2015.

			<b>Sistemas</b> <sup>(1)</sup>				
			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Inverno 2013</b>	N		0	110	110	110	110
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	0	110	110	130	130
	K <sub>2</sub> O		0	110	110	130	130
<b>Verão 2013/2014</b>	N		150	150	20	130	130
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	70	70	110	80	80
	K <sub>2</sub> O		120	120	120	120	120
<b>Inverno 2014</b>	N		0	130	130	130	130
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	0	130	130	130	130
	K <sub>2</sub> O		0	130	130	130	130
<b>Verão 2014/2015</b>	N		161	161	161	28	126
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	73	73	73	136	86
	K <sub>2</sub> O		115	115	115	154	90
<b>Inverno 2015</b>	N		0	130	130	130	130
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	0	130	130	130	130
	K <sub>2</sub> O		0	130	130	130	130
<b>Total 2013-2015</b>	N		311	681	551	528	626
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg ha <sup>-1</sup>	143	513	553	606	556
	K <sub>2</sub> O		235	605	605	664	600

<sup>(1)</sup> Sistemas: 1. Monocultivo de arroz-pousio (testemunha, com preparo de solo); 2. SIPA arroz-gado de corte; 3. SIPA em rotação soja/arroz – gado de corte; 4. SIPA, em rotação pastagem cultivada/soja – gado de corte; 5. Pastagem cultivada e pastagem natural.

## **4. CAPÍTULO III – ESTUDO 1: VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM TERRAS BAIXAS EM SEMEADURA DIRETA**

### **4.1 Introdução**

A variabilidade de atributos e propriedades encontrada no solo é resultado de processos naturais de formação do solo e variações no relevo (McGraw et al, 1884; Couto et al., 2000; Souza et al., 2004; Campos et al., 2007), além do manejo e práticas agrícolas utilizadas (Corá & Beraldo, 2006; Mello et al., 2006; Zanão Júnior et al., 2010). O cultivo do solo por si só altera seus atributos iniciais, por meio de práticas agrícolas usuais como calagem, adubação e outras práticas de manejo (Klepker & Anghinoni, 1995; Couto et al., 1997; Schlindwein & Anghinoni, 2000; Corá & Beraldo, 2006). Nesse sentido, o conhecimento da variabilidade do solo é imprescindível, principalmente em áreas cujo solo está submetido a diferentes práticas culturais, para a avaliação de sua fertilidade atual, desenvolvimento de esquemas de amostragens mais adequados, planejamento experimental e definição de práticas apropriadas de manejo e recuperação (Souza, 1992).

Na maioria dos trabalhos desenvolvidos com a temática da variabilidade espaço-temporal do solo, tem-se buscado a indicação de alternativas para reduzir os seus efeitos na produção de culturas (Trangmar et al., 1985). A importância de se medir a variabilidade espaço-temporal nas características do solo está implicitamente vinculada ao objetivo de se otimizar e aproveitar os recursos, diminuindo os custos de produção (Carvalho et al., 2002). Segundo Orlando Filho & Rodella (1983), cerca de 80 a 85% do erro



total nos resultados usados na recomendação de fertilizantes e corretivos podem ser atribuídos à amostragem no campo e, por isso, tornar o solo o mais homogêneo possível tem sido a solução para uma produção com maior rentabilidade. Dessa forma, a principal utilização do estudo da variabilidade do solo tem sido referida ao gerenciamento do processo de produção em função da variabilidade, o que se convencionou chamar de Agricultura de Precisão (Carvalho et al., 2002), onde a maioria das intervenções realizadas pelo homem tendem à homogeneização dos ambientes.

Apesar do exposto, diversos autores consideram fundamental a diversidade e complexidade dos componentes formadores do sistema produtivo. O grau de interações sinérgicas e consequente qualidade do sistema são dependentes do quão complexo é o sistema com relação à diversificação, temporalidade e espacialização (Beare et al., 1995; Vezzani & Mielniczuk, 2009; Anghinoni et al., 2013). Assim, quanto maior o grau de diversificação encontrado nos sistemas, maior sua qualidade e mais aproximados dos processos ecossistêmicos eles se encontram, apresentando maior capacidade de exercer suas funções na natureza (Beare et al., 1995; Kirschenmann, 2007). Além disso, a diversidade aumenta a capacidade de suportar estresse e confere ao sistema maior resistência a perturbações, aumentando sua resiliência, consequentemente (Vezzani & Mielniczuk, 2009).

Tendo como base sistemas conservacionistas, o não revolvimento aumenta a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, tanto no sentido horizontal, quanto no sentido vertical (Eltz et al., 1989; Klepker & Anghinoni, 1995; Amaral & Anghinoni, 2001). Embora os estudos sobre variabilidade espaço-temporal de atributos químicos do solo em SIPA sejam escassos, esses sistemas contam com a presença do componente animal, o qual atua como um agente diversificador do sistema (Larcher, 2000). Além da distribuição de dejetos (fezes e urina) desuniforme e inconstante no ambiente (Augustine & Frank, 2001; McNaughton, 1985; Chávez et al., 2011), os animais afetam a variabilidade através da mudança dos padrões de vegetação, influenciado pelo pastejo (Olofsson, 2008; Laca, 2009). Além de provocar mudanças no aporte de resíduos pelo pastejo, o animal também modifica o balanço de nutrientes, ofertando-os constantemente através de diferentes fontes em decomposição (resíduos orgânicos e dejetos animais) (Larcher,

2000), de forma que os nutrientes são redistribuídos, separados e ao mesmo tempo o seu retorno ao solo é concentrado (Auerswald et al., 2010). A partir das possíveis modificações causadas pelo animal ao integrar o sistema, hipotetiza-se que sua maior intensidade e frequência promove maior variabilidade de atributos químicos do solo, como o teor de MO, pH e o alumínio trocável, no espaço e no tempo. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas.

## **4.2 Material e Métodos**

A descrição e caracterização do protocolo experimental a que se refere o presente estudo foram apresentadas no Item 3. Em função disso, descreve-se, a seguir, as etapas relativas ao presente estudo.

### **4.2.1 Amostragem e análises químicas do solo**

Para as análises deste estudo utilizaram-se amostragens de solo coletadas em março de 2013, previamente à instalação do experimento, o qual testa os cinco sistemas previamente descritos (Item 3.2). Foram coletadas amostras de solo em 90 pontos, georeferenciados em uma grade amostral de 45 metros. As camadas amostradas foram 0-10; 10-20 e 20-40 cm – no entanto, para esse estudo, utilizaram-se amostras apenas da camada 0-10 cm. Para composição de uma amostra, foram realizadas quatro subamostras. As subamostras foram posicionadas com uma coleta sobre o ponto georeferenciado e outras três no entorno, a um raio de 3 metros do ponto. Como equipamento de coleta, se utilizou um trado calador e a metodologia de coleta seguiu àquela recomendada e descrita por CQFS RS/SC (2004). Após a coleta, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos e levadas até o Laboratório de Solos do IRGA-EEA, onde foram secas em estufa de ar forçado ( $\approx 40^{\circ}\text{C}$ ), moídas, passadas em peneira de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA) e armazenadas em potes plásticos. As mesmas amostragens, sobre os mesmos pontos georeferenciados, foram realizadas

em outubro de 2015; e todas as amostras foram submetidas à mesma metodologia de secagem e moagem.

Posteriormente, as amostras de solo foram submetidas a análises de pH em água (relação 1:1); MO (Walkey-Black), cálcio, magnésio e Al trocável (KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>), e K disponível (Mehlich-1), conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). No entanto, para este estudo somente foram utilizados as análises de pH em água, MO e Al trocável.

#### 4.2.2 Análises estatísticas

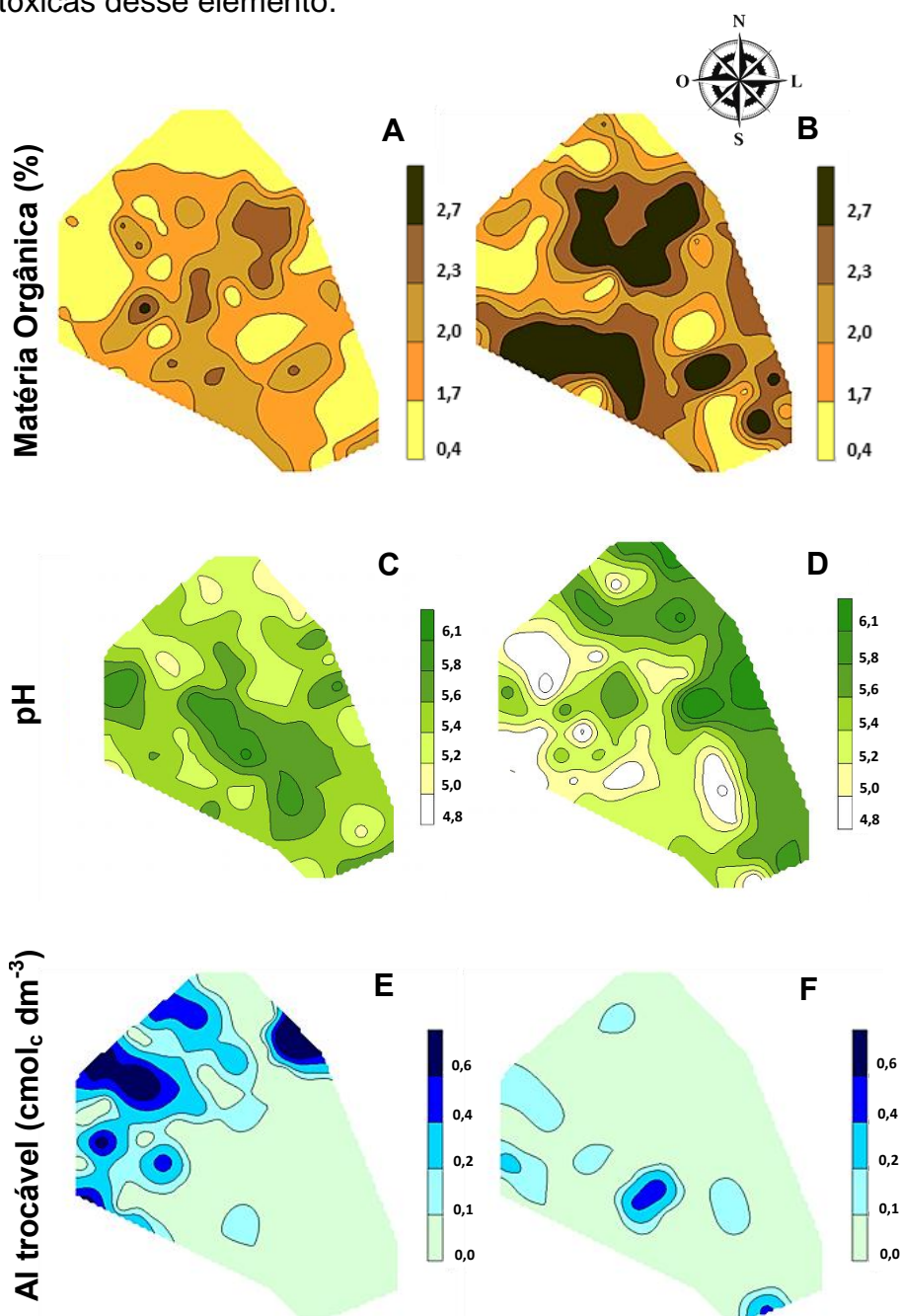
Para identificar e mapear padrões espaciais dos atributos químicos na superfície do solo submeteu-se as variáveis analisadas à construção de mapas de isolinhas, a partir da interpolação por krigagem pontual. Objetivando-se descrever o conjunto de dados obtidos, bem como se verificar a variabilidade das amostras obtidas nos diferentes anos, se submeteu os resultados a análises de estatística descritiva, obtendo valores de média, mínimo, máximo, desvio padrão, erro padrão e coeficiente de variação para cada sistema.

Além disso, os resultados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk ( $p < 0,05$ ), para verificação da normalidade dos dados (variância constante e independência e normalidade dos erros) e, posteriormente, à análise de variância (ANOVA) que, quando significativa ( $p < 0,05$ ), foi procedida do teste de Tukey para comparação de médias ( $p < 0,05$ ). Foram usados como efeitos fixos: efeito de sistema, ano, interação sistema x ano e bloco. Como efeitos aleatórios foram considerados a interação sistema x bloco e amostra (bloco).

### 4.3 Resultados

Os atributos químicos do solo demonstram uma ampla e visível variabilidade espacial nos teores de MO e nos valores de pH do solo, no início e após dois anos e sete meses da implantação do experimento (**Figura 2**). Diferentemente desses atributos, os teores de Al trocável apresentaram, em 2015, grande homogeneidade nos valores em relação à condição inicial (2013),

demonstrando efeito da correção da acidez em relação à neutralização de formas tóxicas desse elemento.



**Figura 2.** Teores de MO, pH e AI trocável no início do experimento, em maio de 2013 (A, C e E, respectivamente), e dos mesmos atributos 30 meses após a implantação, em outubro de 2015 (B, D e F, respectivamente), dispostos em mapas por interpolação de dados por krigagem.

Os valores encontrados na estatística descritiva (**Tabela 3**) corroboram e demonstram o aumento da variabilidade espacial dos atributos químicos após trinta meses de adoção do experimento. Observando os valores de pH, identifica-se aumento no coeficiente de variação (CV) em todos os

sistemas, com os maiores valores de CV encontrados nos Sistemas 2 e 4, com aumentos de 5%. Os Sistemas 1, 3 e 5 apresentaram um menor aumento do CV, apresentando, também, menores aumentos no desvio padrão, quando comparados com os Sistemas 2 e 4. Estes sistemas apresentaram maior erro padrão da média, com incrementos de 130 e 150%, respectivamente, em relação ao inicial. Enquanto isso, os Sistemas 1, 3 e 5 apresentaram aumentos que variaram de 30 a 50%, somente. Isso demonstra que os Sistemas 2 e 4 não só apresentaram maior variabilidade dos valores de pH encontrados em relação à média, mas também diferem da população amostral, como verificado pelos aumentos nos valores de erro padrão.

**Tabela 3.** Estatística descritiva com média, valores mínimo e máximo, erro padrão, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e n amostral dos diferentes sistemas no ano de 2013 e 2015 para os atributos pH em água, matéria orgânica (MO) e alumínio trocável (Al).

	Sistemas <sup>(1)</sup>									
	1		2		3		4		5	
	2013	2015	2013	2015	2013	2015	2013	2015	2013	2015
	----- pH em água -----									
<b>Média</b>	5,5	5,7	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,3	5,5	5,3
<b>Mínimo</b>	5,2	5,1	5,0	5,0	5,1	4,9	5,1	4,7	5,1	4,6
<b>Máximo</b>	5,9	6,3	5,7	6,7	6,0	5,9	5,8	6,1	6,0	5,8
<b>Erro padrão</b>	0,06	0,08	0,06	0,14	0,05	0,08	0,04	0,10	0,05	0,07
<b>Desv. Padrão</b>	0,23	0,35	0,22	0,50	0,22	0,31	0,18	0,44	0,25	0,34
<b>CV (%)</b>	4%	6%	4%	9%	4%	6%	3%	8%	5%	7%
<b>n</b>	17	17	13	13	16	16	19	19	23	23
	----- MO (%) -----									
<b>Média</b>	1,94	2,23	1,75	2,18	1,84	2,33	1,83	2,34	1,61	2,19
<b>Mínimo</b>	1,30	1,40	1,30	0,80	1,40	0,60	0,40	0,60	0,50	0,90
<b>Máximo</b>	2,70	4,90	2,70	3,50	2,30	3,00	3,00	4,60	2,40	3,60
<b>Erro padrão</b>	0,10	0,19	0,11	0,21	0,08	0,15	0,15	0,23	0,11	0,17
<b>Desv. Padrão</b>	0,43	0,78	0,38	0,74	0,32	0,60	0,64	1,00	0,53	0,82
<b>CV (%)</b>	22%	35%	22%	34%	17%	26%	35%	43%	33%	37%
<b>n</b>	17	17	13	13	16	16	19	19	23	23
	----- Al trocável (Cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) -----									
<b>Média</b>	0,08	0,01	0,08	0,02	0,11	0,01	0,24	0,07	0,24	0,10
<b>Mínimo</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Máximo</b>	0,50	0,10	0,80	0,10	0,60	0,20	1,70	0,30	1,10	0,60
<b>Erro padrão</b>	0,04	0,01	0,06	0,01	0,04	0,01	0,10	0,02	0,07	0,04
<b>Desv. Padrão</b>	0,15	0,03	0,22	0,04	0,18	0,05	0,43	0,10	0,32	0,18
<b>CV (%)</b>	199%	282%	259%	244%	166%	400%	180%	135%	133%	177%
<b>n</b>	17	17	13	13	16	16	19	19	23	23

<sup>(1)</sup> Sistemas: 1) Monocultivo de arroz-pousio (testemunha, com preparo de solo); 2) SIPA arrozgado de corte; 3) SIPA em rotação soja/arroz – gado de corte; 4) SIPA, em rotação pastagem cultivada/soja – gado de corte; 5) Pastagem cultivada e pastagem natural.

A variabilidade dos teores de MO do solo ao longo do tempo (**Tabela 3**) foi semelhante ao comportamento do alumínio, com aumento nos teores de MO em todos os sistemas. Os valores de desvio padrão indicam uma menor dispersão dos valores em relação à média nos Sistemas 3 e 5. Embora tenha se encontrado valores semelhantes na evolução do erro padrão entre os

tratamentos, o Sistema 5 apresentou a menor variação (aumento de 54%), enquanto que o Sistema 2 apresentou a maior (90% de aumento do erro padrão da média), demonstrando ser o sistema mais distinto para esse atributo. Os valores de CV encontrados foram muito superiores aos calculados para o pH. Os maiores valores de CV encontrados para a variável MO foram no Sistema 4 (43%), seguido pelo Sistema 5 (37%), enquanto que o menor valor foi verificado no Sistema 3 (26%).

Em função da correção da acidez do solo realizada na implantação do experimento, o alumínio trocável (Al) apresentou valores baixos no ano de 2015. As maiores médias foram encontradas nos Sistemas 4 e 5, atingindo valores de  $0,07$  e  $0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente, com quantidades inferiores a  $0,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nos demais sistemas. Por esse motivo, os valores obtidos de desvio e erro padrão da média foram igualmente baixos e inferiores aos do ano de 2013, e, por consequência, os valores de CV foram muito altos, variando de 133% a 400%.

A evolução dos atributos químicos do solo ao longo do tempo foi afetada pelos diferentes sistemas impostos (**Tabela 4**). A ausência de diferenças no pH no ano de 2013 demonstra homogeneidade inicial da área para este atributo, apresentando um valor de pH médio de 5,5. No entanto, dois anos e sete meses após a implantação do experimento se verificou o efeito dos diferentes sistemas. Partindo-se do fato de que todos os sistemas aumentaram seu pH para 6,0, após a calagem, o Sistema 1 foi o que apresentou menor redução do pH ao longo do tempo, com o valor de pH 5,7, sendo superior ( $p < 0,05$ ) aos Sistemas 4 e 5, os quais apresentaram pH 5,3. Os Sistemas 2 e 3 apresentaram reduções intermediárias, mantendo seus valores de pH em 5,5, sem se diferir significativamente dos demais sistemas. Dessa maneira, os Sistemas que apresentaram maiores reduções do pH, inclusive estando inferior ao início do experimento ( $p < 0,05$ ), foram os sistemas 4 e 5, com redução do pH de 5,5 para 5,3.

**Tabela 4.** Evolução dos valores de pH, teor de matéria orgânica (MO) e Al trocável de maio de 2013 a outubro de 2015, nos diferentes sistemas integrados de produção agropecuária testados no protocolo experimental SIPA terras baixas – Cristal/RS.

Ano	Sistemas <sup>(1)</sup>					Média
	1	2	3	4	5	
<b>pH</b>						
<b>2013</b>	5,5	5,4	5,5	5,5 A	5,5 A	5,5
<b>2015</b>	5,7 a	5,5 ab	5,5 ab	5,3 Bb	5,3 Bb	5,4
<b>Média</b>	5,6	5,4	5,5	5,4	5,4	
<b>MO (%)</b>						
<b>2013</b>	1,94	1,75 B	1,84 B	1,83 B	1,61 B	1,81
<b>2015</b>	2,23	2,18 A	2,33 A	2,34 A	2,19 A	2,27
<b>Média</b>	2,10	2,00	2,08	2,08	1,93	
<b>Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>						
<b>2013</b>	0,08	0,08	0,11	0,24	0,24	1,15 A
<b>2015</b>	0,01	0,02	0,01	0,07	0,10	0,04 B
<b>Média</b>	0,04	0,05	0,06	0,15	0,17	

<sup>(1)</sup> Sistemas: 1. Monocultivo de arroz-pousio (testemunha, com preparo de solo); 2. SIPA arrozgado de corte; 3. SIPA em rotação soja/arroz – gado de corte; 4. SIPA, em rotação pastagem cultivada/soja – gado de corte; 5. Pastagem cultivada e pastagem natural. Teste Tukey ( $p < 0,05$ ): Letras maiúsculas distinguem os anos dentro de cada tratamento; Letras minúsculas distinguem sistemas dentro de cada ano. Ausência de letras: diferenças não significativas.

Da mesma forma que o pH, os teores de MO foram influenciados pelos diferentes sistemas (**Tabela 4**). Embora não se tenha obtido diferenças significativas entre os sistemas no ano de 2013 e 2015, os mesmos influenciaram de forma distinta os acúmulos de MO. Com taxa de acúmulo anual de 0,12% de MO, o Sistema 1 foi o único que não demonstrou aumentos significativos nesse atributo ao longo do tempo analisado. Os demais sistemas progrediram significativamente ( $p < 0,05$ ) no tempo, com acréscimos anuais de 0,18%, 0,20%, 0,20% e 0,23% de MO, nos Sistemas 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

A disponibilidade do Al trocável decresceu ao longo do tempo, igualmente entre os diferentes sistemas (**Tabela 4**), em média 1,11 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Embora haja certa tendência de acréscimo do teor de Al com aumento da diversidade do sistema e intensidade e frequência do animal, os teores



encontrados trinta meses após a calagem são baixos, com maior valor encontrado no Sistema 5, com média de  $0,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .

#### 4.4 Discussão

Uma das maneiras mais eficientes de se quantificar a variabilidade de atributos químicos do solo é através do CV. Segundo Wilding & Drees, (1983), os quais propuseram uma classificação a partir do levantamento das variabilidades do solo que ocorrem em unidades de paisagem, o pH e o teor de MO do solo possuem um CV baixo, com valores inferiores a 15% em relação às suas médias. De acordo com esses autores, considerando-se o atributo pH, todos os sistemas apresentaram baixos valores de CV, inferiores a 15% (**Tabela 3**). Em estudos com condições semelhantes, realizado em terras baixas com cultivo convencional de arroz irrigado, Parfitt et al. (2009) também classificaram esse atributo como de baixa variabilidade. O pH é um atributo com uma faixa de mudança muito restrita na condição natural do solo, principalmente por ser disposto em escala logarítmica, e por isso, em geral, acaba apresentando baixa variabilidade. Entretanto, ainda assim pode promover efeitos significativos.

Embora o teor de MO seja um atributo normalmente encontrado em uma faixa de variabilidade baixa (CV <15%) (Parfitt et al., 2009; Wilding & Drees, 1983), em decorrência do revolvimento do solo e conseqüente incremento homogêneo de carbono orgânico, no presente estudo, os Sistemas 1, 2 e 3 apresentam uma variabilidade média ( $15 \leq \text{CV} \leq 35\%$ ), enquanto que os Sistemas 4 e 5 apresentaram alto valor de CV (**Tabela 3**), indicando uma alta variabilidade, com valor de CV superior a 35%. Assim, embora os diferentes arranjos de SIPA tenham proporcionado maior variabilidade espacial dos atributos químicos do solo (**Figura 2, Tabela 3**), os Sistemas 4 e 5 promoveram maior variabilidade do teor de MO. O Sistema 4 e 5, por serem os que apresentam maior diversidade do componente vegetal e maior frequência do animal no sistema, representam os arranjos com maior potencial de indução de variabilidade. Com base nisso, sabe-se que a variabilidade desses componentes são pontos chave para estimular o solo em seus vários níveis hierárquicos a partir da influência direta das plantas sobre os seus

componentes e suas complexas interações (Anghinoni et al., 2013; Kirschenmann, 2007).

A frequente e intensa presença do animal no Sistema 5, nos períodos hibernais e estivais, desde o início do experimento, além da maior diversidade de espécies encontradas no campo de sucessão, foram os principais fatores responsáveis pela maior variabilidade encontrada nesse Sistema. A principal fonte de variação desse compartimento ocorre através da distribuição de dejetos (fezes e urina), os quais são depositados de forma inconstante e desuniforme, influenciando a concentração de nutrientes e a comunidade microbiana no solo (Augustine & Frank, 2001; McNaughton, 1985; Chávez et al., 2011). Aliado a isso, os animais podem indiretamente influenciar os atributos do solo através da mudança dos padrões de vegetação, em consequência do processo de seleção no pastejo (Olofsson, 2008). O pastejo seletivo ocorre tanto por características do pasto, quanto pela sua acessibilidade (Laca et al., 1994; Carvalho et al., 2001), e pelo evitamento de áreas contaminadas por fezes e urina, caracterizando as áreas de rejeição (Willms et al., 1988). Em consequência disso, essa variabilidade da pastagem influencia a disposição dos dejetos pelos animais, redistribuindo de forma concentrada o retorno dos nutrientes ao solo (Auerswald et al., 2010).

Além de ser o principal promotor da variabilidade do solo, o animal também pode atuar como um importante agente acidificante. Em decorrência disso, os sistemas contemplados com a maior frequência do animal (Sistema 4, com dois ciclos de pastejo de inverno e um ciclo no verão e Sistema 5, com ciclos contínuos de pastejo no período hibernar e estival) já apresentaram mudança em um dos atributos de acidez, com redução no pH em relação aos demais sistemas ao longo do tempo ( $p < 0,05$ ) (**Tabela 4**). Embora não haja grande exportação de cátions básicos pela carne (Haynes & Williams, 1993), a principal contribuição do animal no processo de acidificação é pela urina. No fluxo da urina pelo perfil do solo é comum ocorrer nitrificação, havendo lixiviação de nitrato, restando  $H^+$  na superfície (Bolan et al., 1991). Assim, mesmo o esterco animal tendo potencial de aumentar o pH de solos ácidos (Eghball, 1999; Whalen et al., 2000), o resultado final é a acidificação do solo, principalmente pela maior frequência e distribuição da urina em relação às fezes ao solo. Em contrapartida, a ausência do animal no sistema e o cultivo

somente no período estival, proporcionou menores reduções no valor de pH ao longo do tempo no Sistema 1. Segundo Martins et al. (2016), a época de amostragem é uma condição fundamental, principalmente em SIPA, em que os diferentes cultivos afetam diferentemente a dinâmica de acidez. Além disso, estudos como o de Martins et al. (2014), demonstram que, apesar da redução de pH em SIPA, os efeitos prejudiciais causados pela fitotoxidez do alumínio não são identificados, provavelmente pelo efeito benéfico da complexação desse elemento pela MO, corroborando os resultados do presente estudo em que, mesmo havendo reduções do pH, o Al trocável ainda não apresentou aumentos significativos (**Tabela 4**).

Além da frequente presença dos animais, os Sistemas 4 e 5 também contam com diversa população de leguminosas compondo o sistema, através do consórcio do azevém com o trevo branco (Sistema 4), e também com o cornichão (Sistema 5). Diversos estudos demonstram o poder acidificante de leguminosas, decorrente da maior absorção de cátions, gerando uma maior liberação de prótons  $H^+$  para o meio, a fim de não desbalancear o pH das células e provocar distúrbios fisiológicos (Raven, 1985). Assim, há, de forma indireta, indução de acidez ativa quando do cultivo de leguminosas fixadoras de nitrogênio (Bolan et al., 1991), pela maior absorção de cátions (Vitti & Trevisan, 2000). Além dos fatores supracitados, o aumento do teor de MO do solo influencia indiretamente o pH do meio (Pavinato & Rosolem, 2008). Grande parte dos ácidos orgânicos possui caráter aniônico, pela predominância de cargas negativas geradas a partir da dissociação do  $H^+$ , o qual é liberado para o meio proporcionando diminuição do pH do solo (Sposito, 1989).

O sucesso da adoção da semeadura direta em ambientes tropicais e subtropicais de terras altas já é bastante difundido em diversos estudos, os quais relatam maiores acúmulos de MO em semeadura direta quando comparados a sistemas convencionais de cultivo (Bayer et al., 2006b; Zanatta et al., 2007). Como identificado no presente estudo, com exceção do Sistema 1, conduzido por manejo convencional, todos os demais SIPA, manejados em semeadura direta, apresentaram aumento significativo no teor de MO do solo a curto prazo (**Tabela 4**). Além desse aumento, é importante ressaltar que isso acontece com incrementos crescentes conforme o grau de diversificação do sistema. De acordo com Conceição et al., (2013), o potencial de acúmulo de

carbono no solo em ambiente subtropical depende não só da conversão à semeadura direta, mas também do arranjo do sistema de cultivo. A semeadura direta influencia a estabilização da MO pela redução da decomposição, mas a escolha dos diferentes arranjos que irão compor o sistema tem grande importância por influenciar as adições e consequentes estoques de carbono no solo. O acúmulo de MO tem influência direta dos fluxos de matéria e energia no solo (Anghinoni et al., 2013). Por isso, esse atributo está estritamente relacionado com características microbiológicas do solo, as quais podem ser consideradas indicadores de qualidade (Dick, 1997). Em estudo realizado no mesmo protocolo experimental, Martins et al., 2017 identificaram maior atividade enzimática no Sistema 5, sendo o único a se assemelhar a uma área de mata nativa, utilizada como testemunha. Isso demonstra que sistemas mais diversificados, com menor ação antrópica e intervenções mecânicas, e maior diversidade de componentes vegetais contribuem para melhoria da qualidade do solo em ambientes de terras baixas, com tradicional cultivo do arroz (Martins et al., 2017).

Mesmo havendo incrementos significativos no teor de MO do solo, todos os sistemas ainda apresentam teor baixo desse atributo ( $\leq 2,5\%$  - CQFS, 2016). A MO desempenha um papel fundamental na manutenção das funções do solo, além de ser a principal fonte de nutrientes para a solução do solo (Pavinato & Rosolem, 2008). Nesse sentido, em ambientes de terras baixas, os quais apresentam uma baixa fertilidade natural (Pinto et al., 2004), a adoção de práticas conservacionistas, com maior diversidade de culturas e cultivos, como as encontradas em SIPA são de extrema importância (Anghinoni et al., 2013), a fim de garantir uma maior sustentabilidade do sistema e menor dependência de insumos externos.

#### **4.5 Conclusões**

A adoção de sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas promove maior variabilidade espacial dos atributos MO e pH do solo. A maior frequência e intensidade da presença do animal no sistema, assim como a diversidade de espécies vegetais, intensifica o aumento da acidez ativa do solo, sem promover aumento nos teores de Al trocável. A

utilização da semeadura direta garante maior acúmulo de MO no curto prazo, sendo a diversidade de espécies e a frequência da presença do animal no sistema um fator determinante para possibilitar maiores acúmulos de carbono em ambientes com baixa fertilidade natural.

## **5. CAPÍTULO IV – ESTUDO 2: ZERO TILLAGE AND WINTER GRAZING CONTRIBUTE TO DECREASE FERTILIZER REQUIREMENT OF IRRIGATED RICE**

(submetido para o periódico científico *Field Crops Research*)

### **5.1 Introduction**

The requirements to increase global food production are well known and projected to be double by the year 2050, when Earth population should reach nine billion people (FAO, 2016). According to Alexandratos and Bruinsma (2003), the current yearly increase of corn, soybean and rice production, which are three of the most important grain crops cultivated in the world, are insufficient and must increase 67, 55 and 42%, respectively, to attend the rising demand. This requirement will have to be achieved by using less land, water, labor, and chemicals (Khush, 2000). There are only a few plausible options capable to reach increases in production: using the remaining agricultural land, increasing external inputs use efficiency (fertilizer, water, energy, and pesticides), or higher yields by optimization of land use (Bray F., 1994). In this context, rice is the crop with the greatest growing potential. Worldwide, rice corresponds to 29% of grain consumption, being the staple food on half of the population diet in developing countries (Alexandratos and Bruinsma, 2003).

Excepting the Asian continent, Brazil is the country with the highest rice production, which is mainly at lowlands and floodplains in the subtropics (Southern region) (FAOSTAT, 2013). The State of RS represents 68% of Brazilian rice production, where the traditional rice cropping system includes yearly soil tillage and fallow periods, perhaps combined with extensive and

inefficient livestock exploitation (SOSBAI, 2014). Thus, gains in rice production will come entirely from greater yields, following a 35 years trend, in which rice cultivated area increased only 36.2%, and rice production increased 253% (Alexandratos and Bruinsma, 2003).

Traditional irrigated rice production system is highly influenced by management practices, with fertilizer playing a key factor to raise yields (Boeni et al., 2010). Over time, the traditional cropping system can affect soil characteristics and rice yields. Long-term and intensive cultivation of rice with periodical flooding, affect the dynamics of chemical, physical and biological attributes (Bado et al., 2010) and decrease rice yields (Cassman et al., 1995; Flinn and De Datta, 1984). In this context, several alternatives are envisioned for the future of Brazilian lowland agriculture, such as conservation management practices (e.g., zero or minimum tillage), integration of crops and efficient and sustainable livestock exploitation. Furthermore, these alternatives can result in a higher soil quality, better regulation of biogeochemical cycles and higher equilibrium between inputs and outputs, consequently, increasing rice yield without relying on suitable fertilizer application (Hendrickson et al., 2008; Ryschawy et al., 2012; Lemaire et al., 2014; Lal, 2015).

Conservation management practices can lead to great eco-efficiency that consists in better use of resources and, in this case, nutrients supplied as fertilizers. High soil fertility levels can be achieved by rationally use in fertilizer management (Keating et al., 2010). The expectation of fertilizer response is the main criteria to perform rice fertilizer recommendation in Southern Brazil (SOSBAI, 2014), which means that a greater eco-efficiency is aimed. Considering the current fertilizer recommendation, the yield gap related to plant nutrition can be avoided, moreover when crop production and soil inputs are optimized. Zero tillage practices are essential for a soil conservative management; perhaps, in paddy fields it has resulted in variable rice yields as an outcome of poor knowledge of soil dynamics (Kumar and Ladha, 2011). However, understanding the nutrient cycling processes by the adoption of conservative management practices, as well as integrated crop-livestock, is of substantial importance to achieve agricultural sustainability (Carvalho et al., 2010).

Integrated crop-livestock systems appear as a good alternative to increase eco-efficient managements in rice lowlands, because of its benefits in soil structure, fertility, organic matter and microbial biomass (Carvalho et al., 2010; Moraes et al., 2014). Besides that, fertilizing short-season pastures can optimize fertilizer use, determined by nutrient cycling through grazing, generating sustainability for the system (Assmann et al., 2003; Carvalho et al., 2010). Comparing integrated systems with continuous cropping systems (García-Préchac et al., 2004), the crop-pasture rotations were economically and environmentally more sustainable, since fuel and agrochemical usage were 50% lower.

The objective of this study was to evaluate the impact of soil conservative management system (zero tillage and winter grazing), under different fertilization levels, on irrigated rice nutrition, yield and nutrient use efficiency.

## 5.2 Material and Methods

The description and characterization of the experiment were presented in Item 3. This study was developed in two of the five studied systems during the 2015/2016 rice growing season: 1) Conventional System (CS) and Integrated System (IS). The first one (CS) is the dominant system in lowlands of Southern Brazil; it is based on intensive tillage, monocropping and fallow period during the winter. The Integrated System, is characterized by zero tillage adoption and integration between crop and livestock, with grazing during the winter season with annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) pasture. Since the first rice growing season (2013/2014), higher grain yield was observed under IS than CS (14.0 and 12.1 tons ha<sup>-1</sup> in 2013/2014 and 11.2 and 9.1 tons ha<sup>-1</sup>, respectively), which was the main reason to perform the current study.

Neutered male steers (Angus) weighing around 200 kg were used for grazing in IS. Average pasture height preconized was 15 cm and average stocking was 831±114 kg live weight ha<sup>-1</sup>, simulating a cattle fattening or finishing system during 62±15 days. Cattle's feeding was forage-based with only mineral salt being provided. A continuous grazing was adopted (with a



minimum of three test steers), and annual ryegrass was re-sowed at a density of 30 kg ha<sup>-1</sup> using the cv. BRS Ponteio. The fertilization was according to CQFS RS/SC (2004) recommendation with 110-110-100, 130-130-130 and 120-120-120 kg ha<sup>-1</sup> of N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O in 2013, 2014 and 2015 winter seasons, respectively. The fertilization in the summer seasons was according to SOSBAI (2012, 2014) recommendation with 150-70-120 kg ha<sup>-1</sup> of N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O in 2013, 2014 and 2015.

### 5.2.1 Treatments and experimental design

In October 2015, soil was sampled for chemical characterization of both CS and IS treatments (**Table 5**). Soil sampling was performed in representative plot sites with five subsamples at random in the studied systems. After this, the experimental area in both systems was splitted for the application of five different fertilization levels based on different expected response to fertilization of irrigated rice, according to SOSBAI (2014). Fertilization levels were arranged in the main plots in a split plot design with four blocks. The experimental plot size was 5 × 5 m, totalizing 40 plots (two irrigated rice cropping systems vs five fertilization levels vs four replicates).

**Table 5.** Soil chemical attributes (0-20 cm layer) in different irrigated rice production systems after 30 months of its adoption, immediately before the addition of fertilization levels for the irrigated rice of 2015/2016 growing season.

Irrigated rice production system	OM <sup>(1)</sup>	pH <sup>(2)</sup>	P <sup>(3)</sup>	K <sup>(3)</sup>	Al <sup>(4)</sup>	Ca <sup>(4)</sup>	Mg <sup>(4)</sup>	CEC <sup>(5)</sup>	Base saturation
	-- % --		---- mg kg <sup>-1</sup> ----		----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----			----- % -----	
Conventional <sup>(6)</sup> (October 2015)	1.9	5.6	30	90	0.0	4.8	2.2	11.1	65
Integrated <sup>(7)</sup> (October 2015)	2.3	5.8	33	123	0.0	3.7	1.7	8.1	70

<sup>(1)</sup> Organic matter (Walkley-Black method); <sup>(2)</sup> pH in water, 1:1 ratio; <sup>(3)</sup> Available phosphorus (P) and potassium (K) (Mehlich 1 method); <sup>(4)</sup> Exchangeable aluminum (Al), calcium (Ca) and magnesium (Mg) (KCl 1 mol L<sup>-1</sup> method); <sup>(5)</sup> Cation exchange capacity at pH 7.0; <sup>(6)</sup> Conventional system = Tillage performed in autumn after every rice harvest, remaining under fallow period during the winter; <sup>(7)</sup> Integrated system = Rice cultivated under zero tillage and with a winter grazing season in a pasture of annual ryegrass.

Fertilization levels corresponded to different fertilizer rates (in  $\text{kg ha}^{-1}$  of N- $\text{P}_2\text{O}_5$ - $\text{K}_2\text{O}$ ), according with SOSBAI (2014): (i) no-fertilizer application; (ii) low expected response to fertilization, with 60-20-20; (iii) medium expected response to fertilization, with 90-30-35; (iv) high expected response to fertilization, with 120-40-50 and (v) very high expected response to fertilization, with 150-50-65, respectively. The fertilizers used were urea (46% N), single superphosphate (18%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) and potassium chloride (60%  $\text{K}_2\text{O}$ ). The N rates were splitted in two applications: 66% applied at V3 phenological rice stage, immediately before flooding and 33% applied at V8 phenological rice stage. The rice stages were determined according to Counce et al. (2000).

In both systems, the rice cultivar used was IRGA 430, seeded at a density of  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  and 17 cm row spacing. Sowing and harvest occurred in November 2015 and April 2016, respectively. Agronomic management was in according to the technical recommendations of SOSBAI (2014), for weed, insects and diseases control.

### 5.2.2 Plant analyses

The first plant sampling occurred at R2-R3 rice stage (which corresponded the flag leaf collar formation and panicle exertion from boot, respectively) (Counce et al., 2000), to evaluate the nutritional status, nutrient accumulation and shoot dry matter. For crop nutritional status evaluation, 50 rice flag leaves were collected per experimental plot and, for nutrient accumulation and shoot dry matter evaluation, whole rice plants were cut from the ground level in three lines of 30 cm per plot (total of  $0.15 \text{ m}^2$ ) at the beginning flowering. Samples were oven-dried (forced air in a temperature of  $65^\circ\text{C}$ ), weighed with analytical balance, milled and sieved ( $\varnothing = 0.5 \text{ mm}$ ). N, P and K content in plant tissue (from flag leaves and whole plants) were analyzed after chemical digestion ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ), according to Tedesco et al. (1995). Nutrient accumulation was calculated using data obtained from the whole plants, according to the following equation: nutrient accumulation (in  $\text{kg ha}^{-1}$ ) = shoot nutrient content (in  $\text{g kg}^{-1}$ )  $\times$  shoot dry matter (in  $\text{tons ha}^{-1}$ ) (Equation 1).

The second and last plant sampling occurred at R7-R8 rice stage (which corresponded to at least one grain on the main stem panicle had a yellow and brown hull, respectively) (Counce et al., 2000) to determine grain yield. Harvests were performed by hand with plants sampled in three lines of 2 m per plot (total of 1.02 m<sup>2</sup>). After, samples were threshed, cleaned and weighed using analytical balance. Grain moisture was determined and adjusted to 130 g kg<sup>-1</sup>.

The N, P and K use efficiency was obtained by determining the amount of accumulated nutrient is necessary to produce one ton of rice grain. The following equation was used: nutrient use efficiency (in kg ton<sup>-1</sup>) = nutrient accumulation (in kg ha<sup>-1</sup>) / grain yield (in tons ha<sup>-1</sup>) (Equation 2).

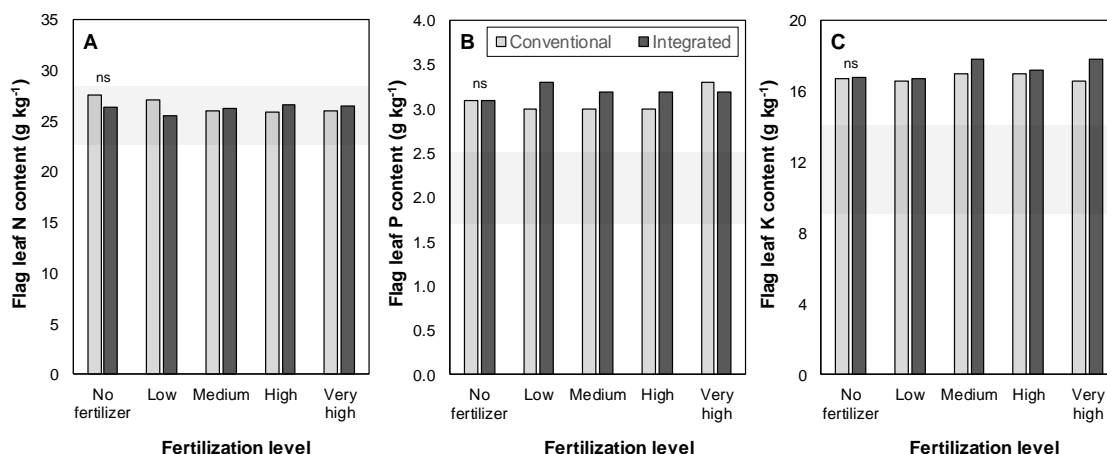
### 5.2.3 Statistical analysis

Statistical analysis was performed using linear models (PROC GLM) of the Statistical Analysis System (SAS Institute, 1997). Data were submitted to Shapiro-Wilk normality test ( $p < 0.05$ ) and analysis of variance (ANOVA), for split-plot design at  $p < 0.05$ , and, when significant, compared by Tukey test ( $p < 0.05$ ).

## 5.3 Results

### 5.3.1 Nutritional status and nutrient accumulation

The different input rates of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O fertilizer did not affect ( $p > 0.05$ ) the nutritional status of rice, measured in the flag leaf (**Figure 3**) and of both production rice systems also remained similar. The nutrient content in flag leaf presented averages of 26.4 g N kg<sup>-1</sup>, 3.1 g P kg<sup>-1</sup> and 17.0 g K kg<sup>-1</sup>.



**Figure 3.** Flag leaf nitrogen (A), phosphorus (B) and potassium (C) contents at R2/R3 stage 2015/2016 growing season, affected by fertilization levels of different irrigated rice production systems. The range highlighted in gray corresponds to the crop adequate nutritional status. Conventional system = Tillage performed in autumn after every rice harvest, remaining under fallow period during the winter. Integrated system = Rice cultivated under zero tillage and with a winter grazing season in a pasture of annual ryegrass. The fertilization level was based on different crop response to fertilization, according to SOSBAI (2014), being (as N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) 60-20-20, 90-30-35, 120-40-50 and 150-50-65 for low, medium, high and very high, respectively. The “ns” indicates absence of statistical difference according to ANOVA test (p>0.05).

Despite of no differences in nutrient content measured in rice flag leaf (**Figure 3**), nutrient accumulation in the whole plant at R2/R3 stage was different among the production systems and fertilization levels (**Table 6**). For N, different fertilization levels effect was only verified under CS. In such system, the higher response was obtained at Low fertilization level, achieving an increase of 65% as compared with No fertilizer addition. However, N content in that fertilization level did not differ from Medium and High fertilization ones. On the other hand, at Very high level of fertilization, there was a decrease in N accumulation, becoming similar to the No-fertilizer treatment. In IS, only Medium and Very high fertilization levels showed higher values than the No-fertilized treatment. Despite the tendency of all evaluated fertilization levels to be greater in CS than in IS, an increase of N accumulation (p<0.05) was only observed at Low and High fertilization levels, with 52 and 33 kg N ha<sup>-1</sup>, respectively (**Table 6**).

**Table 6.** Nitrogen, phosphorus and potassium accumulation in shoot dry matter at R2/R3 stage at of 2015/2016 growing season of irrigated rice affected by fertilization of different production systems.

Production system	Fertilization level <sup>(1)</sup>					Average
	No-fertilizer	Low	Medium	High	Very high	
----- Nitrogen (kg ha <sup>-1</sup> ) -----						
Conventional <sup>(2)</sup>	90 Ab	149 Aa	137 Aa	134 Aa	125 Aab	127
Integrated <sup>(3)</sup>	76 Ab	97 Bab	134 Aa	101 Bab	124 Aa	106
Average	83	133	135	117	124	
----- Phosphorus (kg ha <sup>-1</sup> ) -----						
Conventional <sup>(2)</sup>	29 Ab	42 Aa	36 Aab	33 Aab	41 Aab	36
Integrated <sup>(3)</sup>	28 Aa	31 Ba	36 Aa	33 Aa	30 Ba	31
Average	29	36	36	33	36	
----- Potassium (kg ha <sup>-1</sup> ) -----						
Conventional <sup>(2)</sup>	179	233	213	189	214	206 A
Integrated <sup>(3)</sup>	160	190	202	170	194	183 B
Average	169 a	212 a	207 a	180 a	204 a	

<sup>(1)</sup> Based on different crop response to fertilization, according to SOSBAI (2014), being (as N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) 60-20-20, 90-30-35, 120-40-50 and 150-50-65 for Low, Medium, High and Very high fertilization level, respectively. <sup>(2)</sup> Conventional system = Tillage performed in autumn after every rice harvest, remaining under fallow period during the winter. <sup>(3)</sup> Integrated system = Rice cultivated under zero tillage and with a winter grazing season in a pasture of annual ryegrass. Tukey's test ( $p < 0.05$ ): Lower case letters distinguish the fertilization levels in each irrigated rice production system; upper case letters distinguish irrigated rice production systems in each fertilization level.

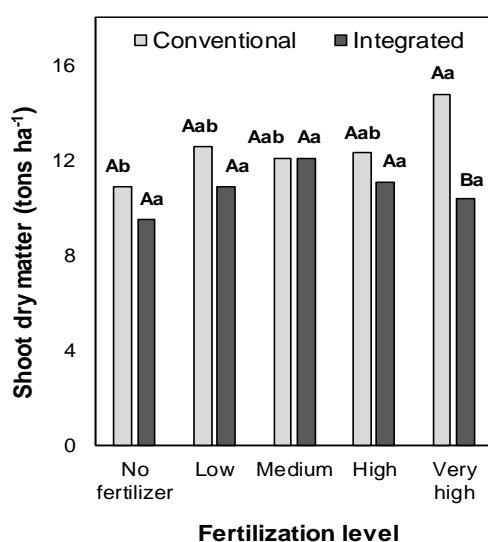
The P accumulation in shoot dry matter in CS showed responses depending for different fertilization levels. Again, the Low fertilization level caused the higher response, increasing approximately 45% of P accumulation compared to the No fertilized treatment. There was in that production system (CS) similar behavior of N and P accumulation, (significant differences only in Low and Very high fertilization levels). In these fertilization levels, there was more 11 kg P ha<sup>-1</sup> in CS as compared to IS (**Table 6**).

Regarding K accumulation, there was no differences among fertilizer levels, but single effect among productions systems: Conventional one accumulating 23 kg K ha<sup>-1</sup> more than the Integrated system (**Table 6**).

### 5.3.2. Shoot dry matter and grain yield

It is expected that variations in N, P and K accumulation would be directly related to shoot dry matter, since nutrient accumulation take it into account (Equation 1). However, shoot growth was not affected by fertilization

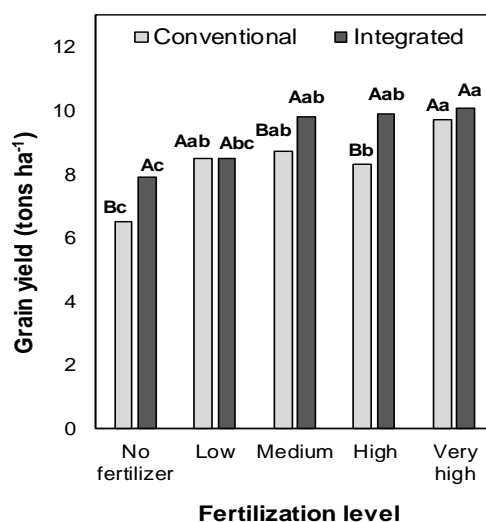
levels in the IS, presenting an average of 10.8 tons ha<sup>-1</sup> (**Figure 4**). In contrast, the increase of fertilization levels under CS resulted in an increase of shoot dry matter production. In this system, the Very high fertilization level resulted in a production approximately 50% higher than the control (No fertilized). The Low, Medium and High fertilization levels presented a similar shoot biomass, not differing from the others fertilization levels. Differences between the production systems were observed only in the Very high fertilization level, resulting in an increase of 0.5 ton ha<sup>-1</sup> in CS when compared to IS (**Figure 4**).



**Figure 4.** Irrigated rice shoot dry matter affected by fertilization levels at R2/R3 stage of 2015/2016 growing season of different production systems. Conventional system = Tillage performed in autumn after every rice harvest, remaining under fallow period during the winter. Integrated system = Rice cultivated under zero tillage and with a winter grazing season in a pasture of annual ryegrass. The fertilization level was based on different crop response to fertilization, according to SOSBAI (2014), being (as N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) 60-20-20, 90-30-35, 120-40-50 and 150-50-65 for Low, Medium, High and Very high, respectively. Tukey's test ( $p < 0.05$ ): Lower case letters distinguish the fertilization levels in each irrigated rice production system; upper case letters distinguish irrigated rice production systems in each fertilization level.

Increment in rice yield due to different fertilization levels was observed in both production systems (**Figure 5**). In the CS, all the fertilizer rates applied were higher than No-fertilizer treatment and the highest yield (9.7 tons ha<sup>-1</sup>) obtained with the Very high fertilization level, was 3.2 tons ha<sup>-1</sup> higher than

the treatment without fertilization. The Low and Medium fertilization levels showed intermediated values of 8.5 and 8.7 tons ha<sup>-1</sup>, respectively, not being different than the other fertilization levels. However, the High fertilization level was lower than the highest (Very high) fertilization level, with a grain yield of 8.3 tons ha<sup>-1</sup>.



**Figure 5.** Irrigated rice grain yield affected by fertilization levels at R2/R3 stage at 2015/2016 growing season of different production systems. Conventional system = Tillage performed in autumn after every rice harvest, remaining under fallow period during the winter. Integrated system = Rice cultivated under zero tillage and with a winter grazing season in a pasture of annual ryegrass. The fertilization level was based on different crop response to fertilization, according to SOSBAI (2014), being (as N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) 60-20-20, 90-30-35, 120-40-50 and 150-50-65 for Low, Medium, High and Very high, respectively. Tukey's test ( $p < 0.05$ ): Lower case letters distinguish the fertilization levels in each irrigated rice production system; upper case letters distinguish irrigated rice production systems in each fertilization level.

On the other hand, the grain yield of irrigated rice under IS did not show response ( $p > 0.05$ ) to the different fertilizer levels (**Figure 5**). In such production system, the Low fertilization level produced 8.5 tons ha<sup>-1</sup> and was not different from the control (7.9 tons ha<sup>-1</sup>). The Medium and the High fertilization levels presented intermediate and similar grain yields (9.8 and 9.9 tons ha<sup>-1</sup>, respectively) compared to Low and Very high fertilization levels. The

Very high fertilization level showed the highest grain yield ( $10.1 \text{ tons ha}^{-1}$ ) and was higher than the control (No-fertilized) and Low fertilization level.

Finally, the IS showed higher values in relation to the CS in the most of the evaluated fertilization levels, excepting for the Low and Very high fertilizer rates. In the absence of fertilization, in the Medium fertilization and High fertilization levels, the increases were of  $1.4$ ,  $1.1$ , and  $1.6 \text{ tons ha}^{-1}$ , respectively (**Figure 5**).

### 5.3.3 Nutrient use efficiency

The nutrient use efficiency (**Table 7**) of the evaluated production systems and fertilization levels was evaluated by determining how much N, P and K is necessary to accumulate in shoot per each ton of grain produced (Equation 2). Only for N, efficiency was affected by the interaction of fertilization levels and production systems. For P and K, there was only single effect, with higher efficiency in Integrated system, once a ton of grain can be produced with smaller amounts of these nutrients in the shoot (**Table 7**): it was needed 30% less for P and 25% less for K. For N, the efficiency was higher at lower fertilization rates (No and Low fertilization) and High Fertilization level, and similar in the others level (Medium and Very high).

**Table 7.** Nitrogen, phosphorus and potassium accumulated in shoot per ton of grain produced at R2/R3 stage in 2015/2016 growing season as affected by fertilization levels on different rice production systems.

Production system	Fertilization level <sup>(1)</sup>					
	No-fertilizer	Low	Medium	High	Very high	Average
----- Nitrogen ( $\text{kg ton}^{-1}$ ) -----						
Conventional <sup>(2)</sup>	13.7 Aab	17.4 Aa	15.8 Aab	16.2 Aab	12.9 Ab	15.2
Integrated <sup>(3)</sup>	9.6 Bb	11.1 Bab	13.6 Aa	10.9 Bab	12.1 Aab	11.5
Average	11.7	14.2	14.7	13.6	12.5	
----- Phosphorus ( $\text{kg ton}^{-1}$ ) -----						
Conventional <sup>(2)</sup>	4.4	4.9	4.1	4.0	4.3	4.4 A
Integrated <sup>(3)</sup>	3.6	3.5	3.7	3.3	2.9	3.4 B
Average	4.0 a	4.2 a	3.9 a	3.7 a	3.6 a	
----- Potassium ( $\text{kg ton}^{-1}$ ) -----						
Conventional <sup>(2)</sup>	27.3	27.3	24.5	23.0	22.1	24.8 A



Integrated <sup>(3)</sup>	20.0	22.0	20.7	17.2	19.1	19.8 B
Average	23.7 a	24.6 a	22.6 a	20.1 a	20.6 a	

<sup>(1)</sup> Based on different crop response to fertilization, according to SOSBAI (2014), being (as N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) 60-20-20, 90-30-35, 120-40-50 and 150-50-65 for Low, Medium, High and Very high fertilization level, respectively. <sup>(2)</sup> Conventional system = Tillage performed in autumn after every rice harvest, remaining under fallow period during the winter. <sup>(3)</sup> Integrated system = Rice cultivated under zero tillage and with a winter grazing season in a pasture of annual ryegrass. Tukey's test (p<0.05): Lower case letters distinguish the fertilization levels in each irrigated rice production system; upper case letters distinguish irrigated rice production systems in each fertilization level.

## 5.4 Discussion

Intensive cereal cropping with continuously cultivated rice systems decline long-term yield (Cassman et al., 1995; Bado et al., 2010). Then, higher rates of N, P and K fertilizers are necessary to sustain high crop productivity (Yadav et al., 1998). In this study, the efficiency of IS in nutrients usage was higher than the conventional one and without winter grazing (**Table 7**), in agreement with Dalal et al. (2011) and Martins et al. (2014) studies. Greater nutrient use efficiency is also identified by the IS grain yield compared to CS in the No-fertilizer treatment (**Figure 5**). This can be related to higher content in organic matter (**Table 5**), mainly the labile fraction (Martins et al., 2017), and pasture residues as a result of the Integrated system with zero tillage and pasture fertilization under grazing in the winter, as also found by Schoenau and Campbell (1996), Diaz-Zorita et al. (2002), Bayer et al. (2006b) and Thomas et al. (2007). This would also explain similar yields (p>0.05) at No and Low fertilization rates and with fertilization levels over that the Medium rate in this system (**Figure 5**), demonstrating the nutrient efficiency that this system provides, saving up to 60 kg of N, 20 kg of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 30 kg of K<sub>2</sub>O in the irrigated rice. In contrast, the CS needs greater fertilization in the cash crop for similar yields.

From the flag leaf analysis, it was observed, in both systems (**Figure 3**), an adequate nutritional status for N (range for 23-28 g N kg<sup>-1</sup>) and above the adequate for P and K (> 2.5 g P kg<sup>-1</sup>, > 14 g K kg<sup>-1</sup>) in the flag leaf content (SOSBAI, 2014). This fact is probably due to the luxury consumption that rice has during the reproductive period, when the plant continues to absorb nutrients without added response in terms of plant growth or yield (Dobermann et al., 1996; Zou et al., 2001; Burgos et al., 2006).

In this sense, the results of this study are opposite of Dobermann et al. (2000); Burgos et al. (2006) and Gómez-Rey et al., (2012) that indicate that an increase of residue by ryegrass pasture and rice straw combined with the inclusion of the animal in the system can provide an immobilization of these nutrients, decreasing the nutrient availability for crops, avoiding the luxury consumption. On the other hand, even with lower accumulation of nutrients in the shoot dry matter, the IS rice produced as much or more grain yield than CS (**Figure 5**). Thus, these results demonstrate that IS is less susceptible to nutrients loss and less dependent on external inputs in the crop season. This can be observed in shoot dry matter production (**Figure 4**), P and K accumulation in shoot dry matter in IS (**Table 6**) and in plant nutritional status (**Figure 3**). These findings confirm the presumption that zero tillage and adoption of an integrated crop-livestock system are viable and sustainable alternatives to intensify Brazilian subtropics lowlands use.

The importance of adopting conservationist system in uplands is well established. However, in lowlands, studies of Kumar and Ladha (2011) have shown its benefits and alternatives to its viability. Furthermore, it is known that rice straw has no adverse effect on the subsequent rice crop (Beutler et al., 2014) and there is an importance on the microbial community in a submerged soil (Murase et al., 2006). However other studies (Cassman et al., 1995; Devêvre and Horwáth, 2000), demonstrate that, in double or triple cropped rice systems with sustained flooding, incorporating straw may reduce rice yields. Some other studies indicate that zero tillage and straw accumulation can temporarily immobilize nutrients (Bijay-Singh et al., 2008; Chávez et al., 2011; Gómez-Rey et al., 2012). In relation to fertilization, the nitrogen fertilizer was 66% applied in V3 stage, with the objective of stimulating tillering (plant growth). In CS, this N addition is mostly converted to plant growth. While in IS, the N dynamics may be different, once a greater immobilization of N by microorganisms due to organic matter accumulation and its C/N rate on plant residues (Bijay-Singh et al., 2008; Gómez-Rey et al., 2012). As a result, the added N can be initially less available to plant growth leading to lower dry matter production (**Figure 4**). In this way, it's possible to conclude that rice under IS is more efficient in converting N to grain, in comparison to CS, in which

rice invest more in plant growth. This can explain why rice under IS has similar or higher yields, but lower dry matter in relation to CS.

The relationship between grain yield and nutrient uptake reveals that P and K uptake to produce 1 ton of grain were classified as surplus (2.9-4.8 and 17-27 kg nutrient ton<sup>-1</sup> grain, respectively). According to Dobermann and Fairhurst (2000), the amount of N uptake to produce 1 ton of grain in CS could be classified as a nutritional optimum (14-16 kg nutrient ton<sup>-1</sup> grain) (**Table 7**) but less efficient than IS, that requires only 11-13 kg nutrient ton<sup>-1</sup> grain, and was classified as nutrient limited (Dobermann and Fairhurst, 2000). Therefore this indicate greater nutrient use efficiency in IS compared to CS. Due to this results, we can say that Dobermann and Fairhurst (2000) standards are correctly applied to conventional rice production systems, but new standards need to be developed to conservative management production rice systems, when nutrient cycling can be relevant by constantly furnishing nutrients along plant growth.

## 5.5 Conclusions

Integrated and conventional rice systems have different yields responses to fertilization levels. Zero tillage and winter grazing has higher yields compared to conventional system. This effect is evident especially when no fertilizer is applied. Conservative system had higher eco-efficiency in relation to conventional system, observed by the best use of nutrients, requiring smaller amounts of nutrient accumulation to produce the same quantity of grains. Therefore, new standards of nutrients required for conservative management rice systems. Zero tillage rice combined with winter grazing bring more sustainability to subtropics lowlands.

## **6. CONCLUSÕES GERAIS**

Os diferentes arranjos de sistemas agrícolas com o componente animal em terras baixas, constituindo um sistema integrado de produção agropecuária, promovem maior variabilidade espaço-temporal dos atributos MO e pH do solo, fomentando maior diversidade e complexidade ao sistema arrozeiro e tornando-o mais próximo a ecossistemas naturais. Além da variabilidade espacial, esses sistemas aceleram as mudanças e melhorias de atributos do solo no tempo, acarretando em maiores ganhos no teor de MO, com diminuição no pH sem aumentar as formas de Al tóxico e gerar danos na cultura de grãos. Essas diversas mudanças qualificam um sistema mais rico, com maior retroalimentação dos componentes que integram o sistema. Dessa forma, os cultivos demonstram menor dependência de insumos externos, como fertilizantes, demonstrado pela menor resposta em produtividade à aplicação de nutrientes, quando comparado a sistemas tradicionais de cultivo. Isso ocorre em consequência da obtenção de um solo com maior capacidade de fornecimento e de eficiência do uso de nutrientes. Esses fatores contribuem para garantia de maior eco-eficiência no uso de fertilizantes, possibilitando promover a intensificação sustentável do ambiente de terras baixas.

## **7. PERSPECTIVAS FUTURAS DE PESQUISA**

No sentido de avançar no entendimento da dinâmica e dos processos envolvidos em ambientes de terras baixas, sobretudo em áreas que contam com a inserção do componente animal (sistema integrado de produção agropecuária), além de levar a uma maior compreensão das respostas observadas na produtividade das culturas, servindo de subsídio para futuras recomendações específicas de adubação e calagem para tais sistemas em determinado ambiente, sugere-se os seguintes aprofundamentos e/ou estudos:

a) Avaliação da curva de resposta de sistemas com diferentes arranjos e níveis de adubação, objetivando compreender a relação entre o grau de complexidade do sistema com sua sustentabilidade e dependência de insumos externos;

b) Aprofundamento na compreensão da dinâmica dos principais macronutrientes em ambientes alagados em sistemas integrados de produção agropecuária;

c) Avaliação da dinâmica do nitrogênio em ambientes alagados, avaliando a influência de distintas fontes de resíduos de culturas e dejetos animais no ambiente;

d) Quantificação da efetiva contribuição dos resíduos das culturas e compostos orgânicos em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em ambientes alagados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective. **Land Use Policy**, London, v. 20, n. 4, p. 375, 2003.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alterações de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n. 4, p. 695-702, 2001.

AMBASSA-KIKI, R.; ABOUBAKAR, Y.; BOULAMA, T. Zero-tillage for rice production on Cameroonian Vertisols. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 39, p. 75–84, 1996.

ANDA. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. [2016]. Disponível em: <<http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00&ver=por>> Acesso em: 23 nov. 2016.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. C. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.8, 2013. p.325-380.

ASSMANN, J. M. et al. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, p. 1-13, 2017.

ASSMANN, J. M. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 52-59, 2014.

ASSMANN, T. S. et al. Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 675-683, 2003.

AUERSWALD, K.; MAYER, F.; SCHNYDER, H. Coupling of spatial and temporal pattern of cattle excreta patches on a low intensity pasture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 88, n. 2, p. 275–288, 2010.

AUGUSTINE, D. J.; FRANK, D. A. Effects of migratory grazers on spatial heterogeneity of soil nitrogen properties in a grassland ecosystem. **Ecology**, New York, v. 82, p. 3149–3162, 2001.

BADO, B. V.; AW, A.; NDIAYE, M. Long-term effect of continuous cropping of irrigated rice on soil and yield trends in the Sahel of West Africa. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 88, n. 1, p. 133–141, 2010.

BALBINOT Jr., A. A. et al. Winter pasture and cover crops and their effects on soil and summer grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1357-1363, 2011.

BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 31, p. 1471–1479, 1999.

BARDGETT, R. D.; WARDLE, D. A.; YEATES, G. W. Linking aboveground and below-ground interactions: how plant response to foliar herbivory influence soil organisms. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 30, n. 14, p. 1867-1878, 1998.

BARTHAM, G. T. Experimental techniques: the HFRO sward stick. In: HIFRO: The Hill Farming Research Organization Biennial Report 1984/1985. Penicuik: HFRO, 1986. p. 29-30.

BARTLETT, R. J., JAMES, B. R. Redox chemistry of soil. **Advances in Agronomy**, New York, v. 50, p. 151-208, 1993.

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, p. 217–226, 2006a.

BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 237–245, 2006b.

BEARE, M. H., A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. **Plant and Soil**, The Hague, v. 170, p. 5-22, 1995.

BELOBROV, V. P. Variation in some chemical and morphological properties of podzolic soils within the boundaries of elementary soil aeriols and taxonomic groups. In: FRIDMAN V. M. (Ed.) **Soil Combinations and their Genesis**. Amerind: New Delhi, 1976. p. 147-158.

BENDING, G. D. et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 36, p. 1785–1792, 2004.

BEUTLER, A. N. et al. Manejo do solo, palha residual e produtividade de arroz irrigado por inundação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 3, p. 1153–1162, 2014.

- BEUTLER, A. N. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1083-1091, 2012.
- BHUSHAN, L. et al. Saving of water and labor in a rice-wheat system with no-tillage and direct seeding technologies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 5, p. 1288–1296, 2007.
- BIJAY-SINGH et al. Chapter 3 Crop Residue Management for Lowland Rice-Based Cropping Systems in Asia. **Advances in Agronomy**, New York, v. 98, n. 08, p. 117–199, 2008.
- BIRCHAM, J. S. **Herbage growth and utilization under continuous stocking management**. 1981. 381 f. Tese (Doutorado) - University of Edinburgh, Edinburgh, 1981.
- BOENI, M. et al. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha/IRGA, 2010. (Boletim técnico, 8).
- BOHNEN, H. et al. Ácidos orgânicos na solução de um Gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 475-480, 2005.
- BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J.; WHITE, R. E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures, **Plant and Soil**, The Hague, v. 134 p. 53-63, 1991.
- BURGOS, N. R. et al. Competitive N uptake between rice and weedy rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2-3, p. 96–105, 2006.
- CAMARGO, F. A. de O. et al. Aspectos fisiológicos e caracterização da toxidez de ácidos orgânicos voláteis em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 523-529, 2001.
- CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n.1, p. 171–180, 1999.
- CARMONA, F. C. et al. Impact of long-term tillage systems on irrigated rice yield and soil properties. **Field Crops Research**, Amsterdam, 2017. (em revisão)
- CARVALHO, D. B. et al. Fertilidade do solo em integração lavoura-pecuária na região de Guarapuava/PR. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v. 3, p. 57-65, 2005.
- CARVALHO, J. R. P. et al. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p.1151-1159, 2002.
- CARVALHO, O. S. et al. Variabilidade espacial de algumas propriedades químicas e físicas de um solo submetido a diferentes sucessões de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 497-503, 1998.



- CARVALHO, P. C. et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 88, n. 2, p. 259–273, 2010.
- CARVALHO, P. C. F. et al. Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 5, p. 1040-1046, 2014.
- CARVALHO, P. C. F. Importância da estrutura da pastagem na ingestão e seleção de dietas pelo animal em pastejo. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38., 2001. Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBZ, 2001. p. 18
- CASSMAN, K. G. et al. Nitrogen use efficiency of rice reconsidered : What are the key constraints ?. **Advances in Agronomy**, New York, p. 359–362, 1993.
- CASSMAN, K. G. et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 56, p. 7-39, 1998.
- CASSMAN, K. G. et al., Yield decline and the nitrogen economy of long-term experiments on continuous, irrigated rice systems in the tropics. In: LAL, R.; STEWART, B. A. (Ed.). **Soil management: experimental basis for sustainability and environmental quality**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 181-222.
- CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 54-62, 2016.
- CHÁVEZ, L. F. et al. Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1254-1261, 2011.
- CEMETRS – CONSELHO ESTADUAL DE METEOROLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas climático do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, 2011. Disponível em: <<http://www.r3pb.com.br/AtlasCemetRS>>. Acesso em: 27 mar. 2016.
- CHEN, Y., et al. Studies on the no-tillage method in rice cultivation and its physiological and ecological effects. **Journal of South China Agricultural University**, Guangzhou, v. 14, p. 10–17, 1993.
- CHENG, S. Super hybrid rice breeding in China: achievements and prospects. **Journal of Integrative Plant Biology**, Guangzhou, v. 49, p. 805–810, 2007.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do arroz**. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 nov. 2016.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 08 out. 2016.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, p. 40–47, 2013.

CONTE, O. et al. Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, p. 220-228, 2007.

CONTE, O. et al. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1301-1309, 2011.

CONTE, O. et al. Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 730-739, 2008.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 26, p. 374- 387, 2006.

COSTA, S. E. V. G. A. et al. Impact of an integrated no-till crop-livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 43-51, 2014.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. An uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, New York, v. 40 p. 436-443, 2000.

COUTO, E. G. et al. Large area variability of soil chemical properties in central Brasil. **Agriculture, Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 66, p. 139-152, 1997.

CQFS-RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT, 2014. 400 p.

DALAL, R. C. et al. Soil Nitrogen and Nitrogen-Use Efficiency under Long-Term No-till Practice. **Soil Science Society of American**, Madison, v. 75 p. 2251-2261, 2011.

SILVA, F. D. et al. Pasture grazing intensity and presence or absence of cattle dung input and its relationships to soybean nutrition and yield in integrated crop-livestock systems under no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4-9, 2014.

DERPSCH, R. Conservation tillage, no-tillage and related technologies. In: GARCÍA-TORRES, L. et al. (Ed.), **Conservation Agriculture: Environment, Farmers experiences, Innovations, Socio-Economy, Policy**. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 181–190.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T. Development and current status of no-till adoption in the world. In: TRIENNIAL CONFERENCE OF THE

- INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION (ISTRO), 18th, Izmir, Turkey, 2009. **Proceedings**. Izmir, Turkey, 2009. 1 CD-ROM
- DERPSCH, R.; FRIEDRICH T.; KASSAM, A.; Li, H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Roseville, v. 3, p. 1–25, 2010.
- DEVÈVRE, O. C.; HORWÁTH, W. R. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperatures and moistures. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 32, p. 1773–1785, 2000.
- DÍAZ-ZORITA, M.; DUARTE, G. A; GROVE, J. H. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 1–18, 2002.
- DICK, W. A.; EDWARDS, W. M.; MCCOY, E. L. Continuous application of no-tillage to Ohio soils: changes in crop yields and organic matter-related soil properties. In: PAUL, E. A. et al. (Ed.), **Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems: Long-Term Experiments in North America**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1997. p. 171–182.
- DOBERMANN, A. et al. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. II: Effective soil K-supplying capacity. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 46, n. 1, p. 11–21, 1996.
- DOBERMANN, A. et al. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, n. 4, p. 633–643, 2000.
- DOBERMANN, A., FAIRHURST, T. **Rice: nutrient disorders & nutrient management**, Amsterdam: Handbook Series, 2000. 193 p.
- DUMONT, B. et al. When does grazing generate stable vegetation patterns in temperate pastures? **Agriculture, Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 153, p. 50–56, 2012.
- EGHBALL, B. Liming effects of beef cattle feedlot manure or compost. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 30 p. 2563–2570, 1999.
- EL-SHAHWAY, A. S.; MAHMOUD, M. M. A.; UDEIGWE, T. K. Alterations in soil chemical properties induced by continuous rice cultivation: a study on the arid Nile delta soils of Egypt. **Land Degradation & Development**, Medford, v. 238, p. 231–238, 2016.
- ELTZ, F. L. P.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Brunoálico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 13, p. 259-267, 1989.

- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.
- FAGERIA, N. K.; SLATON, N. A.; BALIGAR, V. C. Nutrient Management for Improving Lowland Rice Productivity and Sustainability. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v.80, p.63-152, 2003.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Towards the future we want: end hunger and make the transition to sustainable agricultural and food systems**. Roma, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/015/an894e/an894e00.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2016.
- FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics. **Production/Crops–Rice, paddy in the World**. 2013. <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. Acesso em: 21 set. 2016.
- FEBRAPD – Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. **Evolução Área do Sistema Plantio Direto no Brasil**. [2016]. Disponível em: <<http://febrapdp.org.br/area-de-pd>> Acesso em: 12 nov. 2016.
- FENG, Y. et al. Effects of no-tillage and direct broadcasting on soil physical and chemical properties and growth and yield formation in hybrid rice. **Acta Ecologica Sinica**, Beijing, v. 32, p. 1728–1736, 2006.
- FEPAGRO. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul safras 2009/2010 e 2010/2011**. Veranópolis: FEPAGRO-Serra, 2009. 179 p.
- FERREIRA, E. V. O. et al. Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1675-1684, 2009.
- FLINN, J. C.; DE DATTA, S. K. Trends in irrigated-rice yields under intensive cropping at Philippine research stations. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 9, p. 1–15, 1984.
- FLORES, J. P. C. et al. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 771-780, 2007.
- FLORES, J. P. C. et al. Atributos químicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto com aplicação superficial de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2385-2396, 2008.
- FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. 4. ed. Passo Fundo: UPF, 2008.
- GAO, M. et al. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field. **Chinese Journal of Applied Ecology**, Shenyang Shi, v. 15, p. 1177–1181, 2004a.

GAO, S.; TANJI, K. K.; SCARDACI, S. C. Impact of rice straw incorporation on soilredox status and sulfide toxicity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 70–76, 2004b.

GARCÍA-PRÉCHAC, F. et al. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 1–13, 2004.

GOMES, A. da S. et al. Produtividade do arroz irrigado em diferentes sistemas de cultivo. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 20., 1993, Pelotas. **Anais...** Pelotas: EMBRAPACT, 1993. p.135-137

GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 21 p.

GÓMEZ-REY, M. X.; COUTO-VÁZQUEZ, A.; GONZÁLEZ-PRIETO, S. J. Nitrogen transformation rates and nutrient availability under conventional plough and conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 144–152, 2012.

GRANDE, M. A.; CURI, N.; QUAGGIO, J. A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 45-50, 1986.

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. H. Nutrient cycling and fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 49, p. 119-199, 1993.

HENDRICKSON J. R. et al. Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition. **Renewable Agriculture and Food Systems**, NewYork, v. 23, p. 265–271, 2008.

HIRATA, M.; SUGIMOTO, Y.; UENO, M. Use of a mathematical model to evaluate the effects of dung from grazing animals on pasture production and utilization and animal production. **Japanese Journal of Grassland Science**, China, v. 37, p. 303–323, 1991.

HUANG, M. et al. No-tillage effect on rice yield in China: a meta-analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 183 p. 126–137, 2015.

IJIMA, M. et al. Productivity and water source of intercropped wheat and rice in a direct-sown sequential cropping system: the effects of no-tillage and drought. **Plant Production Science**, Kyoto, v. 8, p. 368–374, 2005.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Área e produção de arroz**. Disponível em:  
<[http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao\\_rs\\_e\\_brasil.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao_rs_e_brasil.pdf)>. Acesso em: 07 dez. 2016.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation - a System of Quantitative Pedology**. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 1941. 281 p.

JOSHI, A. K. et al. Breeding crops for reduced-tillage management in the intensive, rice–wheat systems of South Asia. **Euphytica**, Dordrecht, v. 153, p. 135–151, 2007.

- KEATING, B. A. et al. Eco-efficient agriculture: Concepts, Challenges, And opportunities. **Crop Science**, New York, v. 50, p. 109-119, 2010.
- KHUSH, G. S. Strategies for increasing the yield potential of rice. **Studies in Plant Science**, China, v. 7, p. 207–212, 2000.
- KIRSCHENMANN, F. L. Potential for a new generation of biodiversity in agroecosystems of the future. **Agronomy Journal**, Amsterdam, v. 99, p. 373–376, 2007.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.19, p.395-401, 1995.
- KOTTEK, M. et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Vienna, v. 15 p. 259-263, 2006.
- KUKAL, S. S. et al. Profile distribution of carbon fractions under long-term rice-wheat and maize-wheat production in alfisols and inceptisols of northwest india. **Land Degradation & Development**, Medford, v. 1214, p. 1205–1214, 2016.
- KUMAR, V.; LADHA, J. K. Direct Seeding of Rice : Recent Developments and Future Research Needs. **Rice**, New York, v. 111, 2011.
- LACA E. A. et al. Effects of canopy structure on patch depression by grazers. **Ecology**, New York, v. 75, p. 706–716, 1994.
- LACA, E. A. New Approaches and Tools for Grazing Management. **Rangeland Ecology & Management**, New York, v. 62, n. 5, p. 407–417, 2009.
- LAL, R. Effects of 6 years of continuous no-till or puddling systems on soil properties and rice (*Oryza sativa*) yield of a loamy soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, p. 181–200, 1986.
- LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, Switzerland, v. 8, p. 5875- 5895, 2015.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1131-1140, 2007.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 531 p.
- LEMAIRE, G. et al. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 4-8, 2014.
- LI, Y. et al. Are the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus driven by the “FeIII–FeII redox wheel” in dynamic redox environments? **Journal of Soils and Sediments**, Berlin, v. 12, p. 683-693, 2012.

LUXMOORE, R. J.; STOLZY, L.; LETEY, J. Oxygen diffusion in the soil plant system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 317-322, 1970.

MARCHEZAN, E. et al. Produção animal em pastagem hiberna, sob níveis de adubação, em área de várzea. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 1, p. 67-71, 2005.

MARTINS, A. P. et al. (Ed.). **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil**. Porto Alegre: Gráfica RJR, 2015. 104 p.

MARTINS, A. P. et al. Long-, medium-and short-term dynamics of soil acidity in an integrated crop–livestock system under different grazing intensities. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 104, p. 67-77, 2016.

MARTINS, A. P. et al. Short-term Impacts on Soil-quality Assessment in Alternative Land Uses of Traditional Paddy Fields in Southern Brazil. **Land Degradation & Development**, Medford, v. 28, p. 534-542, 2017.

MARTINS, A. P. et al. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 195, p. 18–28, 2014.

MCNAUGHTON S. J. Ecology of grazing ecosystem: the Serengeti. **Ecological Monographs**, Durham, v. 55, n. 3, p. 259-295, 1992.

MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 294-305, 2006.

MENEZES, V. G. et al. **Estratégias de manejo para aumento da produtividade da sustentabilidade da lavoura de arroz do RS: avanços e novos desafios**. Porto Alegre: IRGA, 2012. 104p.

MGRRAW, T. Soil test level variability in Southern Minnesota. **Better Crops**, [Minnesota], v. 78, n.4, p.24-25, 1994.

MILLER, M.; DICK, R. Thermal stability and activities of soil enzymes as influenced by crop rotations. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 27, p. 1161–1166, 1995.

MORAES, A. et al. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4–9, 2014.

MOREIRA, W. H. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 389-400, 2012.

MURASE, J. et al. Incorporation of <sup>13</sup>C-labeled rice-straw-derived carbon into microbial communities in submerged rice field soil and percolating water. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 38, n. 12, p. 3483–3491, 2006.

NEUE, H. U. et al. Carbon in tropical wetlands. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 163-185, 1997.

NICOLOSO, R. S. et al. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2425-2433, 2008.

NUNES, P. A. A. **Como a intensidade de pastejo determina a heterogeneidade espacial da vegetação e suas implicações em um sistema integrado de produção agropecuária**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

OLIVEIRA, C. A. O. et al. Comparison of an integrated crop-livestock system with soybean only: Economic and production responses in southern Brazil. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Cambridge, v. 29, p. 230-238, 2014.

OLK, D. C. Changes in chemical properties of organic matter with intensified rice cropping in tropical lowland soil. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 293–303, 1996.

OLOFSSON, J.; MAZANCOURT, C.; CRAWLEY, M. J. Spatial heterogeneity and plant species richness at different spatial scales under rabbit grazing. **Oecologia**, Berlin, v. 156, p. 825–834, 2008.

ONO, K. et al. Environmental controls on fallow carbon dioxide flux in a single-crop rice paddy, Japan. **Land Degradation & Development**, Medford, v. 26, n. 4, p. 331–339, 2015.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A. A análise química do solo e recomendação de adubação. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana de açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool/Planalsucar, 1983. p. 155-178.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo – Decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 911-920, 2008.

PAZ-GONZÁLEZ, A. et al. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 272-292, 2000.

PEIXOTO, R. S. et al. A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. **Antonie van Leeuwenhoek**, Berlin, v. 98, p. 403–413, 2010.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES, A. M. (Ed.) **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa, 2004. p. 75-96.

PONNAMPERUMA, F. N.; MARTINEZ, E.; LOY, T. Influence of redox potential and partial pressure of carbon dioxide on pH values and the suspension effect of flooded soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 101, p. 421-431, 1966.

RAVEN, J. A. pH regulation in plants. **Science Progress**, Rushden, v. 69, p. 495-509, 1985.



REICHERT, J. M. et al. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 981–988, 2008.

REIS, J. C. L. et al. **Racionalização da aplicação de calcário e fertilizantes para o aumento da sustentabilidade e rentabilidade da integração arroz pastagens**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. (Comunicado Técnico, 199)

RUSSELLE, M. P. Nutrient cycling in pasture. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIVESTOCK GRAZING, 1997, Viçosa. **[Anais]**. Viçosa, 1997.

RYSCHAWY J. et al. Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? **Animal**, Cambridge, v. 6, p. 1722- 1730, 2012.

SÁ, J. C. M. et al. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, Medford, v. 543, p. 531–543, 2013.

SAHRAWAT, K. L. Fertility and organic matter in submerged rice soils. **Current science**, Bangalore, v. 88, p. 735-739, 2005.

SAHRAWAT, K. L., Soil fertility in flooded and non-flooded irrigated rice systems. **Archives of agronomy and soil science**, Berlin, v. 58, p. 432-436. 2012.

SAIBRO, J. C.; SILVA, J. L. S. Integração sustentável do sistema arroz x pastagens utilizando misturas forrageiras de estação fria no litoral norte do Rio Grande do Sul. In: CICLO DE PALESTRAS EM PRODUÇÃO E MANEJO DE BOVINOS DE CORTE, Canoas. **Anais...** Canoas: Editora da ULBRA, 1999. p. 27-56.

SALTON, J. C.; CARVALHO, P. C. F. **Heterogeneidade da Pastagem - Causas e Conseqüências**. Dourados: Embrapa, 2007. 41. (Documento 91)

SANTOS, B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006.

SANTOS, H. P. et al. Fertilidade e teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura e pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, p. 474-482, 2011.

SAS Institute. **SAS/STAT software: changes and enhancements through release 1 6.12**. Cary: Statistical Analysis System Institute, 1997.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 85-91, 2000.

SCHMIED, B.; ABBASPOUR, K.; SCHULIN, R. Inverse estimation of parameters in a nitrogen model using field data. **Soil Science Society of American**, Madison, v. 64, p. 533–542, 2000.

- SCHOENAU, J. J.; CAMPBELL, C. A. Impact of crop residues on nutrient availability in conservation tillage systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 76, n. 4, p. 621–626, 1996.
- SCHOENFELD, R. et al. Resposta do arroz irrigado a níveis de adubação em experimento de Longa duração. In: FERTBIO 2012, 2012, Maceió. **Anais...** Maceió, 2012.
- SHIYOMI, M. et al. Spatial pattern changes in aboveground plant biomass in a grazing pasture. **Ecological Research**, Iboraki, v. 13, p. 313–322, 1998.
- SILVA, H. A. et al. Chemical and physical soil attributes in integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 946-944, 2014.
- SILVA, L. S.; RANNO, S. K. Calagem em solos de várzea e a disponibilidade de nutrientes na solução do solo após o alagamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 1054–1061, 2005.
- SILVA, R. F. et al. Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 46, p. 1277-1283, 2011.
- SIX, J.; ELLIOT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil microaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C organic under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 32, n. 14, p. 2099–2103, 2000.
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems. **Soil science Society of America**, Madison, p. 1350–1358, 1999.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. Washigton: U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 2010.
- SOSBAI. **Arroz Irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. 30. ed. Santa Maria: SOSBAI, 2014. 192 p.
- SOSBAI. **Arroz Irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. 31. ed. Pelotas: SOSBAI, 2016. 200 p.
- SOUSA R. O.; CAMARGO, A. O.; VAHL, L. C., Solos Alagados (Reações de REDOX). In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2015. p. 201-242.
- SOUZA, E. D. et al. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 74-88, 2010a.
- SOUZA, E. D. et al. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.1829-1836, 2009.

SOUZA, E. D. et al. Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1365-1374, 2010b.

SOUZA, L. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. 1992. 162 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SPERA, S. T. et al. Efeito de integração entre lavoura e pecuária, sob plantio direto, em alguns atributos físicos do solo após dez anos. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 695-704, 2010.

SPERA, S. T. et al. Efeito de sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto em alguns atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, p. 388-393, 2012.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 304 p.

STARK, S.; GRELLMANN, D. Soil microbial responses to herbivory in an arctic tundra heath at two levels of nutrient availability. **Ecology**, Washington, v. 83, n. 10, p. 2736-2744, 2002.

STEVENSON, F. J. Organic acids in soil. In: McLAREN, A.D.; PETERSON, G.H. (Ed.) **Soil biochemistry**. New York: Dekker, 1967. p.119-146.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

SUDIANTO E, et al. Clearfield<sup>®</sup> rice: Its development, success, and key challenges on a global perspective. **Crop Protection**, Guildford, v. 49, p. 40–51, 2013.

SWAROWSKY, A. et al. Concentração de nutrientes na solução do solo sob diferentes manejos do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 344-351, 2006.

TANG, X. et al. Effects of conservational tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purple paddy soil. **Chinese Journal of Applied Ecology**, Shenyang Shi, v. 18, p. 1027–1032, 2007.

TATSCH, F. R. P. **Elementos-traço em sistema de integração soja-bovinos de corte sob plantio direto**. 2012. 60 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros**. Porto Alegre: Departamento de Solos/UFRGS, 1995.

THOMAS, A. L.; LANGE, C. E. (Org.) **Soja em solos de várzea do sul do Brasil**. Porto Alegre: Evangraf, 2014. 127 p.

THOMAS, G. A.; DALAL, R. C.; STANDLEY, J. No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 295–304, 2007.

THUY, N. H. et al. Nitrogen supply in rice-based cropping systems as affected by crop residue management. **Soil Science Society of American**, Madison, v. 72, p. 514–523, 2008.

TRAN BA, L. et al. Effect of cropping system on physical properties of clay soil under intensive rice cultivation. **Land Degradation & Development**, Medford, v. 982, p. 973–982, 2016.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 38, n. 1, p. 45-93, 1985.

VEDELAGO, A. et al. Redução da infestação de arroz-vermelho na soja cultivada em várzea com herbicidas de ação residual. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 39., 2012, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2012. p. 10-15.

VELLOSO, A. C. X.; OLIVEIRA, C.; LEAL, J. R. Processos redox em glei húmico do Estado do Rio de Janeiro: I. Variação das concentrações de Fe (II) e fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 27-34, 1993.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O Solo como Sistema**. Curitiba: Ed. dos Autores, 2011. 104 p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009.

VILLA, S. C. C., et al. Imidazolinone tolerant rice: red rice control, out-crossing and herbicide carryover to non-tolerants crops. **Planta Daninha**, Campinas, v. 24, p. 761–768, 2006.

VITTI, G. C.; TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 90, 2000. 16p. (Encarte técnico)

WERNER, V. **Utilização de recursos de agricultura de precisão na geração de mapas de atributos, mapas de produtividade e aplicação de insumos a taxas variáveis**. 2004. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

WHALEN, J. K. et al. Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 64, n. 3, p. 962–966, 2000.

WHITEHEAD D. C. **Nutrient elements in grassland**. Wallingford: CABI Publishing, 2000. 369 p.

WILDING, L. P.; DREED, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Ed.) **Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions**. New York: Elsevier, 1983. p. 83-116.

WILLMS, W. D.; DORMAAR, J. F.; SCHAALJE, G. B. Stability of grazed patches on rough fescue grasslands. **Rangeland Ecology & Management**, Denver, v. 41, p. 503–508, 1988.

XIAO, X. et al. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 95, p. 480–492, 2005.

XU, Y. et al. Agronomic performance of late-season rice under different tillage, straw, and nitrogen management. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 115, p. 79–84, 2010.

YADAV, R. L. et al. Long term effects of inorganic fertilizer inputs on crop productivity in a rice-wheat cropping system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 51, n. 3, p. 193–200, 1998.

YADVINDER-SINGH, BIJAY-SINGH, TIMSINA, J., Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 85, p. 269–407, 2005.

ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em Latossolos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 389-400, 2010.

ZANATTA, J. A. et al. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 510–519, 2007.

ZHUANG, H. et al., Effect of long-term minimal and zero tillage on rice and wheat yields, soil organic matter and bulk density. **Scientia Agricultura Sinica**, Beijing, v. 32, p. 39–44, 1999.

ZOU, C. et al. Nitrogen, phosphorous and potassium uptake characteristics of rice and its relationship with grain yield. **Journal of Nanjing Agricultural University**, Nanjing, v. 25.4, p. 6-10, 2001.

## **9. RESUMO BIOGRÁFICO**

Luiz Gustavo de Oliveira Denardin, filho de Vera Lúcia Charão de Oliveira e Luiz Artur Porto Denardin, nasceu em 20 de dezembro de 1991, em Porto Alegre, RS. Estudou o ensino fundamental e médio nos colégios IPA, Pastor Dohms e Dom Bosco. Em março de 2010, ingressou no curso de Agronomia da UFRGS, onde trabalhou desde o segundo semestre como bolsista de iniciação científica: durante dois anos, no NESPRO (Núcleo de Estudos em Sistemas de Produção de Bovinos de Corte e Cadeia Produtiva da Carne), sob orientação do prof. Júlio Barcellos; e, após no GPSIPA (Grupo de Pesquisa em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária), onde permaneceu até o final da sua graduação, dezembro de 2014. Em março de 2015 ingressou no mestrado do PPG em Ciência do Solo da UFRGS, na área de Química e Fertilidade do Solo, no mesmo grupo de pesquisa (GPSIPA), sob orientação do Prof. Ibanor Anghinoni, e durante esse período também atuou como consultor técnico da empresa SIA (Serviço de Inteligência em Agronegócios).