UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DOUTORADO EM MANEJO DO SOLO

RONALDIR KNOBLAUCH

DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLOS ALAGADOS DESTINADOS AO CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

LAGES, SC
2011

RONALDIR KNOBLAUCH

DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLOS ALAGADOS DESTINADOS AO CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: PhD. Paulo Roberto Ernani
Co-orientador: Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Co-orientador: Dr. Francisco Carlos Deschamps

LAGES, SC
2011

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária
Renata Weingärtner Rosa – CRB 228/14ª Região
(Biblioteca Setorial do CAV/UDESC)

Knoblauch, Ronaldir
Dinâmica do nitrogênio em solos alagados destinados ao cultivo de arroz irrigado / Ronaldir Knoblauch ; orientador: Paulo Roberto Ernani. – Lages, 2011.

Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC

1. Fontes de nitrogênio. 2. Arroz irrigado. 3. Modo de adubação. 4. Cama de aves. I. Título.

CDD – 633.18

RONALDIR KNOBLAUCH

DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLOS ALAGADOS DESTINADOS AO CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Aprovada em: _____/_____/_____ Homologada em: _____/_____/_____

Banca Examinadora:

_____
Orientador/presidente: PhD. Paulo Roberto Ernani (UDESC/Lages, SC

_____
Co-orientador/membro: Dr. Luciano Colpo Gatiboni (UDESC/Lages, SC)

_____
Co-orientador/membro: Dr. Francisco Carlos Deschamps (Epagri/Itajaí, SC)

_____
Membro: Dr. Leandro de Souza Silva (UFSM/Santa Maria, RS)

_____
Membro: Dr. Jackson Adriano Albuquerque (UDESC/Lages, SC)

_____
Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Coordenador Técnico do Curso de Mestrado em Ciência do Solo e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – UDESC/Lages, SC

_____
Dr. Cleimon Eduardo do Amaral Dias
Diretor Geral do Centro de Ciências Agroveterinárias – UDESC/Lages, SC

Lages, (SC), 11 de março de 2011

À minha esposa Letícia, aos meus filhos Anelise e Ricardo e aos meus pais Arno (in memoriam) e Hilda, pelo incentivo carinho e compreensão,

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), por mais essa grande oportunidade.

À UDESC – Centro de Ciências Agroveterinárias por oferecer um ensino de alta qualidade e acessível a todos que têm avidez pelo aprendizado.

Ao meu amigo e orientador Prof. Paulo Roberto Ernani, pela orientação, ensinamentos, pela paciência, compreensão, companheirismo, amizade e acima de tudo exemplo de profissional dedicado e incansável. Meus mais sinceros agradecimentos.

Aos co-orientadores Prof. Luciano Colpo Gatiboni e Francisco Carlos Deschamps pelo auxílio, amizade e compreensão ao longo desta caminhada.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação do CAV, pelos ensinamentos e amizade que me fizeram crescer como pessoa e como profissional.

A todos os colegas do Curso de Pós-Graduação do CAV em especial aos colegas do Curso de Manejo do solo e com carinho especial aos amigos do laboratório de química e fertilidade do solo.

Aos colegas Jovani, Cristiane, Jaqueline, Clovisson e Evandro. Agradeço pela amizade e pela colaboração.

Aos bolsistas do laboratório de química e fertilidade do solo Késia, Acácio e Angélica, agradeço a especial ajuda e parceria.

Ao grupo do Projeto Arroz da Epagri pelo incentivo e compreensão, aos colegas do laboratório da Epagri Gisele e Alexandre pelo auxílio nas análises e um agradecimento muito especial ao colega Domingos, pela ajuda incansável.

A todos o meu mais sincero MUITO OBRIGADO.

RESUMO GERAL

KNOBLAUCH, Ronaldir. **Dinâmica do nitrogênio em solos alagados destinados ao cultivo de arroz irrigado.** 2011. 94 p. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC., 2011.

O nitrogênio (N) é o nutriente mais requerido pelo o arroz irrigado cultivado no sistema pré-germinado. A dinâmica do N no solo é bastante complexa, devido à multiplicidade de formas químicas e às reações e processos aos quais ele está sujeito, fazendo com que os índices de recuperação pelas plantas sejam, normalmente, muito baixos. No arroz irrigado, a água altera o equilíbrio do solo desencadeando várias reações físicas, químicas, eletroquímicas e biológicas que tornam a dinâmica do N bem mais complexa e a recuperação do N menor do que nas culturas de sequeiro. Visando avaliar o comportamento do N no solo, foram realizados cinco estudos incluindo experimentos de campo, casa-de-vegetação e laboratório. O de campo teve por objetivos monitorar a formação e a mobilidade do amônio e do nitrato no solo além da produtividade de grãos e da qualidade industrial e culinária do arroz decorrentes da aplicação de uréia, Entec 26 (produto comercial com inibidor de nitrificação) e cama de aves. O segundo estudo avaliou a formação e o movimento vertical do N mineral no solo alagado após a aplicação de uréia sobre uma lâmina de água de 4,0 cm, em colunas de PVC. No terceiro estudo monitorou a formação de N mineral no solo alagado e mensurou a recuperação pelas plantas após a aplicação de uréia e de cama de aves, em casa-de-vegetação. O quarto estudo visou quantificar a volatilização de amônia em solos alagados, influenciada pela forma de aplicação de uréia, em câmaras estáticas semi-abertas. No último estudo, avaliou-se a formação de ácidos orgânicos e a dinâmica do N mineral no solo alagado em função da época de incorporação da palha de arroz antecedendo o alagamento do solo. No experimento de campo, a aplicação dos fertilizantes nitrogenados químicos e da cama de aves com antecedência à semeadura proporcionaram altas concentrações de amônio no solo até aproximadamente 40 a 50 dias após a semeadura (DAS) que, após esse tempo, diminuíram para valores insignificantes. A uréia parcelada, embora tenha sido pouco detectada nas análises, proporcionou as maiores concentrações de N nas folhas. A maior produtividade de grãos (9,95 t ha^{-1}) ocorreu no tratamento com uréia parcelada, na safra 2008/09 produzindo 29% a mais que a testemunha (sem N). Na safra 2009/10, houve pouca diferença na produtividade de grãos entre a maioria dos tratamentos que receberam adubação nitrogenada, atingindo, na média, 9,5% a mais que a testemunha, com exceção da uréia incorporada que produziu apenas 4% acima da testemunha. O N mineral não contaminou as águas de superfície e nem o lençol freático em nenhum dos tratamentos e pouco afetaram a qualidade industrial e culinária do arroz. A aplicação de uréia na lâmina de água proporcionou alta concentração de amônio na água de alagamento e na camada superficial do solo e ocasionou alta volatilização de amônia. Nos vasos sem plantas, a uréia incorporada ao solo resultou em alta concentração de amônio no solo atingindo 92 % do N aplicado no 6º dia enquanto a cama de aves atingiu apenas 15 % no 6º dia e depois aumentou lentamente até atingir 29 % aos 95 dias após o alagamento. A maior volatilização de amônia ocorreu quando a uréia foi aplicada sobre a lâmina de água e a menor quando ela foi incorporada ao solo alagado. A incorporação

da palha do arroz no solo, com antecedência mínima de 30 dias ao alagamento, liberou o equivalente a 27 kg ha^{-1} de $N\text{-}NH_4^+$ a mais que a testemunha (sem palha), ao final de 90 dias de alagamento e evitou a formação de ácidos orgânicos. Por outro lado, a incorporação da palha imediatamente antes do alagamento, imobilizou em torno de 41 kg ha^{-1} de $N\text{-}NH_4^+$ e proporcionou a formação de ácido acético em níveis considerados tóxicos (7,2 mmol L^{-1}) aos 15 dias após o alagamento. A uréia incorporada ao solo alagado libera rapidamente o N na forma de amônio atingindo altos teores do íon no solo nas primeiras semanas e, em função das perdas de N ao longo do tempo, não supre as plantas adequadamente nos períodos de maior demanda. A cama de aves também não supre o N nos períodos de maior demanda das plantas, além de liberar menos de 30 % de seu N. A uréia aplicada em cobertura disponibiliza o N nos períodos de maior demanda das plantas. Entretanto, a aplicação desta sobre a lâmina de água pode propiciar alta volatilização de amônia. A palha do arroz deve ser incorporada ao solo com antecedência mínima de 30 dias; do contrário, imobilizará N e liberará ácido acético.

Palavras-chave: Fontes de nitrogênio, arroz irrigado, modo de adubação, cama de aves,

ABSTRACT

KNOBLAUCH, Ronaldir. **Nitrogen dynamics in flooded soils for irrigated rice.** 2011. 94 f. Theses (Ph.D. soil management course) – Santa Catarina State University. Post Graduation Program in Agriculture Science, Lages, SC. 2011.

Nitrogen is the most important nutrient for rice in the water-seeded system. The dynamics of N in the soil is complex due to the multiplicity of forms and chemical reactions and processes that take place with N, causing low rate of recovery by plants. In irrigated rice, addition of water affects various physical, chemical, electrochemical and biological reactions in the soil with consequences on N availability. To evaluate the behavior of N, five studies were carried out in the field, greenhouse and laboratory. The field experiment aimed to evaluate the mobility of ammonium and nitrate in the soil as well as yield and quality of rice grain from the application of urea, Entec 26 (a commercial product with nitrification inhibitor) and poultry house litter. In the second study we evaluated the formation and vertical movement of mineral N in waterlogged soil after application of urea on a water depth of 4.0 cm above the soil. In the third study, the aim was to quantify the formation of mineral N in waterlogged soil and its recovery by plants after application of urea and poultry house litter. In the fourth study we quantified ammonia volatilization in flooded soils, influenced by the form of urea application in semi-open static chambers. In the latter study, we evaluated the formation of organic acids and the mineral N dynamic in flooded soils as a function of time of incorporation of rice straw preceding the flooding. Application of chemical N fertilizer and poultry house litter in advance of sowing provided high concentrations of ammonium in the soil up to 40 to 50 days after sowing (DAS), and after this time N decreased to negligible values. Urea split, although slightly detected in the analysis, led to higher concentrations of N in the plant tissue. In the first season, splitting of urea promoted the highest grain yield (9.95 t ha^{-1}), which was 29% higher than the control (with no N). In the second season, there was little difference in yield between most treatments that received N, reaching on average 9.5% higher than the control, except where urea was soil incorporated, which produced only 4% above the control. Addition of mineral N had not effect on water quality neither on the quality of industrial and cooking rice. Application of urea to the irrigation water provided high concentration of ammonium in the water flooding and in the topsoil besides to caused high volatilization. In the pots without plants, urea incorporated into the soil resulted in high concentrations of ammonium in the soil, with recovery of 92% of applied N on day 6^{th} while pots that received poultry house litter it reached only 15% at day 6^{th} and then increased slowly up to 29% at 95 days after flooding. The highest ammonia volatilization occurred when urea was applied to the water depth and the lowest when it was incorporated into the waterlogged soil. Incorporation of rice straw into the soil, with a minimum of 30 days before flooding released 27 kg $N\text{-}NH_4^+$ ha^{-1} more than in the control, and did not promote the formation of organic acids. On the other hand, the incorporation of straw just before the flooding immobilized 41 kg ha^{-1} $N\text{-}NH_4^+$ and promoted the formation of acetic acid in toxic levels (7.2 mmol L^{-1}), 15 days after flooding. Urea incorporated into waterlogged soil quickly releases N as ammonium reaching high levels in the soil during the first week and, due to N losses it does not adequately supply the plants during periods of high demand. Poultry house litter also does not supply the amount of N required by the plants, and this fertilizer released less than

30% of its N. Splitting of urea was the best way to supply N to the plants during high requirement periods. However, its application over the water can provide high N volatilization. Rice straw should be incorporated into the soil with a minimum of 30 days before flooding and rice sowing, in order to avoid immobilization of N and release of acetic acid

Key-words: Nitrogen resources, irrigated rice, fertilization method, paddy soil, poultry house litter;

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Teores de amônio no solo alagado em diferentes épocas após a semeadura do arroz em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda no dia do alagamento para semeadura do arroz (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 75 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 75 dias após a semeadura. 26

Figura 2. Teores de amônio no solo alagado em diferentes épocas após a semeadura do arroz em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves, na dose equivalente a 120 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 75 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 75 dias após a semeadura..... 27

Figura 3. Teores de nitrato no solo alagado em diferentes épocas após a semeadura do arroz em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 75 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 75 dias após a semeadura. 28

Figura 4. N acumulado na parte aérea do arroz aos 60 dias após a semeadura e por ocasião do florescimento em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves, na dose equivalente a 120 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento do solo e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama dal) ou 30 dias antes (cama 30); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia inc) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 75 dias após a semeadura (uréia

parc); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 75 dias após a semeadura..... 36

CAPÍTULO II

Figura 1. Concentração de amônio ao longo do tempo nas primeiras camadas de colunas de solo (0 a 1, 1 a 2, 2 a 3 e 3 a 4 cm) do tratamento com 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água e na camada de 0 a 4 cm do tratamento testemunha (sem N). Médias de duas repetições. 48

Figura 2. Concentração de amônio ao longo do tempo nas camadas de colunas de solo do tratamento com 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água e no tratamento testemunha (sem N). Médias de 2 repetições. 49

Figura 3. Umidade gravimétrica (base seca) do perfil do solo alagado, acondicionado em colunas de PVC com 7,0 cm de diâmetro. Médias de duas repetições..... 50

Figura 4. Concentração de amônio e de uréia na água que permaneceu sobre a superfície do solo, ao longo do tempo, decorrente da adição de 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água. Médias de 2 repetições. 51

Figura 5. Quantidade total de N nas colunas de PVC ao longo do tempo, decorrente da adição de 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água, descontando-se o N do tratamento sem aplicação de uréia (testemunha). Médias de duas repetições. N na forma de amônio mais N na forma de uréia = Água; amônio no solo = Solo; soma do N contido na água mais o N contido no solo = Total. 52

CAPÍTULO III

Figura 1. Amônio no solo nos vasos sem plantas de arroz, ao longo do tempo, após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Testemunha = sem aplicação de N; cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada receberam 1200 mg de N $vaso^{-1}$. 59
60

Figura 2. Amônio no solo nos vasos sem plantas de arroz, descontando-se o tratamento testemunha (sem N), ao longo do tempo, após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4

repetições. Cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos receberam 1200 mg de N $vaso^{-1}$. 61

Figura 3. Amônio no solo nos vasos com plantas de arroz, ao longo do tempo, após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Testemunha = sem aplicação de N; cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada, receberam 1200 mg de N $vaso^{-1}$. 62

Figura 4. Nitrato solo nos vasos com e sem plantas de arroz, ao longo do tempo, após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Testemunha = sem aplicação de N; cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada, receberam 1200 mg de N $vaso^{-1}$. 63

Figura 5. Quantidade de nitrogênio acumulada pelas plantas de arroz irrigado, cultivar SCS 115 CL, colhidas por ocasião da formação da panícula, cultivadas em vasos, em casa-de-vegetação após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Test = testemunha sem aplicação de N; cama = cama de aves totalmente incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorp. = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parc. = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada, receberam 1200 mg de N $vaso^{-1}$. 65

CAPÍTULO IV

Figura 1. Perda acumulada de amônia em função da forma de aplicação de uréia no solo. Testemunha (sem N); uréia em solo úmido = uréia aplicada sobre a superfície do solo úmido, sem alagamento durante todo o período de avaliação; uréia em solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre a lâmina de água; uréia em grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; uréia incorporada = uréia incorporada no solo previamente alagado; Alagamento 48 h após = uréia

aplicada na superfície solo úmido o qual foi alagado 48 h após a aplicação da mesma.
Todos os tratamentos receberam 353 mg de N por vaso, na forma de uréia, equivalente a 200 kg de N ha^{-1}. 73

Figura 2. Concentração de amônio na água de alagamento dos solos em função da forma de aplicação da uréia. Testemunha (sem N); uréia em solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre a lâmina de água; uréia em grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; uréia incorporada = uréia incorporada ao solo previamente alagado; Alagamento 48 h após = uréia aplicada na superfície solo úmido o qual foi alagado 48 h após a aplicação da mesma.
Todos os tratamentos receberam 353 mg de N por vaso, na forma de uréia, equivalente a 200 kg de N ha^{-1}. 76

Figura 3. pH da água de alagamento dos solos em função da forma de aplicação de uréia. Testemunha (sem N); uréia em solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre a lâmina de água; uréia em grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; uréia incorporada = uréia incorporada no solo previamente alagado; Alagamento 48 h após = uréia aplicada na superfície solo úmido o qual foi alagado 48 h após a aplicação da mesma. 78

CAPÍTULO V

Figura 1. Amônio no solo alagado ao longo do tempo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no dia do alagamento.. Medias de quatro repetições. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza. 84

Figura 2. Amônio no solo alagado ao longo do tempo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no dia do alagamento, após serem subtraídos os valores existentes no tratamento onde não foi aplicado palha ou cinza (testemunha). Medias de quatro repetições. 86

Figura 3. Nitrato no solo alagado ao longo do tempo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no dia do alagamento. Medias de quatro repetições. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza. 89

Figura 4. pH da solução do solo ao longo do tempo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no

dia do alagamento. Medias de quatro repetições. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza. 90

Figura 5. Concentração de ácido acético na solução do solo ao longo do tempo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento e no dia do alagamento do solo e da incorporação da cinza da queima da palha realizada no dia do alagamento. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza. 91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Teor de nitrogênio mineral na água de drenagem das parcelas do arroz irrigado, cultivado em sistema pré-germinado, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de 3 repetições..... 30

Tabela 2. Teor de potássio na água de drenagem das parcelas cultivadas com arroz irrigado, em sistema pré-germinado, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de três repetições..... 31

Tabela 3. Teor de potássio na solução do subsolo, a 50 cm de profundidade nas parcelas cultivadas com arroz irrigado, em sistema pré-germinado,, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de 3 repetições. 32

Tabela 4. Teor de nitrogênio na solução do subsolo, a 50 cm de profundidade nas parcelas cultivadas com arroz irrigado, em sistema pré-germinado, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de três repetições. 33

Tabela 5. Teor de N no tecido foliar das plantas de arroz cultivadas em sistema pré-germinado, nas safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições..... 34

Tabela 6. Teor de N no tecido foliar das plantas de arroz cultivadas em sistema pré-germinado, nas safra 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. A dose de todos os fertilizantes foi equivalente a 120 kg de N ha^{-1}. Médias de quatro repetições. 35

Tabela 7. Rendimento de grãos de arroz, da cultivar SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/2009 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições. 37

Tabela 8. Renda do benefício da cultivar SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições. 39

Tabela 9. Número de panículas por metro quadrado e de grãos por panícula da cultivar de arroz SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado. Safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de

fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições. 40

Tabela 10. Esterilidade de espiguetas e peso de grãos da cultivar de arroz SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de 4 repetições. 41

Tabela 11. Volume, após o cozimento, de 100 gramas (120 cm^3) de grãos de arroz branco polido da cultivar de arroz SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições. 42

Tabela 12. Teor de proteína nos grãos de arroz, branco polido, da cultivar SCS 114 Andosan cultivada no sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves Médias de quatro repetições. 43

CAPITULO IV

Tabela 1. Características da camada (0 – 15 cm) dos solos utilizados nos experimentos..... 71

Tabela 2. Perdas acumuladas de amônia, após 22 dias de aplicação dos tratamentos, em função da forma de aplicação de uréia. Testemunha (sem N); uréia em solo úmido = uréia aplicada na superfície de solo úmido (80% da capacidade de campo) sem alagamento durante todo o período de avaliação; uréia em solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre lâmina de água; uréia em grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; uréia incorporada = uréia incorporada ao solo alagado; alagamento 48 h após = uréia aplicada em solo úmido sendo alagado 48 h após a aplicação da mesma. Médias de três repetições. 74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 18

2 CAPÍTULO I - DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLOS ALAGADOS E RENDIMENTO DO ARROZ EM DECORRÊNCIA DA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES MINERAIS E CAMA DE AVES 20

2.1 RESUMO 20

2.2 INTRODUÇÃO 21

2.3 MATERIAL E MÉTODOS 23

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 26

2.5 CONCLUSÕES 43

3 CAPÍTULO II - MOBILIDADE DO NITROGÊNIO EM SOLO ALAGADO APÓS A APLICAÇÃO DE URÉIA 44

3.1 RESUMO 44

3.2 INTRODUÇÃO 45

3.3 MATERIAL E MÉTODOS 46

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 47

3.5 CONCLUSÕES 53

4 CAPÍTULO III - DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLO ALAGADO DECOR- RENTE DA APLICAÇÃO DE URÉIA OU CAMA DE AVES NA PRESENÇA OU NÃO DE PLANTAS DE ARROZ 54

4.1 RESUMO 54

4.2 INTRODUÇÃO 55

4.3 MATERIAL E MÉTODOS 57

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 58

4.5 CONCLUSÕES 67

5 CAPÍTULO IV - VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA EM SOLO ALAGADO INFLUENCIADA PELA FORMA DE APLICAÇÃO DA URÉIA 68

5.1 RESUMO 68

5.2 INTRODUÇÃO..... 69

5.3 MATERIAL E MÉTODOS 70

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 72
5.5 CONCLUSÕES 79

6 CAPÍTULO V - A INCORPORAÇÃO ANTECIPADA DA PALHA DE ARROZ DIMINUIU A FORMAÇÃO DE ÁCIDO ACÉTICO E ALTEROU O pH DA SOLUÇÃO E A DINÂMICA DO N NO SOLO ALAGADO 80

6.1 RESUMO 80
6.2 INTRODUÇÃO 81
6.3 MATERIAL E MÉTODOS 82
6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 84
6.5 CONCLUSÕES 93
7 CONCLUSÕES GERAIS 94
8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 95

1. INTRODUÇÃO GERAL

Em Santa Catarina, o arroz irrigado *(Oryza sativa L.)* é cultivado no sistema pré-germinado, onde as sementes são previamente germinadas e depois semeadas em solo alagado. Em decorrência do alto consumo de água e da localização das lavouras nas proximidades dos rios e ribeirões, o cultivo do arroz irrigado preocupa os ambientalistas em relação ao potencial de contaminação dos mananciais de água. O nitrogênio é o nutriente mineral absorvido em maior quantidade pelo arroz irrigado e também aquele que pode provocar os maiores problemas de poluição ambiental. A disponibilidade do N às plantas é mais complexa de ser avaliada do que os demais nutrientes, devido ao grande número de reações que ocorrem com o N e da rapidez destas transformações. No arroz irrigado, a entrada de água na área altera o equilíbrio existente no solo, desencadeando várias reações físicas, químicas e biológicas tornando a dinâmica do N ainda mais complexa.

Alguns segmentos da sociedade têm questionado a forma de cultivo do arroz irrigado em Santa Catarina. Sugerem que o produtor utilize menos agroquímicos e cultive o arroz em sistemas mais orgânicos ou agroecológicos. Na produção orgânica de arroz irrigado, o N é o principal nutriente limitante e as entidades certificadoras de produtos orgânicos e agroeclógicos não permitem o uso da uréia, o fertilizante nitrogenado mais utilizado no arroz irrigado, e sugerem outras alternativas para o fornecimento de N às plantas de arroz. O cultivo de plantas leguminosas fixadoras de N poderia ser uma alternativa viável. Porém, as lavouras de arroz normalmente se encontram em baixadas, em solos de difícil drenagem tornando o cultivo de leguminosas, na entressafra, muito difícil. Outras alternativas promissoras como as cianobactérias e algumas estirpes de *Azobacter* e *Azospirillum* necessitam de estudos adicionais para selecionar estirpes mais eficientes e justificar a sua aplicação.

Nesse contexto, os dejetos animais constituem uma alternativa que vem sendo utilizada pelos produtores de arroz, sendo a cama de aves o resíduo orgânico mais usado. Todavia, ao serem mineralizados, os resíduos orgânicos liberam alguns elementos minerais de forma semelhante aos fertilizantes químicos. Além disso, por tratar-se de solos alagados, há o risco da poluição dos mananciais por contaminantes biológicos como bactérias e fungos, além dos antibióticos e hormônios. Outro problema é que a concentração de P na cama de aves é, na média, superior à de N e a demanda de N pelas plantas de arroz irrigado é três vezes superior à de P. Portanto, a quantidade a ser utilizada de cama de aves para suprir totalmente o

N poderá acarretar o acúmulo de P no solo e ocasionar a proliferação de algas e a eutrofização das águas de superfície.

Algumas empresas que comercializam arroz cultivado de forma orgânica têm divulgado que a qualidade industrial e culinária desse arroz é superior à do arroz cultivado no sistema convencional. Todavia, no nosso entendimento, esta informação carece, ainda, de comprovação técnico-científica.

Após a colheita do arroz, uma grande quantidade de palha ou resteva fica na lavoura. A incorporação da palha em solo alagado pode provocar a imobilização do N e a formação de ácidos orgânicos que prejudicam as plântulas de arroz. Em função disso, muitos produtores queimam a palha antes do preparo do solo. A queima da palha é uma prática prejudicial ao solo, por destruir parte da matéria orgânica, e ao meio ambiente, por liberar dióxido de carbono e outros gases para a atmosfera. Em função disso, essa prática vem sendo restringida pelos órgãos de defesa do meio ambiente e os produtores estão sujeitos a penalidades.

Dessa forma, é fundamental haver um amplo entendimento da dinâmica do N em solo alagado com o intuito de racionalizar o uso de fertilizantes nitrogenados, minerais ou orgânicos, tanto do ponto de vista da produtividade das lavouras como da qualidade ambiental. Além disso, é preciso melhorar o manejo da palha do arroz para que esta deixe de ser um problema e passe a ser um fator de aumento da produtividade do arroz.

Nosso trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito de fertilizantes nitrogenados minerais e de cama de aves na formação e mobilidade do N mineral no solo, na produtividade de grãos e na qualidade industrial e culinária do arroz. Alem disso, foram avaliadas as perdas de N por volatilização de amônia e os efeitos da incorporação da palha do arroz na imobilização de N e na formação de ácidos orgânicos em solos alagados. Para isso, foram conduzidos sete experimentos, no campo, em casa-de-vegetação e em laboratório.

2 CAPÍTULO I

DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLOS ALAGADOS E RENDIMENTO DO ARROZ EM DECORRÊNCIA DA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS MINERAIS E CAMA DE AVES

2.1 RESUMO

A alta demanda de água e o uso de agroquímicos nas lavouras de arroz irrigado, em Santa Catarina, tem preocupado a sociedade. O nitrogênio (N) é o nutriente aplicado em maior quantidade no arroz irrigado, sendo a uréia o fertilizante mais utilizado. Recentemente muitos produtores têm utilizado a cama de aves, porém pouco se sabe sobre a liberação do N deste material. Este trabalho teve por objetivo monitorar a formação e a mobilidade do N mineral em solo alagado, cultivado com arroz e avaliar o efeito dos fertilizantes na produtividade de grãos e na qualidade industrial e culinária. O experimento foi conduzido a campo, nas safras 2008/09 e 2009/10, em Itajaí, em um Cambissolo Háplico Distrófico. Os tratamentos consistiram de uma testemunha (sem N); de 5,0 t ha^{-1} de cama de aves (que adicionou 105 kg ha^{-1} N) incorporadas no alagamento (um dia antes da semeadura) ou 30 dias antes; da adição de 105 kg ha^{-1} de N na forma de uréia, subdivididos em três aplicações iguais, em torno dos 25, 50 e 75 dias após a semeadura (DAS) ou a dose completa de uréia incorporada antes da semeadura; da adição de 79 kg ha^{-1} N na forma do produto comercial Entec 26, sendo 50% incorporado antes da semeadura e 50% em torno dos 80 DAS. Na safra 2009/10, repetiram-se os tratamentos, porém a dose de N foi aumentada para 120 kg ha^{-1} em todos os fertilizantes. As unidades experimentais foram parcelas de 7,0 x 6,0 m, com quatro repetições. O nitrato no solo foi muito baixo em todos os tratamentos. O amônio no solo foi alto nas primeiras semanas após a aplicação da uréia incorporada que atingiu concentrações superiores a 80 mg de $N\text{-}NH_4^+$ kg^{-1}, seguida pelos tratamentos com Entec 26 e cama de aves com aproximadamente 50 mg $kg^{-1.}$ e começaram a diminuir sendo que a partir dos 54 e 47 dias, nas safras 2008/09 e 2009/10, respectivamente, passaram a ter valores irrisórios. Embora as plantas tenham respondido às aplicações da uréia parcelada, o amônio proveniente da uréia foi pouco detectado nas análises. A maior produtividade de grãos (9,95 t ha^{-1}) ocorreu no tratamento com uréia parcelada, na primeira safra, e nos tratamentos com uréia parcelada e cama de aves (média de 8,2 t ha^{-1}) na última safra. Não houve contaminação das águas superficiais e nem do lençol freático por N mineral nem tampouco houve efeito dos tratamentos na qualidade industrial e culinária do arroz. A incorporação de fertilizantes nitrogenados antes da semeadura do arroz não fornecem N suficiente nos períodos de maior demanda das plantas. Portanto, para as cultivares de ciclo longo, cultivadas em sistema pré-germinado, o N deve ser aplicado de forma parcelada.

2.2 INTRODUÇÃO

Em Santa Catarina, o arroz irrigado *(Oryza sativa L.)* é cultivado no sistema pré-germinado, onde as sementes são previamente germinadas e semeadas em solo alagado. Em decorrência do alto consumo de água e da localização das lavouras nas proximidades de rios e ribeirões, o cultivo do arroz irrigado é motivo de preocupação quanto ao seu potencial de contaminação dos mananciais. Alguns segmentos da sociedade têm, inclusive, questionado a forma de cultivo do arroz irrigado em Santa Catarina, e principalmente o uso de agroquímicos nas lavouras. Sugerem que o agricultor utilize menor quantidade de agroquímicos e cultive o arroz de forma a causar um menor impacto ambiental, ou seja, cultivos considerados mais orgânicos ou agroecológicos.

Embora o alagamento do solo aumente a disponibilidade de vários elementos químicos, principalmente do fósforo (SILVA et al., 2003), para se auferir altas produtividades é necessária a adição de nutrientes, especialmente nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) (SOSBAI, 2010). Dentre os nutrientes mais exigidos pelo arroz, destaca-se o N como o mais importante. Lopes et al. (1995) testaram quatro cultivares de arroz irrigado e verificaram que para cada quilograma de N aplicado houve aumentos entre 14 e 23,6 kg de arroz em casca. Trabalhando com cultivares de ciclo longo e de alto potencial de produção, Knoblauch et al. (2005, 2009) encontraram valores ainda maiores, demonstrando a grande importância do N para as plantas de arroz cultivadas sob irrigação por alagamento.

Para lavouras de arroz irrigado, são recomendados fertilizantes amoniacais ou formadores de amônio, uma vez que o nitrato é instável em solo alagado e se perde por desnitrificação (WATANABE, 1979; GEORGE, 1993; KHERA et al., 1999). A uréia, pelo seu elevado conteúdo de N e pelo baixo custo por unidade de nutriente, destaca-se como o fertilizante nitrogenado mais utilizado nas lavouras de arroz irrigado, sendo aplicadas, em Santa Catarina, mais de 30 mil toneladas a cada safra.

Na produção orgânica de arroz, o nitrogênio é o principal nutriente limitante (MATTOS, 2004). Todavia, a diversificação de fontes alternativas de N para a cultura do arroz é ainda um desafio para a pesquisa. No sistema pré-germinado, onde as lavouras normalmente se encontram em baixadas, em solos de difícil drenagem, o desafio é ainda maior, pois o cultivo de leguminosas de inverno, que poderia ser uma alternativa viável, torna-se muito difícil. Atualmente, estão surgindo como alternativas promissoras as cianobactérias e algumas estirpes de *Azobacter* e *Azospirillum* (SCIVITTARO, 2006).

Entretanto, é necessário haver a seleção de estirpes mais eficientes para justificar a sua aplicação em nível de lavoura.

A adição de inibidores de urease e de nitrificação à uréia convencional e o uso de outros fertilizantes nitrogenados de liberação lenta de N representam um grupo de fertilizantes nitrogenados promissores. Inibidores de urease são compostos que, quando adicionados à uréia, diminuem a atividade da urease, retardando a hidrólise da uréia. Com isso, diminuem as perdas por volatilização de amônia e aumentam o aproveitamento de N pelas plantas. Inibidores de nitrificação são compostos adicionados aos fertilizantes amídicos ou amoniacais com o objetivo de retardar a atividade das bactérias nitrificadoras, que oxidam o amônio a nitrato. Alguns desses fertilizantes de liberação lenta de N, especialmente os produtos a base de Sulfonitrato de amônio, vêm sendo utilizados com resultados promissores em lavouras de arroz irrigado (KNOBLAUCH, 2005; GROHS, 2009), todavia o custo desses produtos ainda restringe a sua utilização.

Os dejetos animais constituem outra alternativa que vem sendo utilizada pelos produtores de arroz, sendo a cama de aves o resíduo orgânico mais usado. Todavia, ao serem mineralizados, os resíduos orgânicos liberam elementos minerais de forma semelhante aos fertilizantes químicos. Além disso, por tratar-se de solos alagados, há o risco da poluição dos mananciais por contaminantes biológicos como bactérias e fungos, além dos antibióticos e hormônios. Na cama de aves, a concentração de P é, na média, superior à concentração de N (ROGERI, 2010). A demanda de N pelas plantas de arroz irrigado é três vezes superior à demanda de P (SOSBAI, 2010), Portanto, a quantidade a ser utilizada de cama de aves para suprir totalmente a demanda de N deverá acarretar o acúmulo de P no solo e ocasionar problemas de proliferação de algas (SARTORI, 2009) e de eutrofização das águas de superfície.

Assim, um amplo entendimento da dinâmica do N no solo alagado é fundamental para a racionalização no uso de fertilizantes nitrogenados, tanto do ponto de vista da produtividade do arroz irrigado quanto da qualidade ambiental. O objetivo do presente estudo foi monitorar a dinâmica da formação e da mobilidade do amônio e do nitrato em solo alagado cultivado com arroz e avaliar o efeito dos fertilizantes utilizados na produtividade de grãos e na qualidade industrial e culinária do arroz.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de campo, nas safras 2008/09 e 2009/10, na Estação Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), localizada no município de Itajaí, SC, situado a 26º54'28" S e 48º39'48" W, com clima mesotérmico úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen. O solo da área experimental é um Cambissolo Háplico, e tinha as seguintes características: pH-H_2O = 4,6; índice SMP = 5,4; P = 9,0 mg kg^{-1}; K = 54 mg kg^{-1}; MO = 20 g kg^{-1}; Al = 1,7 $cmol_c$ dm^{-3}; Ca = 2,9 $cmol_c$ dm^{-3}; Mg = 0,7 $cmol_c$ dm^{-3} e argila = 420 g dm^{-3}.

Utilizaram-se os seguintes tratamentos: testemunha (sem adubação nitrogenada); cama de aves na dose de 5,0 t ha^{-1} (equivalente a 105 kg de N ha^{-1}), incorporadas 30 dias antes do preparo final do solo e da semeadura do arroz, enquanto o solo estava drenado; 5,0 t ha^{-1} cama de aves incorporadas por ocasião do preparo final do solo e formação da lama (a cama de aves utilizada nas duas safras possuía, em média 2,1 % de N; 3,2 % de P_2O_5 e 3,3 % de K_2O); 105 kg ha^{-1} de N na forma de uréia, subdivididos em três aplicações iguais, em torno dos 25 e 50 dias e na diferenciação do primórdio floral (DPF), próximo aos 75 dias após a semeadura do arroz (DAS); 105 kg ha^{-1} de N na forma de uréia, totalmente incorporados por ocasião do preparo final do solo e formação da lama; 79 kg de N ha^{-1} na forma de sulfonitrato de amônio (produto comercial Entec 26®), sendo metade aplicado na formação da lama e metade próximo à diferenciação do primórdio floral. Entec 26® é um produto comercial a base de sulfonitrato de amônio que possui 26 % de N (18,5 na forma amoniacal e 7,5 % na forma nítrica) além de 13 de enxofre. O fertilizante possui compostos que retardam a ação das bactérias *Nitrossomonas* as quais oxidam o amônio a nitrato. A dose de 79 kg ha^{-1} de N é uma recomendação do fabricante do Entec 26® que preconiza a utilização de 75% da dose de N aplicada via uréia, parcelado em duas aplicações. Na safra 2009/10, utilizaram-se os mesmos tratamentos da safra anterior, porém a dose de N foi aumentada para 120 kg ha^{-1} em todos os fertilizantes, inclusive no Entec 26. Nas parcelas com adubação química e na testemunha, aplicou-se fósforo e potássio de acordo com a recomendação da Comissão de Química e Fertilidade do solo (CQFS, 2004). Nas parcelas com cama de aves, não foi realizada adubação química. As unidades experimentais foram constituídas por parcelas com 7,0 x 6,0 m, separadas por taipas de barro entre os blocos e chapas de PVC entre as parcelas. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições.

O arroz foi cultivado no sistema pré-germinado, conforme recomendado pela Epagri (Epagri, 2002). Nas duas safras foi utilizada a cultivar SCS 114 Andosan. Ela é de ciclo longo (142 dias de ciclo biológico, na região de Itajaí) e foi desenvolvida pela Epagri. Após a semeadura do arroz, foram realizadas coletas de solo, a cada sete dias, até aos 112 dias após a semeadura, que coincidiu com o estádio de floração. Na safra 2008/09, com o intuito de não danificar as parcelas que estavam alagadas, cada coleta foi composta de uma subamostra por parcela; na safra 2009/10, em função da alta variabilidade entre as repetições ocorrida na safra anterior, cada amostra foi constituída por três subamostras por parcela, coletadas a aproximadamente 30 cm uma da outra. As amostras de solo foram coletadas a uma profundidade média de 12 cm, com auxílio de trado, tipo Holandês, adaptado para facilitar a coleta do solo alagado. Após a coleta, as amostras foram homogeneizadas com auxílio de um equipamento elétrico e após foi retirado aproximadamente 10 g de solo úmido para extração do N mineral e o restante da amostra foi colocado em estufa para determinação da umidade. A extração do amônio e do nitrato foi realizada com solução de KCl 1 mol L^{-1} e a determinação desses íons foi realizada em aparelho semi-micro Kjeldahl, conforme Tedesco et al. (1995).

Para a determinação do amônio, do nitrato e do K na solução do subsolo, foram instalados lisímetros na profundidade de 50 cm abaixo do nível do solo. Para isso, foram feitos furos com uma broca de ferro com o mesmo diâmetro dos lisímetros. Os lisímetros foram introduzidos no solo e pressionados com argila para evitar a percolação de água de inundação das parcelas. A retirada da solução dos lisímetros foi realizada com auxílio de seringa plástica, aos 30, 60 e 90 dias após a semeadura do arroz. As análises de N e de K seguiram a metodologia de Tedesco et al. (1995). Foram analisados também os teores de amônio, nitrato e K na água de irrigação e de drenagem das parcelas por ocasião da primeira drenagem, realizada aos 4 dias após a semeadura e na drenagem final, realizada 20 dias antes da colheita do arroz.

Na safra 2008/09, a determinação da concentração de N no tecido da parte aérea das plantas foi realizada em quatro estádios de desenvolvimento da cultura: no perfilhamento pleno (V5), aos 40 dias após a semeadura (DAS), no final do perfilhamento (V8), aos 65 DAS, na iniciação da panícula (RO), aos 80 DAS e no florescimento (R4) aos 110 DAS. Nos três primeiros estádios, coletou-se a planta inteira e na floração foram coletadas apenas as folhas-bandeira. Na safra 2009/10, coletou-se a parte aérea em duas ocasiões, aos 60 DAS e na floração, sendo que, naquela safra, determinou-se também a fitomassa da parte aérea. Para

tanto, as plantas foram cortadas rente ao solo em amostras de 1,0 m^2 por parcela, secadas em estufa a 60^oC até peso constante e determinado a fitomassa.

A produtividade de grãos foi quantificada pela colheita de amostras de 6,0 m^2 por parcela. As amostras foram trilhadas em trilhadeira estacionária onde se separaram os grãos da palha. Após a pesagem dos grãos, determinou-se a umidade e a massa foi convertida para 13% de umidade. Posteriormente, as amostras foram secadas em secador estacionário até atingir a umidade de 13%, para a devida armazenagem dos grãos. Os componentes do rendimento foram determinados em amostras de 0,5 m^2 por parcela. Para isso, as amostras foram debulhadas manualmente, e os grãos foram secados em secador estacionário com ar forçado a 40^oC até alcançarem 13% de umidade. A seguir, foram pesados 100 g de grãos de cada parcela, que foram posteriormente descascados e polidos em engenho de prova modelo Suzuki, para determinação do percentual de grãos inteiros, quebrados e renda do benefício.

A determinação do volume de arroz cozido foi realizada em amostras de arroz provenientes das parcelas de 6,0 m^2. Para tanto, descascaram-se aproximadamente 200 g de arroz em casca, em um descascador da marca Nogueira, dos quais se utilizaram 100 g de arroz branco polido. Esta amostra foi lavada em água de torneira e a seguir colocada em becker de 300 mL. Para o cozimento, adicionou-se 2 mL de óleo de soja e deixou-se o arroz fritar por 60 segundos, quando adicionaram-se 240 mL de água, em ponto de ebulição, e deixou-se ferver em fogo baixo por 15 minutos. A quantificação do volume de arroz cozido foi realizado no próprio recipiente de cozimento.

O teor de proteína dos grãos foi quantificado após eles terem sido descascados, polidos e moídos. A massa dos grãos foi digerida com uma mistura de ácido sulfúrico concentrado e peróxido de hidrogênio (30 volumes), em chapa pré-aquecida a 300 ^oC. O N foi determinado em aparelho semi-micro Kjeldahl, conforme Tedesco et al. (1995). O teor de proteína foi estimado multiplicando-se o teor de N por 6,25.

O efeito dos tratamentos no rendimento de grãos, nos componentes do rendimento e na qualidade industrial e culinária dos grãos, foi efetuado por meio da análise de variância. Quando houve significância estatística, as médias foram comparadas pelo teste de Duncan ($p<0,05$). O mesmo teste foi realizado para os teores de N e de K na água superficial e no lençol freático.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os maiores teores de amônio no solo ocorreram até aproximadamente 54 e 47 dias após a semeadura do arroz, nas safras 2008/09 e 2009/10, respectivamente (Figuras 1 e 2). A partir desses períodos, estas concentrações caíram para valores muito baixos em todos os tratamentos, nas duas safras. O curto período de existência de altas concentrações de amônio no solo foi devido ao rápido consumo do N disponível pelas plantas de arroz. Os experimentos foram instalados em início do mês de novembro, e nesta época, as temperaturas diárias estavam bastante altas (dados não apresentados). Em períodos quentes e com boa disponibilidade de água, as plantas de arroz metabolizam rapidamente o N absorvido, acelerando o desenvolvimento e, em decorrência, aumentam significativamente o consumo de N disponível no solo (FAGÉRIA et al., 2003).

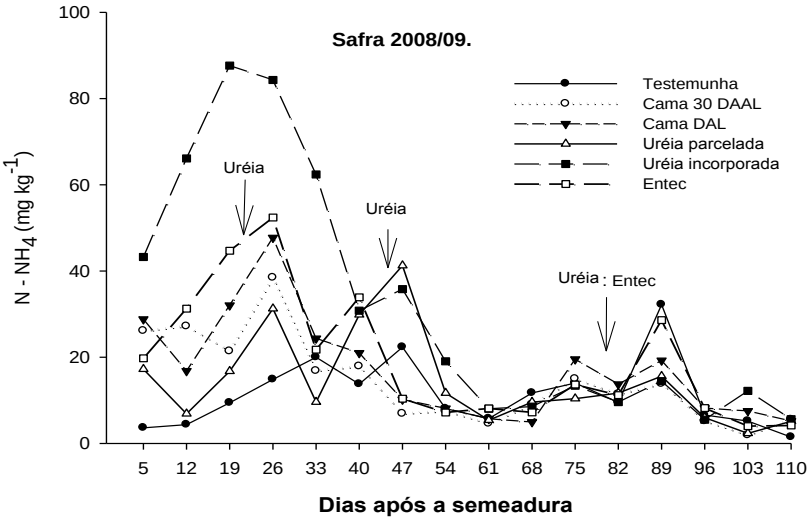

Figura 1. Variação temporal dos teores de amônio no solo alagado em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda no dia do alagamento para semeadura do arroz (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 45 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Entre os tratamentos que receberam adubos nitrogenados químicos e orgânicos, os maiores teores de amônio no solo, nas primeiras quatro semanas após a aplicação dos fertilizantes, ocorreram quando a uréia foi integralmente incorporada ao solo, tendo atingido

concentrações superiores a 80 mg de N kg^{-1} de solo, nas duas safras (Figuras 1 e 2). O Entec 26 propiciou a segunda maior concentração de amônio no solo na safra 2008/09 e a terceira na safra 2009/10, atingindo valores de 52 e 50 mg kg^{-1} de solo, respectivamente (Figura 1). O tratamento com cama de aves incorporada imediatamente antes da semeadura do arroz proporcionou picos de concentração de amônio no solo de 48 e 65 mg kg^{-1} nas safras 2008/09 e 2009/10, respectivamente; com a cama de aves incorporada 30 dias antes da semeadura do arroz, os valores atingiram 38 e 55 mg de N kg^{-1} de solo, respectivamente (Figuras 1 e 2). No tratamento em que a uréia foi aplicada de forma parcelada, as máximas concentrações de amônio no solo ocorreram aos 26 e aos 47 dias após a semeadura, na safra 2008/09, ou seja, logo após a primeira e a segunda aplicação de uréia, com valores máximos de 28 e 38 mg kg^{-1} de solo, respectivamente (Figura 1). Na safra 2009/10, o aumento no teor de amônio foi detectado apenas após a primeira aplicação de uréia, realizada aos 25 DAS, a qual atingiu 47 mg N kg^{-1} de solo (Figura 2). Nesta safra, por ocasião da aplicação de uréia aos 50 DAS, as plantas já apresentavam vigoroso desenvolvimento vegetativo, intensificando o consumo do N disponível no solo. Quando a uréia foi aplicada de forma parcelada, houve rápido decréscimo na concentração de amônio, comprovando o rápido consumo de N pelas plantas (Figuras 1 e 2). Por isso, recomenda-se aplicações de N, de forma parcelada, nos estádios de alta demanda do nutriente.

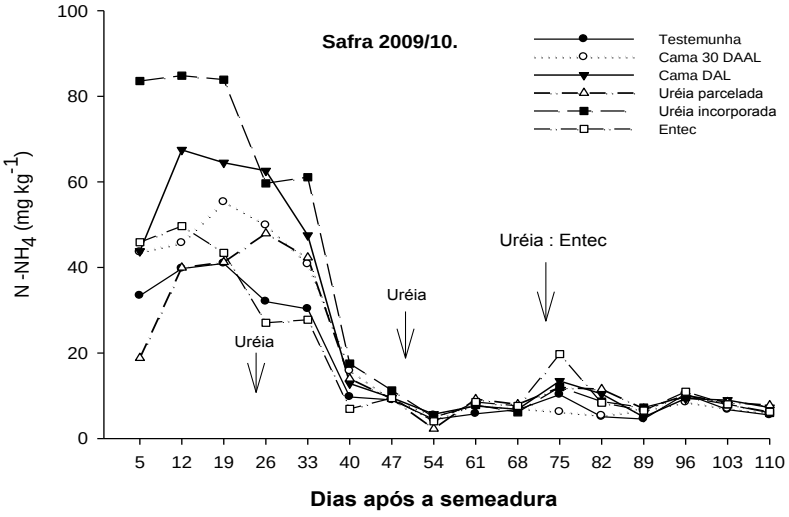

Figura 2. Variação temporal dos teores de amônio no solo alagado em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves, na dose equivalente a 120 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 73 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 73 dias após a semeadura.

Os baixos teores de amônio no solo quantificados a partir dos 57 e dos 47 dias após a semeadura, nas safras 2008/09 e 2009/10 respectivamente mostram que a incorporação dos fertilizantes nitrogenados antes da semeadura do arroz não é uma prática eficiente para nutrir as plantas no período de maior demanda de N. Isto ocorre porque o N da uréia, mesmo que incorporada ao solo alagado, pode ser perdido por volatilização na forma de amônia (MIKKELSEN, 1987; WATANABE, 2009) ou por nitrificação-desnitrificação (PONNANMPERUMA, 1972; REDDY et al., 1984). No caso da cama de aves, a formação inicial de amônio é proveniente do N amoniacal e do N na forma de uréia contidos neste fertilizante (GOLDEN, 2006). Portanto, quando a cama de aves é aplicada com antecedência à semeadura do arroz, parte do amônio formado pode passar para a forma de nitrato e ser perdido por desnitrificação (PONNAMPERUMA, 1972; WATANABE & MITSUI, 1979; MADRUGA, 1999). Por outro lado, a decomposição do N que está fazendo parte das estruturas orgânicas deste resíduo, é mais lenta em ambiente anaeróbico do que em na presença de oxigênio (PONNAMPERUMA, 1972; GOLDEN, et al., 2006) dificultando, dessa forma, a liberação de N nos estádios de maior demanda das plantas.

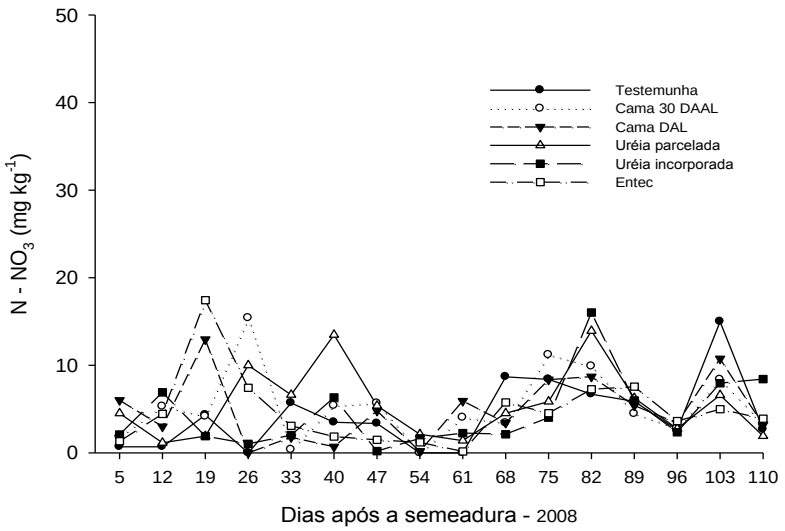

Figura 3. Teores de nitrato no solo alagado em diferentes épocas após a semeadura do arroz em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 45 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Os teores de nitrato não foram consistentes com relação aos tratamentos e foram baixos em todos os tratamentos em todas as coletas realizadas na safra 2008/09 (Figura 3). Na safra 2009/10, houve problemas nas análises de nitrato nas amostras e, por isso, os dados não foram apresentados. Todavia, os baixos valores verificados na safra 2008/09 mostram que o nitrato em solo alagado não é estável, perdendo-se para a atmosfera por desnitrificação (WATANABE & MITSUI, 1979; BURESH et al., 1991; ESPINAL, 1997; KHERA et al., 1999). Há muita controvérsia em relação à presença de nitrato em solo alagado. A maioria dos autores menciona que o nitrato diminui para valores irrisórios após uma ou duas semanas de alagamento (PONNAMPERUMA, 1972; WATANABE, 1979; MADRUGA, 1999; GRAUPE, 2005). Porém, autores detectaram valores próximos a 10 mg de $N\text{-}NO_3^-$ kg^{-1} de solo em solo alagado por períodos bem mais prolongados (GEORGE et al., 1993; KHERA et al., 1999; KIRK & KRONZUCKER, 2005). Espinal, (1997) aplicaram 80 kg de N ha^{-1} na forma de nitrato de cálcio e observaram que os teores de $N\text{-}NO_3^-$ atingiram 150 mg de N kg^{-1} de solo, na camada superficial de 0 a 2 cm, após oito horas, o qual deixou de existir no oitavo dia após a aplicação do fertilizante. No presente trabalho, a formação de nitrato no solo alagado provavelmente ocorreu pela presença de oxigênio na rizosfera (HOLZSCHUH, et al. 2009).

A concentração de amônio e de nitrato na água de drenagem das parcelas foi insignificante (Tabela 1). Na primeira drenagem, realizada aos 4 dias após a semeadura do arroz, os teores de amônio foram inferiores a 1,0 mg L^{-1} de $N\text{-}NH_4^+$ na maioria dos tratamentos e 1,2 mg no tratamento com uréia incorporada ao solo. Embora tenha havido maior teor de amônio no tratamento com uréia incorporada o valor é irrisório e não apresenta risco de contaminação da água, visto que o Conama (CONAMA, 2005), admite até 10 mg L^{-1} de NO_3^- para água potável. Na água da segunda drenagem, realizada 20 dias antes da colheita, a concentração de amônio era insignificante (Tabela 1). A água utilizada para irrigação, captada do rio Itajaí Mirim, possuía 0,5 mg L^{-1} de $N\text{-}NH_4^+$ (Tabela 1). Isto mostra que a pouca quantidade de amônio que havia na água de irrigação foi consumida pelo arroz antes da segunda drenagem.

Tabela 1. Teor de nitrogênio mineral na água de drenagem das parcelas do arroz irrigado, cultivado em sistema pré-germinado, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de três repetições.

Tratamento	NH_4^+		NO_3^-	
	1ª drenagem[1/]	2ª drenagem	1ª drenagem	2ª drenagem
	mg L^{-1}			
Testemunha	0,4 b[2/]	0,1 [ns]	0,3 [ns]	0,2 [ns]
Cama 30 DAAL	0,4 b	0,1	0,2	0,1
Cama DAL	0,5 b	0,1	0,3	0,1
Uréia parcelada	0,5 b	0,1	0,3	0,1
Uréia incorporada	1,2 a	0,1	0,6	0,0
Entec	0,7 ab	0,1	0,5	0,1
Água de irrigação	0,5		0,4	

[1/] A primeira drenagem foi realizada quatro dias após a semeadura do arroz e a segunda 20 dias antes da colheita. A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 45 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

[2/] Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Duncan ($p<0,05$).

A concentração de nitrato na água de drenagem variou com o tratamento de 0,2 a 0,6 mg L^{-1} de $N\text{-}NO_3^-$ na primeira e de 0,0 a 0,2 mg de $N\text{-}NO_3^-$ L^{-1} na segunda drenagem (Tabela 1). Na água de irrigação, o teor de nitrato era de 0,5 mg L^{-1} de $N\text{-}NO_3^-$ (Tabela 1). Portanto, a fertilização com adubos nitrogenados na cultura do arroz irrigado não eleva os teores de nitrato na água de drenagem, cujas plantas, absorvem o nitrato presente na água de irrigação melhorando, dessa forma, a qualidade ambiental da mesma. No sistema de cultivo de arroz pré-germinado, são comuns concentrações maiores de N mineral na água, especialmente na primeira drenagem, normalmente realizada entre três e cinco dias após a semeadura do arroz. Machado et al., (2006) compararam alguns sistemas de cultivo de arroz irrigado e verificaram teores de amônio e nitrato de 2,5 e 1,2 mg L^{-1}, respectivamente, na água da primeira drenagem de uma lavoura cultivada no sistema pré-germinado. Mesmo assim, segundo os autores, os teores estão dentro dos limites da legislação vigente.

A concentração de K na água de drenagem variou entre os tratamentos (Tabela 2). Na primeira drenagem, a maior concentração de potássio na água ocorreu no tratamento que recebeu cama de aves aplicada na véspera da semeadura do arroz, atingindo 5,9 mg L^{-1} de K. O K não faz parte de nenhum composto orgânico estável e, portanto, foi totalmente solubilizado após a aplicação do resíduo animal ao solo (ERNANI, 2002). Na água da

segunda drenagem, os teores de K foram inferiores aos verificados na primeira drenagem, ficando abaixo de 2,5 mg de K L^{-1} em todos os tratamentos (Tabela 2). Além disso, diferentemente do N e do P, o K não tem nenhum efeito danoso na qualidade da água (ISHERWOOD, 2003). A legislação ambiental de Santa Catarina não possui padrões para o K em efluentes de lavouras de arroz irrigado. A resolução 357/2005 do Conama também não impõe limites para o K. A Resolução 36/90 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) permite até 875 mg L^{-1} de K na água potável. Relativamente a este valor, os teores de K encontrados nas águas de drenagem das parcelas são irrisórios e não provocam nenhum dano aos mananciais de água.

Tabela 2. Teor de potássio na água de drenagem das parcelas cultivadas com arroz irrigado, em sistema pré-germinado, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de três repetições.

Tratamento	Teor de K	
	1ª drenagem	2ª drenagem
	---------- mg L^{-1} ----------	
Testemunha	3,8 b[1/]	0,8 b
Cama 30 DAAL	4,0 b	2,4 a
Cama DAL	5,9 a	1,0 ab
Uréia parcelada	3,9 b	1,8 ab
Uréia incorporada	3,8 b	1,3 ab
Entec	4,8 b	2,3 a
CV (%)	*15,8*	*40,5*

[1/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferenciam entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Na solução do subsolo, os maiores teores de K ocorreram na primeira coleta, realizada aos 30 dias após a semeadura do arroz (Tabela 3). Nessa coleta, o maior teor de K ocorreu no tratamento testemunha (sem N), tendo atingido 7,5 mg L^{-1} o qual somente diferiu do tratamento com uréia incorporada ao solo, que apresentou 5,6 mg L^{-1} (Tabela 3). Nas coletas de solução de subsolo realizadas aos 60 e aos 90 dias após a semeadura do arroz, não houve diferença nos teores de K entre os tratamentos (Tabela 3). Além disso, os teores de K

verificados nas amostras estão dentro da faixa de teores de 1,5 a 11,5 mg L^{-1} encontrados na solução de solos de Santa Catarina (ERNANI, 2008).

Tabela 3. Teor de potássio na solução do subsolo, a 50 cm de profundidade nas parcelas cultivadas com arroz irrigado, em sistema pré-germinado,, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de três repetições.

Tratamento	Teor de K		
	1ª coleta[1/]	2ª coleta	3ª coleta
	---------- mg L^{-1} ----------		
Testemunha	7,5 a[2/]	4,6 [ns]	3,9 [ns]
Cama 30 DAAL	6,7 ab	3,8	3,6
Cama DAL	6,3 ab	3,7	3,6
Uréia parcelada	7,3 ab	4,4	3,9
Uréia incorporada	5,6 b	2,9	3,0
Entec 26	7,0 ab	3,9	3,5
CV (%)	*12,1*	*19,3*	*26,4*

[1/]Coletas de solução do solo realizadas aos 30, 60 e 90 DAS (dias após a semeadura do arroz), respectivamente.
[2/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferenciam entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Os teores de N mineral na solução do subsolo foram inferiores a 1,0 mg de N L^{-1} de solução em todos os tratamentos (Tabela 4). Mesmo havendo diferenças entre alguns valores, estes são muito baixos, pois a resolução do Conama (CONAMA, 2005), admite valores para água potável de até 10 mg de $N\text{-}NO_3^-$ L^{-1} sendo que o amônio sequer é citado na referida resolução.

Tabela 4. Teor de nitrogênio na solução do subsolo, a 50 cm de profundidade nas parcelas cultivadas com arroz irrigado, em sistema pré-germinado, na safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de três repetições.

Tratamento	Teor de $N\text{-}NH_4^+$			Teor de $N\text{-}NO_3^-$		
	1ª coleta[1/]	2ª coleta	3ª coleta	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta
	---------- mg L^{-1} ----------					
Testemunha	0,2[ns]	0,0 [ns]	0,3 b [ns]	0,0 [ns]	0,0	0,0 b [2/]
Cama 30 DAAL	0,2	0,1	0,5 b	0,0	0,1	0,1 b
Cama DAL	0,1	0,2	0,6 ab	0,0	0,0	0,5 b
Uréia parcelada	0,0	0,1	1,0 a	0,0	0,0	0,8 a
Uréia incorporada	0,0	0,0	0,3 b	0,0	0,1	0,6 ab
Entec	0,1	0,1	0,4 b	0,0	0,0	0,0 b

[1/] Primeira coleta de solução realizada aos 30 dias após a semeadura (DAS), a segunda aos 60 e a terceira aos 90 DAS. A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

[2/] Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan ($p<0,05$).

Na safra 2008/09, a maior concentração de N na fitomassa colhida aos 40 DAS (36 mg kg^{-1}) foi encontrada nas plantas do tratamento com uréia integralmente incorporada na formação da lama, não tendo havido diferenças entre os demais tratamentos (Tabela 5). Já aos 65 DAS, a maior concentração de N na fitomassa das plantas ainda ocorreu no tratamento com uréia incorporada ao solo, porém já houve diferença entre a maioria dos tratamentos que receberam adubo nitrogenado em relação à testemunha (sem N), mostrando o efeito do N aplicado na sua absorção. Por ocasião da DPF, as maiores concentrações de N foram encontradas nos tratamentos com Entec e uréia parcelada (Tabela 5), e isto se deveu à aplicação de N em cobertura nesses dois tratamentos. Na última amostragem, realizada por ocasião do florescimento, foram coletadas apenas as folhas bandeira. Embora tenha havido diferença entre os tratamentos, esta não foi expressiva (Tabela 5), mostrando, nesse caso, que houve deslocamento do N das partes mais velhas da planta para a folha bandeira.

Tabela 5. Teor de N no tecido foliar das plantas de arroz cultivadas em sistema pré-germinado, nas safra 2008/09, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições.

Tratamento	40 (DAS)	65 (DAS) [1/]	80 (DPF)[2/]	102 (Floração)
	---------- mg kg^{-1} ----------			
Testemunha	23 b[2/]	12 e	10 c	21 b
Cama 30 DAAL	26 b	14 de	11 c	22 ab
Cama DAL	25 b	16 c	11 c	22 ab
Uréia parcelada	28 b	20 a	15 a	23 a
Uréia incorporada	36 a	18 b	14 b	22 ab
Entec 26	27 b	15 cd	15 a	21 b
CV (%)	*9,7*	*7,9*	*6,2*	*3,7*

[1/] DAS – Dias após a semeadura; DPF - diferenciação do primórdio floral

[2/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferenciam entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

A concentração de nutrientes na parte aérea do arroz é um indicativo importante do estado nutricional da planta e, por conseqüência, da produção de grãos (SCIVITTARO, et al., 2005; KNOBLAUCH & STUKER, 2007 e 2009; POCOJESKI, 2007). Além de uma boa nutrição durante o período vegetativo, a concentração, especialmente de N, na fitomassa durante o estádio da DPF (R0) é decisivo para incrementar a produtividade de grãos (FAGÉRIA, 2003). Nesse caso, as maiores concentrações de N na fitomassa foram obtidas nos tratamentos com uréia parcelada e uréia incorporada ao solo (Tabela 5). A literatura sobre teores adequados de N nas plantas de arroz não é consistente. O Manual de Recomendação de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (SBCS, 2004), considera adequados quando os teores de N nas folhas do arroz encontram-se entre 26 e 42 mg kg^{-1}, no estádio R0 (diferenciação da panícula).

Na safra 2009/10, foram realizadas coletas de parte aérea apenas nos estádios de perfilhamento pleno (V6) e na floração (R5). Houve diferenças ($p<0,05$) entre os tratamentos na concentração de N na fitomassa colhida aos 60 DAS, estádio V6 (Tabela 6) e o maior teor (16 mg kg^{-1}) ocorreu no tratamento com uréia parcelada, não tendo havido diferença entre os demais tratamentos com adubação nitrogenada, porém todos proporcionaram maior teor N do que a testemunha. Análises da fitomassa realizadas por ocasião da floração do arroz, na safra 2009/10, revelaram que a maior concentração de N foi obtido no tratamento com uréia

parcelada, a qual atingiu 10 mg kg^{-1}, que não houve diferença ($p<0,05$) entre os demais tratamentos que receberam adubação nitrogenada e que todos os tratamentos com adubação nitrogenada obtiveram maior concentração de N na fitomassa do que o tratamento testemunha (sem N) (Tabela 6). Isto mostra que houve efeito da adição de N na concentração de N nas plantas de arroz e, mostra também que, com relação ao N, o tratamento com uréia parcelada, propiciou um melhor estado nutricional das plantas.

Tabela 6. Teor de N no tecido foliar das plantas de arroz cultivadas em sistema pré-germinado, nas safra 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. A dose de todos os fertilizantes foi equivalente a 120 kg de N ha^{-1}. Médias de quatro repetições.

Tratamento	Dias após a semeadura (estádio)	
	60 (V8)	105 (R5 = Floração)
	---------- mg kg^{-1} ----------	
Testemunha	11 d[1/]	7 c
Cama 30 DAAL	13 c	8 b
Cama DAL	15 b	9 b
Uréia parcelada	16 a	1 a
Uréia incorporada	14 bc	9 b
Entec 26	14 bc	9 b
CV (%)	*6,6*	*4,5*

[1/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferenciam entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). A cama de aves foi incorporada totalmente no dia da formação da lama e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Houve diferenças ($p<0,05$) no acúmulo de N pelas plantas de arroz tanto aos 60 DAS quanto na floração (Figura 4). O maior acúmulo de N, aos 60 DAS, ocorreu no tratamento com uréia incorporada ao solo e com cama de aves incorporada imediatamente antes da semeadura do arroz, os quais acumularam 101 e 97 kg de N ha^{-1}, respectivamente, seguidos pela uréia parcelada e pelo Entec que acumularam em torno de 90 e 80 kg de N ha^{-1}, respectivamente, depois pelo tratamento com cama de aves incorporada com 30 dias de antecedência, com aproximadamente 70 kg de N ha^{-1} e por último o tratamento testemunha (sem N) onde as plantas acumularam 53 kg de N ha^{-1} (Figura 4).

A quantidade de N acumulada pelas plantas de arroz até o estádio de florescimento pleno, na safra 2009/10, foi maior no tratamento com uréia parcelada o qual acumulou 178 kg de N ha^{-1}, seguido pelo Entec 26, com 162 kg de N ha^{-1}. Na sequência vêm uréia incorporada

ao solo e a cama de aves incorporada imediatamente antes da semeadura do arroz, que acumularam em torno de 150 e 147 kg de N ha^{-1} cada um seguidos pela cama de aves incorporada 30 dias antes da semeadura, com o acúmulo de 140 kg de N ha^{-1} e, por último, a testemunha (sem N), que acumulou 110 kg de N ha^{-1} (Figura 4)

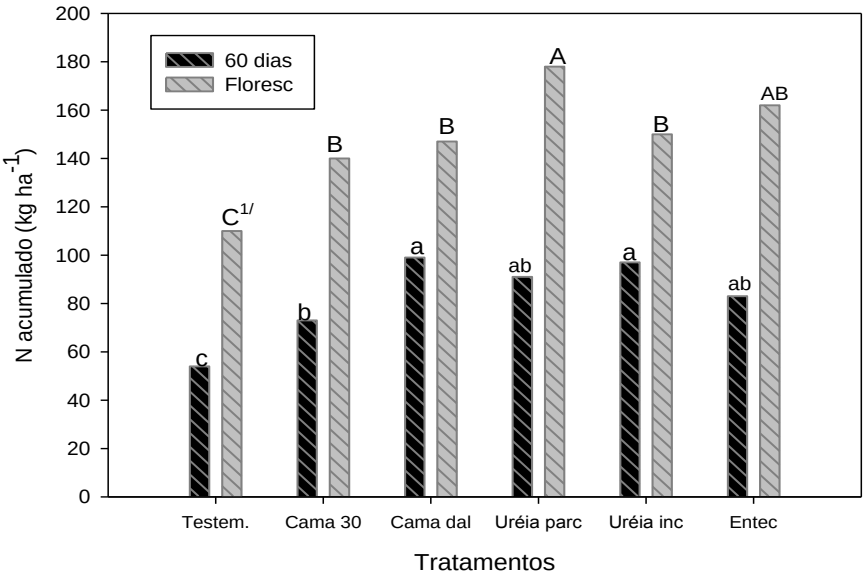

Figura 4. N acumulado na parte aérea do arroz aos 60 dias após a semeadura e por ocasião do florescimento em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves, na dose equivalente a 120 kg de N ha^{-1}. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento do solo e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama dal) ou 30 dias antes (cama 30); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia inc) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parc); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

[1/] Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas para o acúmulo de N estádio de florescimento e minúsculas para o acúmulo de N aos 60 dias após a semeadura, não diferem entre si pelo teste de Duncan ($p<0,05$).

Os fertilizantes nitrogenados químicos acumularam, na fitomassa, até o estádio de florescimento pleno 34, 26 e 20 % da quantidade de N adicionada ao solo nos tratamentos com uréia parcelada, Entec 26 e uréia incorporada ao solo antes da semeadura, respectivamente. Já os fertilizantes nitrogenados orgânicos acumularam 19 e 15 % da quantidade de N aplicada nos tratamentos com Cama de aves incorporada no dia do alagamento e 30 dias antes, respectivamente. Na China, os índices de recuperação de N da uréia em lavouras de arroz foi, em média, de 29% enquanto nas estações experimentais foi de 41% (DOBERMAN, 1998). Em Arkansas - EUA, a recuperação de N pelo arroz irrigado fertilizado com cama de aves e alagado aos 30 dias após a semeadura, variou de 5 a 25%, (Salton et al., 2003) numa magnitude inversamente proporcional à dose aplicada. Portanto, em

termos de aproveitamento do N pelas plantas de arroz, a uréia deve ser aplicada parceladamente enquanto a cama de aves deve ser incorporada próximo à semeadura do arroz.

Os fertilizantes nitrogenados orgânicos e minerais aumentaram a produtividade de grãos de arroz, nas duas safras (Tabela 7). Na safra 2008/09, os maiores rendimentos foram obtidos nos tratamentos com uréia parcelada em três coberturas e com o Entec 26, os quais produziram 9,95 e 9,08 t ha^{-1}, correspondendo a um acréscimo de 41 e 28% relativamente à testemunha (sem N) (Tabela 7). Os tratamentos com cama de aves, incorporada 30 dias antes da semeadura ou na semeadura, produziram 21 e 18% acima do rendimento da testemunha (Tabela 7).

Tabela 7. Rendimento de grãos de arroz da cultivar SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/2009 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições.

Tratamento	Rendimento de grãos	
	Safras	
	2008/09	2009/10
	---------- kg ha^{-1} ----------	
Testemunha	7080 c[1/]	7186 c[1/]
Cama 30 DAAL	8580 b	7926 a
Cama DAL	8380 b	8043 a
Uréia parcelada	9950 a	8110 a
Uréia incorporada	8610 b	7474 bc
Entec 26	9080 ab	7695 ab
CV (%)	*7,5*	*3,6*

[1/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}, na safra 2008/09 e a 120 kg ha^{-1} em todos os tratamentos que receberam N, na safra 2009/10. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Na safra 2009/10, embora tenha sido utilizada maior dose de N em todos os tratamentos que receberam adubação nitrogenada, as produtividades de grãos foram, na média dos tratamentos, inferiores aos obtidos na safra anterior (Tabela 7). Nesta safra, os maiores rendimentos de grãos ocorreram nos tratamentos com uréia parcelada, com cama de aves incorporada imediatamente antes da semeadura e com cama de aves incorporada 30 dias antes, os quais produziram ao redor de 8,0 t ha^{-1} (Tabela 7), correspondendo a um acréscimo

de aproximadamente 11% relativamente ao tratamento que não recebeu adubos nitrogenados. Os menores rendimentos ocorreram nos tratamentos com Entec 26 com 7,70 t ha^{-1} (7% superior à testemunha) e uréia incorporada ao solo, que não diferiu ($p<0,05$) da testemunha (Tabela 7). As menores produtividades de grãos ocorridos na safra 2009/10 em relação à safra anterior são atribuídas às intensas chuvas ocorridas na fase de implantação da lavoura e às altas temperaturas durante a fase de florescimento e enchimento dos grãos de arroz (dados não apresentados). Nesse caso, as intensas chuvas dificultaram a implantação da cultura e o calor excessivo durante a fase reprodutiva esterilizou as espiguetas (Tabela 10) provocando baixa produtividade de grãos. Por outro lado, o alagamento antecipado do solo, causado pelas chuvas, aumentou a disponibilidade de amônio no solo de praticamente todos os tratamentos (Figura 2). Estes dois eventos climáticos, além de causarem menor produtividade de grãos, ocasionaram diminuição nas diferenças entre os tratamentos que receberam adubação nitrogenada e a testemunha (Tabela 7). Além disso, as menores diferenças verificadas entre os tratamentos que receberam uréia e os com cama de aves podem ser devidas ao efeito residual da cama de aves aplicada na safra anterior, comprovado pelos maiores teores de amônio no solo nas primeiras semanas após a semeadura do arroz (Figuras 1 e 2).

Não houve diferenças entre os tratamentos ($p<0,05$) para o percentual de grãos inteiros, quebrados e renda do benefício (total) em nenhuma das safras avaliadas (Tabela 8). Verifica-se, todavia, que o percentual de grãos inteiros na safra 2008/09 foi menor do que na safra 2009/10 e esta diferença pode estar relacionada com as condições climáticas ocorridas durante o amadurecimento dos grãos, com as condições de secagem das amostras ou ainda, com a regulagem do equipamento de descascamento dos grãos.

Tabela 8. Renda do benefício da cultivar SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições.

Tratamento	Safra 2008/09			Safra 2009/10		
	Inteiros	Quebrados	Total	Inteiros	Quebrados	Total
	---------- % ----------			---------- % ----------		
Testemunha	55,3[ns]	13,6 [ns]	68,8 [ns]	64,0 [ns]	6,2 [ns]	70,2 [ns]
Cama 30 DAAL	54,3	14,3	68,6	63,0	7,1	70,2
Cama DAL	53,0	15,0	68,0	62,9	7,6	70,5
Uréia parcelada	53,8	15,1	68,9	63,7	6,8	70,5
Uréia incorporada	53,9	14,0	67,9	63,5	7,1	70,5
Entec	53,2	14,2	67,4	64,1	6,5	70,6
CV (%)	*3,8*	*10,7*	*1,8*	*1,9*	*14,8*	*0,6*

[ns] Não significativo pelo teste F ($p<0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}, na safra 2008/09 e a 120 kg ha^{-1} em todos os tratamentos que receberam N, na safra 2009/10. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

O número de panículas por metro quadrado e o número de grãos por panícula diferiram entre os tratamentos ($p<0,05$), nas duas safras (Tabela 9). Na safra 2008/09, à exceção do tratamento com cama de aves aplicada no dia do alagamento, todos os demais tratamentos que receberam N proporcionaram um número (456) maior de panículas m^{-2} do que a testemunha (408) (Tabela 9). Na safra 2009/10, apenas o tratamento com uréia parcelada teve maior quantidade de panículas m^{-2} (772) do que a testemunha (638), sendo que os demais tratamentos que receberam N não diferiram da testemunha. Na safra 2008/09, o número de grãos por panícula foi maior nos tratamento com uréia parcelada e Entec 26 do que nos tratamentos que receberam cama de aves ou a testemunha (Tabela 9); já na safra 2009/10, não houve diferenças entre os tratamentos. Na safra 2008/09 o número maior de grãos por panícula, nos tratamentos com uréia parcelada e Entec é devido à maior disponibilidade de N no estádio da diferenciação do primórdio floral (R0). Na safra 2009/10, o número de grãos cheios por panícula foi bastante afetado pelas altas temperaturas ocorridas na fase reprodutiva do arroz (dados não apresentados), comprovado pelo alto índice de esterilidade das espiguetas (Tabela 10), o que, de certa forma, mascarou o efeito dos tratamentos nesse particular.

O número de panículas e o número de grãos por panícula são os dois componentes do rendimento que mais influenciam o rendimento de grãos (AGUILAR & GRAU, 1994; KNOBLAUCH & SCHIOCCET, 2001; FAGÉRIA, et al., 2003; KNOBLAUCH et al., 2005). As duas etapas que mais interferem nesses componentes do rendimento é a fase de perfilhamento (V4 a V8) e a fase reprodutiva (R0 a R4) (SOSBAI, 2010).

Tabela 9. Número de panículas por metro quadrado e de grãos por panícula da cultivar de arroz SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado. Safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições.

Tratamento	Panículas m^{-2}		Grãos $panícula^{-1}$	
	Safras			
	2008/09	2009/10	2008/09	2009/10
	N^o			
Testemunha	408 b[1/]	638 b	74 b	74 [ns]
Cama 30 DAAL	456 a	744 ab	74 b	76
Cama DAL	448 ab	661 ab	78 b	82
Uréia parcelada	463 a	772 a	93 a	80
Uréia incorporada	461 a	629 b	75 b	82
Entec	460 a	724 ab	94 a	79
CV (%)	*6,4*	*11,6*	*5,3*	*8,8*

[1/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferenciam entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}, na safra 2008/09 e a 120 kg ha^{-1} em todos os tratamentos que receberam N, na safra 2009/10. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Na safra 2008/09 a esterilidade de espiguetas foi maior no tratamento com uréia em cobertura e com Entec 26, atingindo 14,4 e 12,3 %, respectivamente; nos demais tratamentos, o percentual de esterilidade foi entre 10 a 12% (Tabela 10). Já na safra 2009/10, devido às altas temperaturas ocorridas durante a fase reprodutiva (dados não apresentados), a esterilidade de espiguetas foi maior, entre 19 a 25% (Tabela 10), e à exceção do tratamento com uréia incorporada o qual teve um percentual menor de esterilidade, não houve diferenças entre os demais tratamentos. Embora a esterilidade de espiguetas não seja um componente do rendimento do arroz, ela afeta o número de grãos cheios por panícula. Doses excessivas de N, normalmente provocam o aumento da esterilidade de espiguetas (AGUILAR & GRAU, 1994; EBERHARDT, et al., 1995; KNOBLAUCH, et al., 2005).

Houve diferença ($p<0,05$) entre os tratamentos no peso dos grãos de arroz apenas na safra 2008/09 (Tabela 10). Nesta safra, os menores valores ocorreram nos tratamentos com uréia parcelada, com Entec 26 e na testemunha, os quais ficaram com peso de aproximadamente 30 g por 1000 grãos (Tabela 10). O peso de grãos obtido nas duas safras avaliadas está dentro da média desta mesma cultivar (KNOBLAUCH et al., 2009; SCHIOCCHET, et al. 2009). Embora altas doses de N possam reduzir o peso dos grãos de arroz, este pouco afeta o rendimento de grãos da lavoura (EBERHARDT, et al., 1995; KNOBLAUHC & SCHIOCCET, 2001; KNOBLAUCH et al. 2005).

Tabela 10. Esterilidade de espiguetas e peso de grãos da cultivar de arroz SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições.

Tratamento	Esterilidade de espiguetas		Peso de 1000 grãos	
	safras			
	2008/09	2009/10	2008/09	2009/10
	%		g	
Testemunha	10,0 b	21,6 ab	30,8 bc	31,3 [ns]
Cama 30 DAAL	10,2 b	22,5 ab	31,5 ab	31,1
Cama DAL	10,5 b	19,3 ab	31,4 ab	31,0
Uréia parcelada	14,4 a	21,2 ab	30,3 c	30,6
Uréia incorporada	11,7 b	19,8 b	31,8 a	30,6
Entec	12,3 ab	24,8 a	30,3 c	31,7
CV (%)	*13,3*	*10,1*	*1,7*	*8,8*

[1/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferenciam entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$)

[ns] Não significativo ($p<0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}, na safra 2008/09 e a 120 kg ha^{-1} em todos os tratamentos que receberam N, na safra 2009/10. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Não houve diferenças entre os tratamentos para o volume de arroz após o cozimento, em nenhuma das safras (Tabela 11). O volume do arroz cozido atingiu, na média dos tratamentos, 164 e 157 cm^3 nas safras 2008/09 e 2009/10, respectivamente (Tabela 11). Considerando que foi utilizado um volume de 120 cm^3 de arroz cru, o volume aumentou 37 e 31% em relação ao inicial, nas safras 2008/09 e 2009/10 respectivamente.

Tabela 11. Volume, após o cozimento, de 100 gramas (120 cm^3) de grãos de arroz branco polido da cultivar de arroz SCS 114 Andosan, cultivada em sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves. Médias de quatro repetições.

Tratamento	Volume do arroz	
	Safras	
	2008/09	2009/10
	---------- cm^3 ----------	
Testemunha	165 [ns]	157 [ns]
Cama 30 ADAL	164	157
Cama DAL	163	158
Uréia parcelada	166	158
Uréia incorporada	164	158
Entec 26	163	155
CV (%)	*2,7*	*1,6*

[ns] Não significativo pelo teste F ($p<0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}, na safra 2008/09 e a 120 kg ha^{-1} em todos os tratamentos que receberam N, na safra 2009/10. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

Na safra 2008/09, o teor de proteína dos grãos de arroz polidos não foi afetado pelos tratamentos, os quais atingiram uma média de 7,1 % (Tabela 12). Na safra 2009/10, os teores de proteína dos grãos dos tratamentos com uréia parcelada e uréia incorporada atingiram 7,6 %, sendo superiores ao da testemunha, que foi de 7,2% (Tabela 12). Entretanto, a porcentagem de proteína dos grãos oriundos dos tratamentos com uréia não diferiu ($p<0,05$) dos grãos produzidos nos demais tratamentos que receberam adubação nitrogenada (Tabela 12). Isto mostra que a maior disponibilidade de N às plantas pode aumentar o teor de proteína dos grãos.

Tabela 12. Teor de proteína nos grãos de arroz (teor de N x fator 5,95), branco polido, da cultivar SCS 114 Andosan cultivada no sistema pré-germinado, nas safras 2008/09 e 2009/10, em decorrência da época de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais (uréia e Entec 26) e de cama de aves Médias de quatro repetições.

Tratamento	Proteína dos grãos	
	Safras	
	2008/09	2009/10
	---------- % ----------	
Testemunha	7,0 [ns]	7,2 b[1/]
Cama 30 DAAL	6,9	7,4 ab
Cama DAL	7,2	7,6 ab
Uréia parcelada	7,2	7,8 a
Uréia incorporada	7,1	7,8 a
Entec 26	7,1	7,6 ab
CV (%)	*4,4*	*4,3*

[ns] Não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade de erro

[1/] Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferenciam entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). A cama de aves e a uréia foram aplicadas na dose equivalente a 105 kg de N ha^{-1} e o Entec 26 na dose equivalente a 79 kg de N ha^{-1}, na safra 2008/09 e a 120 kg ha^{-1} em todos os tratamentos que receberam N, na safra 2009/10. A cama de aves foi incorporada totalmente no dia do alagamento e preparo final do solo para semeadura do arroz (cama DAL) ou 30 dias antes (cama 30 DAAL); a dose de uréia foi incorporada toda na formação da lama (uréia incorporada) ou foi subdividida em três partes iguais e aplicada aos 25, 50 e 80 dias após a semeadura (uréia parcelada); a dose de N do Entec 26 foi incorporada 50% na formação da lama e 50% aplicada aos 80 dias após a semeadura.

2.5 CONCLUSÕES

1. A incorporação dos fertilizantes nitrogenados, tanto orgânico quanto minerais, antes da semeadura do arroz, não são eficientes para disponibilizar o nitrogênio nos estádios de maior demanda pelas plantas;
2. Não houve contaminação da água de drenagem nem do lençol freático por N mineral ou por K;
3. A qualidade industrial e culinária do arroz não foi afetada pelo tipo de fertilizante nitrogenado utilizado;
4. O teor de proteína dos grãos de arroz pode ser aumentado pelo aumento na disponibilidade de N durante o cultivo do arroz, mas não é afetado pelo tipo de fertilizante nitrogenado utilizado.

3 CAPÍTULO II

MOBILIDADE DO NITROGÊNIO EM SOLO ALAGADO APÓS A APLICAÇÃO DE URÉIA

3.1 RESUMO

O nitrogênio (N) é o nutriente mais requerido pelo arroz irrigado e a uréia é o fertilizante nitrogenado mais utilizado na cultura. Em Santa Catarina, são utilizadas mais de 30 mil toneladas do fertilizante, a cada safra. Pouco se conhece sobre o destino do N quando a uréia é aplicada sobre a lâmina de água. O presente estudo teve por objetivo monitorar a formação e o destino do N mineral no perfil de um solo alagado, após a aplicação de uréia sobre a lâmina de água. O experimento foi conduzido no laboratório. As unidades experimentais foram colunas de PVC com 7,0 cm de diâmetro e 24 cm de altura, formadas pela justaposição de anéis concêntricos, sendo o superior com 6 cm de altura, seguidos de 4 anéis com 1,0 cm, de 3 anéis com 2,0 cm e de uma tampa basal com 8 cm de altura. As colunas foram parcialmente preenchidas com um Cambissolo Háplico que possuía 350 g kg^{-1} de argila e, sobre a superfície do solo foi colocado água com 4 cm de lâmina. Os tratamentos constaram de uma testemunha, sem aplicação de uréia, e da adição de 342 mg de uréia por coluna, que equivale a 400 kg ha^{-1} de N. As coletas de solo e de água foram realizadas de 12 em 12 horas, durante o primeiro dia, e aos 2, 4, 7, 10, 15 e 25 dias após a aplicação da uréia. As amostras de solo foram coletadas a cada centímetro até a profundidade de 4,0 cm e a cada 2,0 cm até a profundidade de 10 cm. No solo determinaram-se o amônio e o nitrato e na água, determinaram-se uréia, amônio e nitrato. A uréia demorou sete dias para se hidrolisar completamente e formar amônio. Não foi detectada a presença de nitrato em nenhuma das amostras analisadas. Houve alta concentração de amônio na camada de solo (0 a 1cm) atingindo 900 mg kg^{-1} de N de solo no 2º dia após a aplicação de uréia e, a partir daí se moveu lentamente para dentro do perfil, atingindo as concentrações máximas apenas no 10º dia, sendo 280 e 200 mg de N kg^{-1} de solo, nas camadas de 2,0 a 3,0 e 3,0 a 4,0 cm, respectivamente. A difusão do amônio perpendicularmente na coluna de solo foi maior até a profundidade 2,0 cm, com 1,6 mm h^{-1} e partir daí moveu-se a 0,6 mm h^{-1}. Sete dias após a aplicação da uréia, foram recuperados apenas 41% do N aplicado. A uréia aplicada sobre a lâmina de água se hidrolisa e forma amônio, sendo que parte do íon se difunde para o solo, uma pequena parte se mantém na lâmina de água e outra parte é perdida do sistema.

3.2 INTRODUÇÃO

O N é um nutriente altamente requerido pelo arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) (LOPES, 1995; FAGERIA, et al., 2003). Entretanto, a dinâmica do N no solo é bastante complexa, devido à multiplicidade de formas químicas do elemento e às reações e processos aos quais ele está sujeito (SCIVITTARO, 2006). Nos solos alagados, a complexidade é ainda maior, devido à existência de uma lâmina de água sobre o solo, de uma fina camada oxidada na superfície do mesmo, seguida por uma camada reduzida logo abaixo desta, e de uma outra camada oxidada em torno das raízes do arroz, criando diferentes sistemas de oxi-redução (REDDY et al., 1984; PONNANMPERUMA, 1972).

Para o arroz irrigado não são recomendados fertilizantes nítricos, uma vez que o nitrato é instável em ambientes com baixa concentração de oxigênio, sendo, portanto, recomendado apenas fertilizantes amoniacais ou formadores de amônio (SOSBAI, 2010; CFQS, 2004). Dentre os fertilizantes nitrogenados, a uréia é a fonte mais utilizada para o arroz irrigado, devido às várias vantagens que ela apresenta em relação aos demais fertilizantes amoniacais, incluindo menor custo por unidade de N e alta concentração de N, o que reduz o custo de transporte e de aplicação. Além disso, a uréia é compatível com um grande número de fertilizantes e defensivos (CANTARELA, 2007). Apesar das vantagens da uréia relativamente aos demais fertilizantes nitrogenados, o aproveitamento do N da uréia pelas plantas de arroz irrigado pode ser muito baixo, ao redor de 20 a 40%, se ela não for utilizada adequadamente (SING et. al., 1995; De DATTA et. al., 1988; SCIVITTARO, 2005).

No arroz irrigado cultivado em sistema pré-germinado recomendam-se três adubações de cobertura com uréia para as cultivares de ciclo longo, as quais devem ser aplicadas sobre lâmina de água (CQFS, 2004 e SOSBAI, 2010). Portanto, o entendimento do movimento do N mineral no solo é de fundamental importância, tanto para diminuir as perdas do N aplicado quanto para elucidar problemas de amostragem de solos alagados com a finalidade de quantificar o teor de N mineral nos solos que receberam uréia sobre a lâmina de água.

O experimento teve por objetivo estudar a formação e o movimento perpendicular do N mineral no perfil de um solo alagado, após a aplicação de uréia sobre a lâmina de água.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em laboratório, na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, em 2010. As unidades experimentais foram constituídas por colunas de PVC parcialmente preenchidas com solo. Cada coluna tinha 7,0 cm de diâmetro e 24 cm de altura, dos quais os 18 cm basais foram preenchidos com solo. Posteriormente elas receberam água com o objetivo de formar uma lâmina de 4,0 cm acima da superfície do solo. As colunas foram formadas pela justaposição de anéis concêntricos, sendo o superior com 6 cm de altura, seguidos de 4 anéis com 1,0 cm, de 3 anéis com 2,0 cm e de uma tampa basal com 8 cm de altura. Para unir os anéis e evitar o vazamento da água, foi utilizada fita adesiva.

Dentro de cada coluna de PVC foram colocados 692 cm^3 de solo, previamente alagado, coletado da camada superficial 0 a 15 cm de um Cambissolo Háplico, coletado na área experimental do Projeto Arroz da Estação Experimental da Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) em Itajaí, SC, que possuía pH-H_2O = 5,2, matéria orgânica (MO) = 24,0 g kg^{-1}; argila = 350 g kg^{-1}; e CTC_{pH7} = 7,2 $cmol_c$ kg^{-1}. Antes de ser colocado nas colunas, o solo foi seco ao ar, peneirado em malha de 5,0 mm e alagado durante 15 dias com o objetivo de simular a condição existente numa lavoura de arroz irrigado. Após ter sido colocado nas colunas de PVC, o solo recebeu mais água destilada até formar uma lâmina de água na superfície de 4,0 cm de altura.

Os tratamentos constaram de uma testemunha, sem aplicação de uréia, e da adição de 342 mg de uréia por coluna, que equivale a 400 kg ha^{-1} de N, com base na área superficial das colunas. Após a aplicação da uréia, as colunas foram mantidas em ambiente com temperatura controlada de 30^oC durante todo o período experimental.

As coletas de solo e de água foram realizadas de 12 em 12 horas, durante o primeiro dia, e aos 2, 4, 7, 10, 15 e 25 dias após a aplicação da uréia. Em cada uma destas épocas, coletou-se amostra da água que estava sobre a superfície do solo e, sequencialmente, o solo, em diferentes profundidades. Em cada uma das coletas de solo, foram desmontadas quatro colunas, sendo duas com uréia e duas sem N (testemunha). As amostras de solo foram coletadas nas seguintes profundidades: a cada centímetro até a profundidade de 4,0 cm e, abaixo disto, a cada 2,0 cm até a profundidade de 10 cm. Como as colunas foram desmontadas, cada amostra foi constituída por todo o volume de solo existente na referida camada, que foram separadas transversalmente na intersecção dos anéis.

Na água, determinaram-se os teores de uréia, amônio e nitrato. Para a determinação da uréia, parte da amostra foi previamente tratada com a enzima urease. Para tanto, em alíquotas de 20 mL de água, adicionou-se 10 mL de fosfato de potássio a pH 8,0 e 1,0 mL de solução de urease a 2% seguido de agitação manual por 15 segundos e repouso por 2 horas, na temperatura de 30ºC. A determinação do N da uréia e de amônio e nitrato na água foi feita de acordo com a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

Amostras de 10 g de solo saturado foram utilizadas para a extração de amônio e nitrato. O restante da amostra foi colocada em estufa, a 105ºC, para determinação da umidade. A extração do N mineral foi realizada com KCl 1,0 mol L^{-1} e as determinações foram realizadas em aparelho semi-micro Kjeldahl, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Os resultados apresentados representam as médias de duas repetições.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não foi detectada a presença de nitrato em nenhuma das amostras analisadas, tanto no solo quanto na água, em nenhuma das avaliações (dados não apresentados). Considerando que, para simular a condição de campo, o solo ficou alagado durante 15 dias, antes de ser colocado nas colunas de PVC, todo o nitrato que havia no solo desnitrificou e foi perdido para a atmosfera (PONNAMPERUMA, 1972; PATRICK & REDDY, 1978; MADRUGA, 1999).

O amônio oriundo da uréia se moveu lentamente no solo (Figura 1). A concentração de N amoniacal no solo na testemunha (sem N) foi de 40 mg kg^{-1} em todas as profundidades, e permaneceu praticamente constante durante os 25 dias de avaliação (Figura 1). Nas colunas onde foi aplicada uréia sobre a lâmina de água, a hidrólise da mesma teve início logo após a aplicação formando altas concentrações de amônio nas camadas superficiais do solo (Figura 1). Na primeira camada de solo (0,0 a 1,0 cm), a maior concentração de amônio ocorreu no 2º dia após a aplicação de uréia, atingindo 900 mg kg^{-1} de N. Na camada de solo de 1,0 a 2,0 cm, a concentração de amônio começou a aumentar já no primeiro dia após a aplicação da uréia, mas atingiu o máximo no 4º dia, com 460 mg kg^{-1} de N. Nas camadas inferiores, os teores de amônio começaram a aumentar somente a partir do 2º dia após a adição do fertilizante e a concentração máxima ocorreu no 10º dia, atingindo 280 e 200 mg kg^{-1} de N no solo, nas camadas de 2,0 a 3,0 e 3,0 a 4,0 cm, respectivamente (Figura 1). Somente aos 25 dias após a aplicação de uréia é que a concentração de amônio nos primeiros 4,0 cm de solo apresentava

valores semelhantes entre si (Figura 1), demonstrando que o movimento descendente do amônio no solo foi lento.

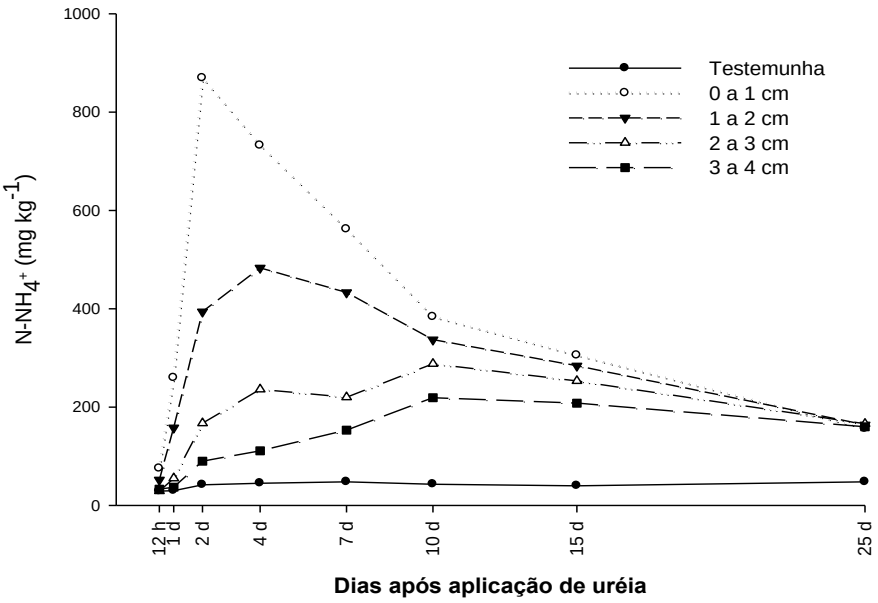

Figura 1. Concentração de amônio ao longo do tempo nas primeiras camadas de colunas de solo (0 a 1, 1 a 2, 2 a 3 e 3 a 4 cm) do tratamento com 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água e na camada de 0 a 4 cm do tratamento testemunha (sem N). Médias de duas repetições.

Quatro dias após a aplicação de uréia, parte do amônio formado já havia atingido a camada de 4,0 a 6,0 cm de solo, mas somente aos 15 dias o amônio havia atingido a camada de 8 a 10 cm (Figura 2). Aos 25 dias a concentração de amônio na camada de 8,0 a 10,0 cm era praticamente o dobro da concentração existente na testemunha, porém era apenas a metade da concentração verificada na camada de 0 a 4,0 cm (Figura 2). Isto mostra que a maior parte do amônio formado após a aplicação de uréia sobre a lâmina de água permaneceu na camada superficial até 4,0 cm por mais de 25 dias. Considerando que na camada superficial dos solos alagados existe uma fina camada oxidada, a alta concentração de amônio nessas camadas de solo pode favorecer a formação de nitrato a partir do amônio (PONNAMPERUMA, 1972). O nitrato, por ser um íon bastante móvel no solo, pode deslocar-se para a camada reduzida e ser perdido por desnitrificação (PONNAMPERUMA, 1972; WATANABE & MITSUI, 1979). Portanto, os altos teores de amônio nas primeiras camadas de solo podem propiciar altas perdas de N por desnitrificação, fato esse confirmado pela ausência de nitrato em todas as análises realizadas durante o período do experimento. Por outro lado, considerando que mais de 90 % das raízes do arroz irrigado se encontram na

camada superficial de solo de 0 a 10 cm (ESPINAL, 1997), altas concentrações de amônio nas primeiras camadas de solo devem facilitar a absorção do N pelas plantas minimizando as perdas por desnitrificação.

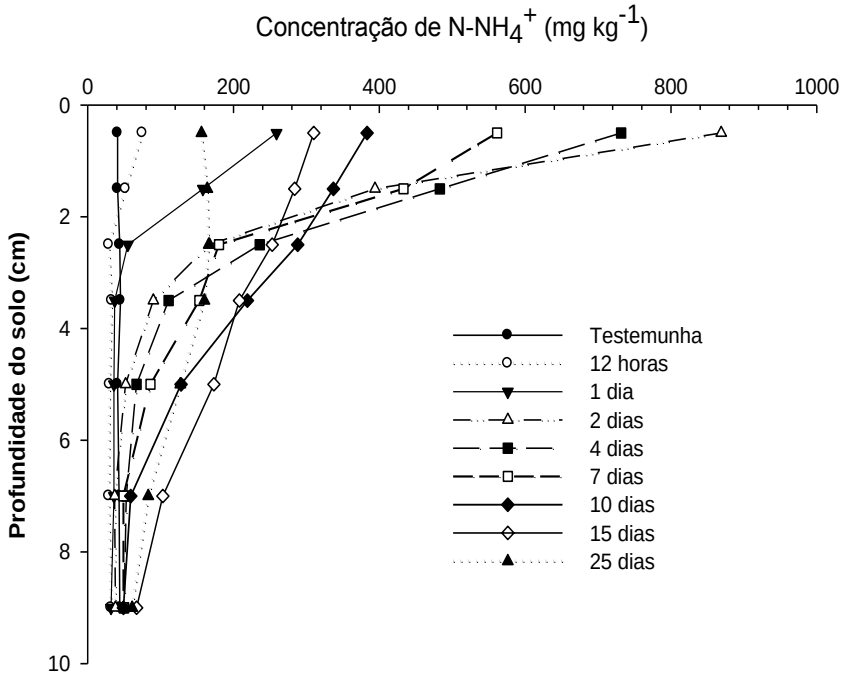

Figura 2. Concentração de amônio ao longo do tempo nas camadas de colunas de solo do tratamento com 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água e no tratamento testemunha (sem N). Médias de duas repetições.

A difusão do amônio perpendicularmente na coluna de solo foi maior nas primeiras 12 horas até a profundidade de 2,0 cm, atingindo uma taxa de 1,6 mm h^{-1}. A partir daí, o amônio demorou quatro dias para atingir a profundidade de 6,0 cm. Nesse caso, o amônio moveu-se em uma taxa média de 0,6 mm h^{-1}. Considerando que nos primeiros dias após a aplicação de uréia a concentração de amônio nos primeiros dois centímetros superficiais do solo era bastante alta (Figura 1), a elevada taxa de difusão ocorrida nas primeiras camadas de solo pode ser atribuída à alta concentração do amônio no solo (Figura 2) e ao maior teor de umidade das primeiras camadas (Figura 3).

Savant & De Datta (1980) verificaram que 30 dias após a aplicação de uréia sobre a lâmina de água o amônio havia atingido a profundidade de 14 cm no perfil do solo, obtendo, portanto, uma taxa de difusão aproximada de 0,2 mm h^{-1}. As diferenças encontradas na taxa de difusão do amônio nos solos são devidas, basicamente, às diferenças na concentração inicial do íon, ao teor de argila, ao grau de saturação por água e à capacidade de troca de

cátions (CTC) (BARBER, 1984). Além disso, nos solos alagados, a difusão do amônio também depende dos teores de ferro e manganês desses solos, uma vez que esses elementos deslocam o NH_4^+ das cargas facilitando o seu deslocamento no perfil (REDDY & PATRICK, 1984). Reddy & Patrick (1984), trabalhando com diferentes solos de cultivo de arroz irrigado, encontraram coeficientes de difusão do amônio que variaram entre 0,06 e 0,22 cm^2 dia^{-1}, para aqueles com alta e baixa CTC, respectivamente. Estes coeficientes de difusão de amônio encontrados nos solos alagados são muito superiores aos coeficientes de difusão dos solos de sequeiro que variaram entre 0,002 a 0,004 cm^2 dia^{-1} em solos com umidade volumétrica variável entre 5 e 30% (SAVANT & De DATTA, 1982).

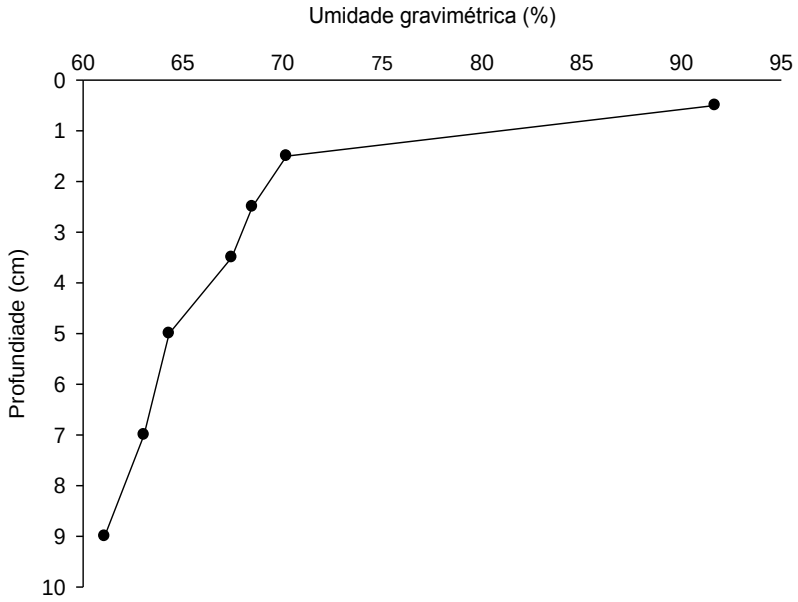

Figura 3. Umidade gravimétrica (base seca) do perfil do solo alagado, acondicionado em colunas de PVC com 7,0 cm de diâmetro. Médias de duas repetições

A concentração de N-uréia e de N-NH_4^+ na água existente acima da superfície do solo foi bastante elevada nos primeiros dias após a aplicação da uréia (Figura 4). No 1º dia, a concentração de N-uréia atingiu 327 mg L^{-1} de N enquanto que a concentração máxima de amônio ocorreu no 2º dia, atingindo 230 mg L^{-1} de N (Figura 4). A partir do 2º dia após a aplicação de uréia, os teores tanto de uréia quanto de amônio começaram a decrescer e praticamente deixaram de existir no 10º dia (Figura 4). O desaparecimento da uréia no 10º dia foi devido a sua completa hidrólise durante este tempo. No caso do amônio, uma parte difundiu para dentro do solo e a outra provavelmente se transformou em amônia e volatilizou. A demora verificada na hidrólise total da uréia é atribuída à menor ação da urease na água de

alagamento (SAVANT et al., 1985). Estudos comparativos realizados entre solos de sequeiro e solo alagado mostraram que a hidrólise da uréia foi mais rápida em solos de sequeiro, seguida pela camada oxidada dos solos alagados, pela camada reduzida destes e, por último, pela lâmina de água que está em contato com o solo (LINDAU et al., 1989). Os mesmos autores afirmam que a atividade da urease aumenta com o teor de água do solo até ao nível da capacidade de campo e depois começa a diminuir.

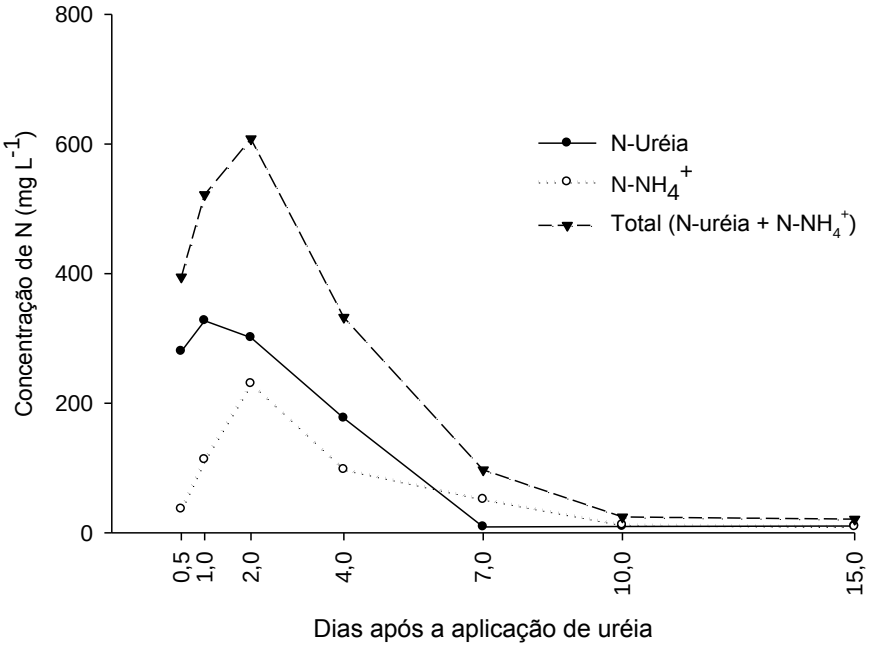

Figura 4. Concentração de $N\text{-}NH_4^+$ e de N-uréia na água que permaneceu sobre a superfície do solo, ao longo do tempo, decorrente da adição de 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água. Médias de duas repetições.

Considerando-se o amônio existente no solo, na profundidade de 0 a 10 cm, acrescido do N contido na lâmina de água tanto na forma de amônio quanto de uréia, e subtraindo-se o N existente na testemunha, 91% do aplicado, foi recuperado no 2º dia após a aplicação da uréia (Figura 5). Já no 7º dia após a aplicação de uréia, a recuperação foi de apenas 41%, mostrando que ocorreu algum tipo de perda. A queda brusca ocorrida no conteúdo de N decorrente da aplicação da uréia é atribuída, basicamente, às perdas de N por volatilização de amônia. Considerando que neste experimento utilizou-se uma alta dose de uréia sobre a lâmina de água e, por consequência, houve alta concentração de amônio na água (Figura 2), deve ter ocorrido também um aumento significativo do pH da água (medições não realizadas neste experimento), já que durante a hidrólise da uréia há um aumento significativo do pH do

meio (VLECK et al., 1980; MIKKELSEN, 1987; ERNANI, 2008). Em ambiente alcalino, o amônio (NH_4^+) passa para a forma de amônia (NH_3) a qual é volátil e perde-se para a atmosfera (VLECK, 1981; De DATTA et al., 1991; HAYASHI, 2006). Além das perdas por volatilização de amônia, são comuns, nos solos alagados, as perdas por desnitrificação precedida de nitrificação, um fenômeno denominado de nitrificação-desnitrificação. Além das perdas, parte do N aplicado pode ser imobilizada pela flora bacteriana (PONNAMPERUMA, 1972; REDDY, 1982; BURESH, 2008). Entretanto, enquanto as perdas por volatilização de amônia se iniciam assim que inicia a hidrólise da mesma, e por isso são rápidas (FILLERY, et al., 1984; De DATTA et al., 1989; De DATTA et al., 1991), as perdas de N pelo fenômeno nitrificação-desnitrificação e a imobilização do N pela flora bacteriana são mais demoradas (REDDY & PATRICK, 1984; FRENEY, 1990). Diante disso, considerando que as maiores perdas de N do sistema ocorreram até o 7º dia após a aplicação de uréia, presume-se que o maior percentual de perda na fase inicial ocorreu devido à volatilização de amônia. Por outro lado, considerando que a partir do 10º dia não havia mais uréia nem amônio na água de irrigação (Figura 4), e que entre o 10º e 15º dia as perdas de N do sistema praticamente se estabilizaram (Figura 5), a diminuição no conteúdo de N verificada entre o 15º e o 25º dia podem ser atribuídas, principalmente, à nitrificação-desnitrificação e à imobilização.

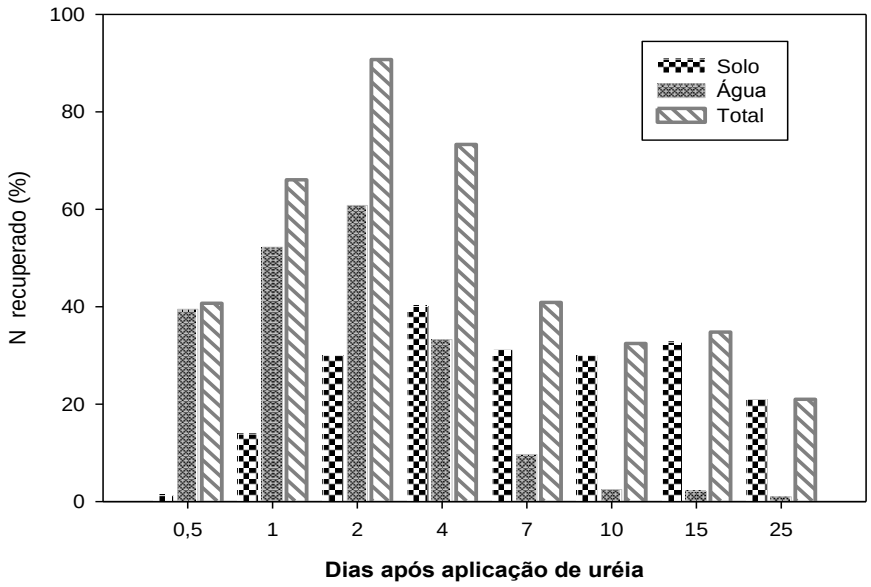

Figura 5. Quantidade total de N nas colunas de PVC ao longo do tempo, decorrente da adição de 154 mg de N, na forma de uréia, sobre a lâmina de água, descontando-se o N do tratamento sem aplicação de uréia (testemunha). Médias de duas repetições. N na forma de amônio mais N na forma de uréia = Água; amônio no solo = Solo; soma do N contido na água mais o N contido no solo = Total

3.5 CONCLUSÕES

1. A uréia aplicada sobre a lâmina de água sofre a hidrólise e forma amônio o qual se difunde para dentro do perfil do solo de forma mais rápida nos primeiros 2,0 cm e mais lenta, nas camadas inferiores;

2. Logo após a aplicação de uréia deve se ter o devido cuidado no manejo da água da lavoura, pois tanto a uréia quanto o amônio podem permanecer dissolvidos na lâmina de água por até uma semana;

4 CAPÍTULO III

DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLO ALAGADO DECORRENTE DA APLICAÇÃO DE URÉIA OU CAMA DE AVES NA PRESENÇA OU NÃO DE PLANTAS DE ARROZ

4.1 RESUMO

A dinâmica do N no solo é complexa devido à multiplicidade de formas químicas aos quais ele está sujeito. No arroz irrigado, a entrada da água na área desencadeia varias reações físicas, químicas e biológicas tornando a complexidade do N ainda maior. O presente trabalho teve por objetivos monitorar a formação de amônio e nitrato no solo alagado e mensurar a recuperação do N pelas plantas de arroz após a aplicação de uréia e de cama de aves, em casa-de-vegetação. Usou-se um Gleissolo Háplico que possuía pH-H_2O = 4,7; matéria orgânica = 20 g kg^{-1} e argila = 290 g kg^{-1}. Os tratamentos consistiram de uma testemunha (sem N), de uréia totalmente incorporada ao solo antes da semeadura do arroz; uréia cuja dose foi dividida em 3 aplicações aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura, e de cama de aves incorporada ao solo 10 dias antes da semeadura. A dose de N de todos os tratamentos foi 200 mg kg^{-1} de solo. As unidades experimentais eram baldes plásticos com 6,0 kg de solo os quais permaneceram alagados durante todo o período experimental. Para cada tratamento, haviam quatro baldes com plantas e quatro sem. As amostragens de solo foram realizadas a cada sete dias, durante 13 semanas, e nelas foi determinado o N mineral. As plantas de arroz foram cultivadas por 95 dias. Os teores de amônio aumentaram após o alagamento do solo em todos os tratamentos. Nos vasos sem plantas, a concentração de N-NH_4^+, na testemunha, atingiu 64 mg kg^{-1} de solo aos 95 dias de alagamento, equivalente a 96 kg ha^{-1} de N. No tratamento com uréia incorporada ao solo a concentração de N-NH_4^+ atingiu 92 % da quantidade de N aplicada no 6º dia diminuindo rapidamente para 39 e 25 % aos 47 e aos 95 dias após a sua aplicação, respectivamente. A uréia parcelada proporcionou aumentos no amônio após cada aplicação, com pequenos decréscimos subsequentes, atingindo 90, 68 e 44 % da quantidade aplicada, aos 30, 50 e 70 dias, respectivamente. No tratamento com cama de aves o N-NH_4^+ atingiu 16 % no 2º dia e aumentou de forma lenta até atingir 29 % aos 95 dias. Nos vasos com plantas, a concentração de amônio no solo decresceu rapidamente, em todos os tratamentos, assim que as plantas começaram a absorver o N disponível sendo que aos 60 dias, os teores passaram a ser insignificantes. O teor de N-NO_3^- no solo, antes do alagamento, era, na média dos tratamentos, 35 mg kg^{-1} e foi totalmente perdido em menos de uma semana após o alagamento. O maior índice de recuperação do N aplicado, pelas plantas de arroz, ocorreu no tratamento com uréia parcelada, seguido pela cama de aves e pela uréia incorporada ao solo, com 62, 22 e 20 %, respectivamente. A uréia e a cama de aves incorporadas antes da semeadura do arroz não suprem adequadamente a demanda de N nos períodos de maior demanda das plantas.

4.2 INTRODUÇÃO

A dinâmica do nitrogênio (N) em sistemas agrícolas é complexa devido à multiplicidade de formas químicas do N e às reações e processos aos quais está sujeito. Isso se reflete diretamente sobre a eficiência de recuperação do N pelas plantas, que raramente excede 50% da quantidade aplicada (SCIVITTARO, et al., 2002; ISHERWOOD, 2003; FAGERIA et al. 2003). A baixa recuperação do N pelas plantas de arroz, no sistema alagado, é devido, basicamente, às perdas do elemento por volatilização de amônia e por nitrificação seguida pela desnitrificação, chamado de fenômeno nitrificação-desnitrificação (PONNAMPERUMA, 1972; REDDY, 1982; REDDY & PATRICK, 1986).

O arroz é uma planta bastante exigente em nutrientes, especialmente em N, K e P, mas o N é o mais importante para o arroz cultivado no sistema irrigado (LOPES, 1995; FAGERIA, et al., 2003; KNOBLAUCH et al., 2007). Além da quantidade, os nutrientes devem estar disponíveis nos momentos de grande demanda das plantas para não limitar a produtividade (SANTOS et al., 2002).

O alagamento do solo aumenta a disponibilidade de vários nutrientes, especialmente de P (SILVA, 2003). Todavia, a entrada da água na área altera o equilíbrio previamente existente entre as formas de cada elemento químico, desencadeando uma série de reações físicas, químicas e biológicas do meio (SOUSA et al., 2004) com reflexos na dinâmica de vários nutrientes, dentre eles do N, que pode perder-se por desnitrificação (PONNAMPERUMA, 1972; WATANABE & MITSUI, 1979; MADRUGA, 1999; GRAUPE, 2005).

Em Santa Catarina, o cultivo do arroz irrigado é realizado no sistema pré-germinado, onde as sementes são semeadas sobre a lâmina de água e a área permanece alagada durante todo o período de cultivo. Como as lavouras de arroz situam-se em vales de rios e em várzeas adjacentes aos mananciais de água, a sociedade tem questionado a possibilidade de o cultivo do arroz poluir esses mananciais. Uma forma de diminuir o problema da poluição das águas constitui na diminuição de uso de agroquímicos, ou seja, na adoção de cultivos mais orgânicos ou agroecológicos. Todavia, na produção orgânica de arroz são feitas restrições ao uso de fertilizantes solúveis e o uso de N passa a ser um problema pois ele é o principal nutriente limitante ao aumento da produtividade (MATTOS, 2004). Considerando que, normalmente, os solos das áreas de cultivo do arroz são de difícil drenagem, o cultivo de

leguminosas, durante a entressafra, que seria uma alternativa interessante para o suprimento de N, torna-se praticamente inviável (MOREL, 1983).

Existem pesquisas recentes avaliando a utilização de microrganismos no auxilio da fixação de N pelas plantas como as cianobactérias e algumas estirpes de *Azobacter* e *Azospirillum* (SCIVITTARO, 2006). Entretanto, esses microrganismos ainda não têm apresentado desempenho suficiente que justifiquem a aplicação em lavouras de arroz irrigado. Nesse contexto, restam os dejetos de animais como alternativa de suprimento de N para cultivos alternativos, destacando-se a cama de aviário, que possui de 2 a 3,2% de N total (ROGERI, 2009). Todavia, em média, apenas 50% desse N é disponibilizado para as culturas de sequeiro durante o primeiro cultivo subsequente à aplicação (CQFS, 2004). Em solos alagados, os dados sobre liberação de N pela cama de aviário são escassos. Além disso, existem fases da cultura em que a taxa de absorção de N é alta e pode definir o rendimento de grãos (SOSBAI, 2010; SANTOS et al., 2002) e a aplicação de cama de aviário, nestas fases, possui implicações de ordem prática e de poluição ambiental.

A uréia aplicada em solo seco, antes da entrada da água (SOSBAI, 2010; CARMONA, 2005) ou incorporada em solo alagado antes do transplante das mudas de arroz (KAPOOR, et al., 2008; SAVANT & DATTA, 1980) tem sido recomendada com frequência. Todavia, normalmente os autores têm usado essa recomendação para cultivares de arroz de ciclo curto, com duração de aproximadamente 110 dias entre a germinação e a colheita. Em Santa Catarina, mais de 95 % da área é cultivada com cultivares de arroz de ciclo longo (superior a 142 dias) (NOLDIN, et al., 2009), utiliza-se, predominantemente, o sistema de cultivo pré-germinado. Nesse caso, o fertilizante nitrogenado incorporado antes da semeadura e as fases de alta demanda de N ocorrendo entre 60 e 110 dias após a semeadura, irá tornar o período entre a incorporação do fertilizante nitrogenado e a absorção de N pelas plantas excessivamente longo.

Assim, um amplo entendimento da dinâmica do N no solo alagado, especialmente a partir da aplicação de cama de aves e da uréia incorporada, é de fundamental importância para a racionalização no uso dos fertilizantes nitrogenados no intuito de alcançar altas produtividades e diminuir um possível impacto ambiental causado pelo N, tanto na água quanto na atmosfera.

A dinâmica do N em solo alagado varia de acordo com a presença ou ausência de plantas de arroz. Todavia, na presença de plantas, fica difícil mensurar tanto a formação quanto o acúmulo de amônio no solo, uma vez que as plantas, a partir da fase de

perfilhamento pleno, passam a consumir praticamente todo o N mineral disponível no solo (SILVA et al., 2007; De DATTA, 1995). Por isso, neste trabalho, optou-se por monitorar a dinâmica do N no solo na presença e na ausência de plantas de arroz.

O presente experimento teve por objetivos monitorar a formação de amônio e nitrato no solo alagado e mensurar a recuperação do N pelas plantas de arroz após a aplicação de uréia e de cama de aves em casa-de-vegetação.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em vasos, em casa-de-vegetação, na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, em 2009. Utilizou-se a camada superficial de 0 a 15 cm de um Gleissolo Háplico, coletado na Estação Experimental Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) de Itajaí, que possuía pH-H_2O = 4,7; pH-SMP = 5,0; matéria orgânica (M.O.) = 20 g kg^{-1} e argila = 290 g kg^{-1}.

O experimento constou dos seguintes tratamentos: testemunha (sem aplicação de N); aplicação de uréia ao solo, cuja dose foi totalmente incorporada por ocasião da formação da lama e alagamento para a semeadura do arroz; aplicação de uréia, cuja dose foi igualitariamente dividida em 3 aplicações, aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz e aplicação de cama de aves, incorporada ao solo 10 dias antes da semeadura do arroz. A cama de aves foi proveniente de uma granja de frangos de corte do município de Luis Alves, SC. A amostra desse resíduo foi moída (sem secagem prévia) e passada em peneira de 5,0 mm. Ela apresentava as seguintes características: massa seca= 85 %, N total= 2,2 %, P_2O_5= 2,7 % e K_2O= 4,2 %. A dose total de N aplicada pela uréia ou pela cama de aves foi de 200 mg kg^{-1} (1.200 mg de N por balde). Antes de ser colocado nos baldes, o solo foi destorroado em fragmentos com diâmetro aproximado de 2,0 cm, simulando um solo após o uso de enxada rotativa. A unidade experimental foi constituída por balde plástico com capacidade para 8,0 L, onde foram colocados 6,0 kg de solo (base seca).

O suprimento de P e K foi realizado com a incorporação de 100 mg de P_2O_5 e 150 mg de K_2O kg^{-1} de solo, durante a formação da lama. Todos os tratamentos foram inundados com uma lâmina de água de 5,0 cm acima da superfície, no dia da incorporação da uréia, momento em que realizou-se a formação de lama e a semeadura do arroz. Os baldes permaneceram alagados até a colheita das plantas, que aconteceu aos 95 dias após a semeadura. Cada

tratamento foi aplicado em oito baldes, sendo que quatro deles foram cultivados com arroz e quatro permaneceram sem plantas. Nos baldes em que foi cultivado arroz foram utilizadas sementes pré-germinadas da cultivar SCS 115 CL, de ciclo médio, pertencente à Epagri. Após o estabelecimento das plântulas, foi realizado um raleio, deixando-se quatro plantas por balde. Neste experimento foi utilizada uma cultivar de ciclo médio em função de a região de Lages possuir pouco tempo de temperatura ideal para o cultivo de arroz.

Amostras de solo foram coletadas a cada sete dias, durante 15 semanas, desde o segundo dia após a semeadura do arroz. Elas foram coletadas com auxílio de uma broca de ferro com 12 cm de comprimento e 1,0 cm de espessura. As amostras de solo não foram secadas. Após a coleta, elas foram homegenizadas manualmente de onde retirou-se uma subamostra com aproximadamente 10 g para a extração do amônio e do nitrato; o restante foi colocado em estufa, a 105^{o}C, para determinação da umidade. A extração do amônio e do nitrato do solo foi realizada com KCl 1,0 mol L^{-1} e a determinação foi realizada em destilador semi-micro Kjeldahl, conforme metodologia de Tedesco et al. (1995).

Aos 95 dias após a semeadura, na fase de formação da panícula, as plantas foram colhidas rente ao solo. Nelas, foi determinada a massa seca das plantas inteiras e o teor de N na fitomassa. Para isso, as amostras das plantas inteiras foram moídas, digeridas com ácido sulfúrico concentrado mais peróxido de hidrogênio, tendo o N total sido determinado em destilador semi-micro Kjeldahl, conforme metodologia Tedesco et al. (1995).

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas entre si pelo teste de Duncan ($p<0,05$).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vasos sem plantas:

Após o alagamento do solo, os teores de amônio no solo aumentaram em todos os tratamentos, inclusive na testemunha (sem N), na qual, aos 95 dias após o alagamento, atingiu 64 mg de N-NH_4^+ kg^{-1} de solo (Figura 1). O aumento verificado na testemunha ocorreu pela liberação do N a partir da decomposição da matéria orgânica (MO) nativa do solo. A decomposição desta MO ocorre em duas etapas; a primeira é chamada de aminização, a qual

transforma o N que está fazendo parte da estrutura do material orgânico em amina (NH_2); a segunda é chamada amonificação, quando a amina reage com os íons H^+ do solo formando o amônio (NH_4^+) (ERNANI, 2003). Nos solos com presença de oxigênio, a maior parte do amônio transforma-se em nitrato, com o decorrer do tempo (ROGERI, 2009); nos solos alagados, o amônio é praticamente estável e se acumula durante a decomposição da MO (PONNAMPERUMA, 1972; SAVANT & De DATTA, 1982; BURESH et al., 2008). O acúmulo de N-NH_4^+ nos baldes, sem aplicação de N, em 95 dias de alagamento, foi de 384 mg vaso^{-1}, considerando-se uma camada de 15 cm de solo, local onde se concentram mais de 90% das raízes do arroz (ESPINAL, 1997) isto representa, aproximadamente, 96 kg de N ha^{-1}.

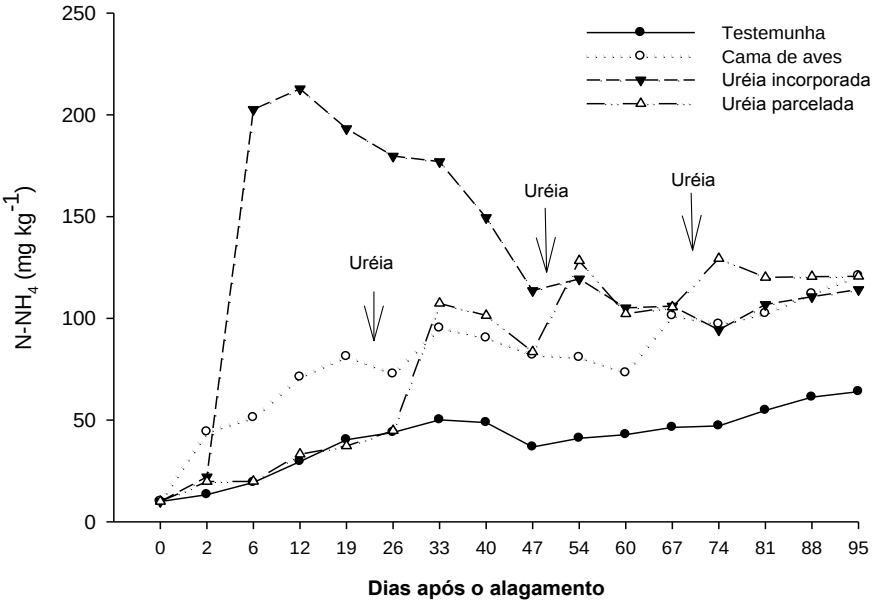

Figura 1. Variação temporal dos teores de amônio no solo, nos baldes sem plantas de arroz, após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Testemunha = sem aplicação de N; cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada, receberam 1.200 mg vaso^{-1} de N.

Dentre os tratamentos que receberam N, nos vasos sem plantas, a incorporação da uréia ao solo alagado foi o que promoveu os maiores teores iniciais de amônio (Figura 2). Nesse tratamento, a maior concentração de amônio (183 mg N kg^{-1}, descontando-se a testemunha), ocorreu no 6º dia após a aplicação do fertilizante. Embora a hidrólise da uréia em solos alagados seja mais lenta do que nos solos de sequeiro (SAVANT et al., 1985; LINDAU, 1989), o processo completou-se em menos de uma semana. Por outro lado, após

atingir o pico, esses teores diminuíram com o passar do tempo, atingindo valores de 77 e 50 mg kg^{-1} aos 47 e aos 95 dias após a aplicação da uréia, respectivamente (Figura 2). A diminuição ocorrida nos teores de amônio foi devida, principalmente, às perdas por desnitrificação precedida de nitrificação (nitrificação-desnitrificação) (PONNAMPERUMA, 1972; REDDY, 1982), já que, quando a uréia é incorporada ao solo alagado, as perdas por volatilização de amônia são muito baixas (VENTURA & YOSHIDA, 1977; REDDY, 1982, MIKKELSEN, 1987). Além disso, se não houver incorporação recente de restos vegetais, a quantidade de N imobilizada nos solos alagados também é pequena (PONNAMPERUMA 1972; SAVANT & De DATTA, 1982; BURESH et al., 2008). Portanto, embora o amônio seja bastante estável em ambientes reduzidos, nos solos alagados, existe uma fina camada superficial oxidada que pode variar de 2,0 a 20,0 mm, seguida por uma camada reduzida logo abaixo desta e por outra camada oxidada na rizosfera do arroz (PATRICK & DELAUNE, 1972; PONAMMPERUMA, 1977; REDDY et al., 1976). O amônio, por difusão, migra das zonas reduzidas e de maior concentração para a zona oxidada do perfil do solo onde sofre a nitrificação. O acúmulo de nitrato, nessa camada, gera um gradiente de concentração inversa, fazendo com que o íon migre para a camada reduzida e sofra a desnitrificação (PATRICK & REDDY, 1978). Reddy (1982) atribui ao fenômeno de nitrificação seguido de desnitrificação perdas de até 50 % do N aplicado em solos alagados. Keeny & Sahvant (1986) verificaram que o N perdido pela nitrificação-desnitrificação não ocorre somente na camada superficial oxidada, mas também no perfil do solo reduzido, uma vez que existe uma pequena difusão de oxigênio para dentro do perfil do solo, suficiente para causar, em menor escala, a nitrificação seguida de desnitrificação. Esses mesmos autores constataram que do total do N perdido por nitrificação-desnitrificação, 84% ocorreu na camada superior oxidada e 16% na camada reduzida.

A cama de aves incorporada ao solo sem plantas de arroz aumentou rapidamente os teores de amônio do solo (Figura 2). Já no 2º dia após a aplicação, a concentração atingiu 31 mg de N kg^{-1} de solo; após isso, aumentou de forma lenta e progressiva até atingir 57 mg kg^{-1} aos 95 dias após o alagamento. O rápido acúmulo inicial de amônio no solo foi devido, principalmente, à liberação do N solúvel em água e ao N amoniacal existentes na cama de aves (ROGERI, 2009). Já o acúmulo lento do amônio no solo foi devido à baixa taxa de decomposição da fração orgânica do resíduo nos solos alagados (PONNAMPERUMA, 1977; SOUSA et al., 2000). A cama de aves liberou, ao longo de 95 dias de alagamento, 29 % da

quantidade de N aplicada, inferior aos 50% considerados para os solos de sequeiro (CQFS, 2004).

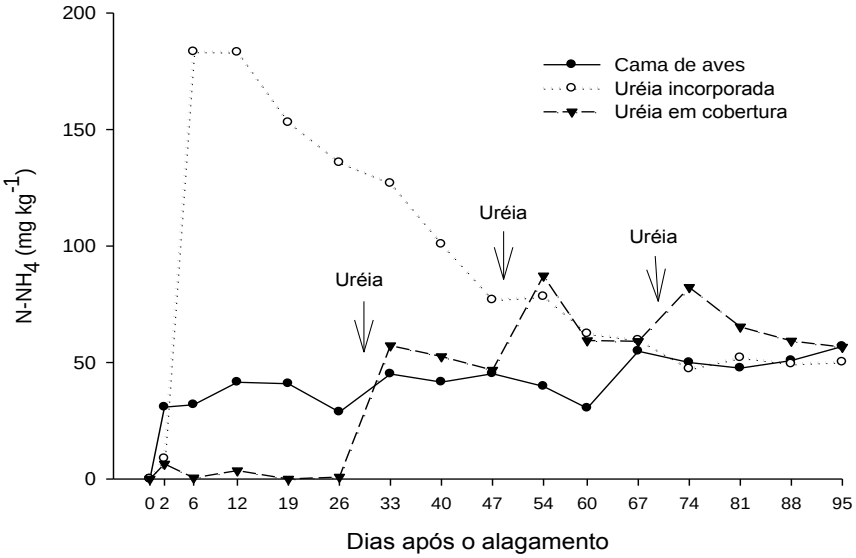

Figura 2. Variação temporal dos teores de amônio no solo, nos baldes sem plantas de arroz, descontando-se o tratamento testemunha (sem N), ao longo do tempo, após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos receberam 1200 mg de N $vaso^{-1}$

Quando a uréia foi aplicada de forma parcelada, os teores de amônio no solo aumentaram após cada aplicação e tiveram um pequeno decréscimo nos dias subsequentes, atingindo concentrações máximas de 55, 90 e 87 mg N kg^{-1} de solo aos 30, 50 e 70 DAS, respectivamente (Figura 2). Os aumentos de amônio ocorreram devido à hidrólise da uréia e os decréscimos foram consequência, principalmente, das perdas por volatilização de amônia (De DATTA, 1991; DUARTE, 2007; WATANABE, 2009), das perdas por nitrificação seguida de desnitrificação (PONNAMPERUMA, 1972; REDDY, 1982; REDDY & PATRICK, 1986) e por imobilização de parte do N mineral pela fauna microbiana (SAVANT & De DATTA, 1982; BUREH, 2008). Por outro lado, se houvesse plantas de arroz absorvendo o N disponível no solo, principalmente na fase de perfilhamento e na fase reprodutiva do arroz, onde a demanda de N é grande (De DATTA, 1995; FAGÉRIA et al.,

2003; SILVA et al., 2007), parte da perda de N verificada nos tratamentos com uréia incorporada ao solo e, principalmente, com uréia parcelada, não teria ocorrido.

Vasos com plantas:

Na presença de plantas, o comportamento dos tratamentos com relação à formação de amônio foi idêntico ao ocorrido naqueles sem plantas até aproximadamente 33 dias após a instalação do experimento (Figuras 1 e 3). A partir desse tempo, começou haver absorção de N pelas plantas de arroz e os teores de amônio no solo diminuíram rapidamente, atingindo valores muito baixos aos 47 dias e praticamente inexistindo a partir dos 60 dias após o alagamento do solo e semeadura do arroz (Figura 3). Isto demonstra que a incorporação de fertilizantes nitrogenados antes da semeadura do arroz diminui a capacidade desses fertilizantes de suprir o N para as plantas a partir dos 50 dias após a semeadura, daí a necessidade do uso da uréia em cobertura. Fenômeno idêntico ao ocorrido no presente experimento foi verificado, em experimento de campo, por Dickmann et al. (1993) e por De Datta (1995).

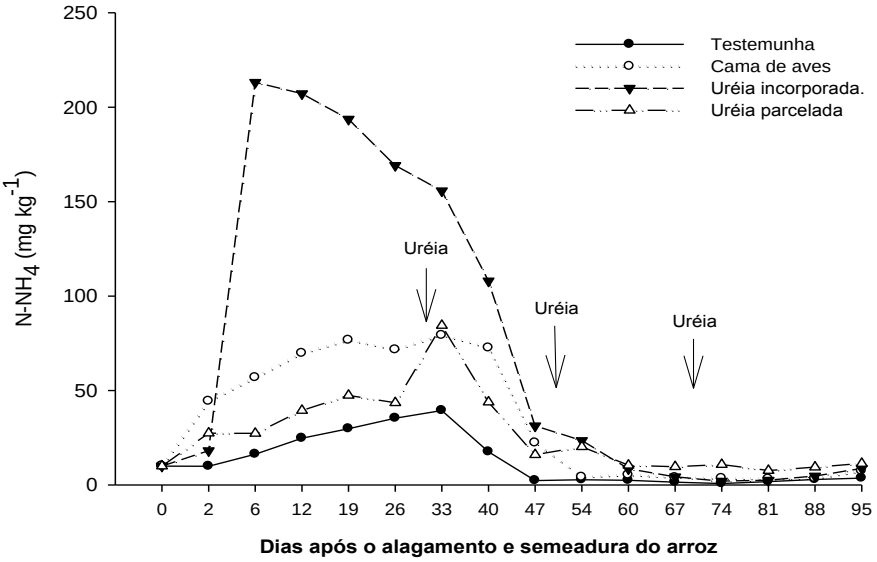

Figura 3. Variação temporal dos teores de amônio no solo, nos baldes com plantas de arroz, ao longo do tempo, após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Testemunha = sem aplicação de N; cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada receberam 1.200 mg de N $vaso^{-1}$.

Considerando que não houve diferença entre os vasos com e sem plantas com relação aos teores de nitrato no solo, nem antes nem depois do alagamento, optou-se por apresentar apenas uma figura com as médias gerais. Os teores de nitrato no solo, antes da aplicação da cama de aves, realizada dez dias antes do alagamento, eram de 30 mg de N kg^{-1} de solo (Figura 4). Na amostragem de solo realizada imediatamente antes do alagamento, a concentração de nitrato havia aumentado para 41 mg de N kg^{-1} de solo, na média dos tratamentos que não receberam adubação nitrogenada e permanecido estável no tratamento com cama de aves (Figura 4). O aumento no nitrato verificado nos tratamentos que não receberam cama de aves ocorreu em função da melhoria nas condições físicas e na umidade do solo, uma vez que durante o enchimento dos vasos com solo, este foi umedecido e destorroado. Portanto, o maior teor de água e a desagregação do solo favoreceram a atividade microbiana e a formação de nitrato.

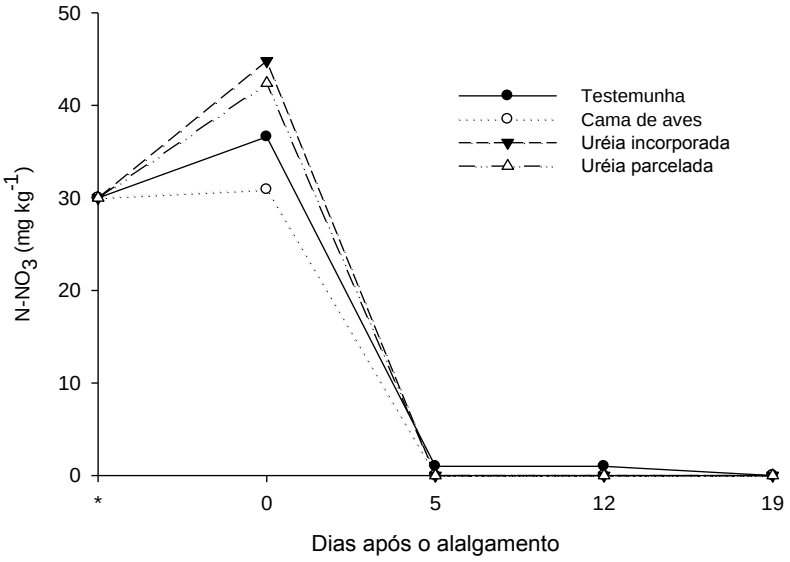

Figura 4. Variação temporal dos teores de nitrato no solo, nos baldes com e sem plantas de arroz após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Testemunha = sem aplicação de N; cama de aves = a quantidade total foi incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorporada = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parcelada = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada receberam 1.200 mg de N $vaso^{-1}$.

Nos vasos onde foi incorporada cama de aves, o nitrato formado deve ter sido imobilizado pela flora bacteriana a qual teve seu crescimento intensificado pela presença da MO adicionada (SAVANT & De DATTA, 1982; BUREH, 2008). Entretanto, após o alagamento do solo, houve uma diminuição rápida da concentração de nitrato em todos os

tratamentos atingindo valores próximos a zero no quinto dia após o alagamento (Figura 4). Isto demonstra que o nitrato é instável em solo alagado e é perdido por desnitrificação nos dias iniciais subseqüentes ao alagamento (PONNAMPERUMA, 1972; WATANABE & MITSUI, 1979; MADRUGA, 1999; GRAUPE, 2005). Esses mesmos autores afirmam que o nitrato é o primeiro composto a ser utilizado pelas bactérias anaeróbicas como receptor de elétrons, sofrendo a desnitrificação e a perda para a atmosfera nas formas de N_2 e N_2O, principalmente. Madruga (1999) avaliou o efeito da aplicação de resíduo vegetal na dinâmica do nitrato em solo alagado e observou que praticamente todo o nitrato existente no solo foi perdido em menos de nove dias após o alagamento. Observou também que, do total perdido, 11 a 25% ocorreu nas primeiras quatro horas após o alagamento, dependendo da facilidade de decomposição do material aplicado e, por consequência, da maior ou menor oferta de elétrons para o meio.

A uréia parcelada foi o tratamento onde ocorreu a maior eficiência de recuperação do N aplicado. Foram aplicados 1.200 mg de N em cada vaso, na forma de uréia ou cama de aviário. As plantas do tratamento testemunha (sem N) acumularam 436 mg de N (Figura 6). As plantas adubadas com cama de aves, uréia incorporada ao solo e uréia parcelada acumularam 700, 680 e 1190 mg de N por balde, respectivamente (Figura 6). Descontando-se a quantidade de N absorvida pelas plantas no tratamento testemunha, os percentuais de recuperação de N aplicado nestes tratamentos foram de 22, 20 e 62%, respectivamente (Figura 6). É importante ressaltar que nos cálculos de recuperação do N aplicado não está computado o conteúdo de N nas raízes, os quais podem variar de 2% (SCIVITTARO, et al., 2005) até 5% (SHNIER, 1990) do conteúdo total de N na planta. Além disso, as plantas foram colhidas no estádio de pré-floração as quais poderiam acumular mais 5 a 10% de N se elas fossem colhidas no final da floração (FAGÉRIA et al., 2003). Desta forma, os índices de recuperação de N pelas plantas poderiam ter sido aproximadamente 10 pontos percentuais superiores aos apresentados anteriormente.

No tratamento testemunha, a liberação de amônio no solo verificado ao final dos 95 dias de alagamento foi de 64 mg kg^{-1} de $N\text{-}NH_4^+$ de solo (Figura 1), totalizando, portanto, 384 mg $vaso^{-1}$. Entretanto, essas plantas acumularam 436 mg de N $vaso^{-1}$ (Figura 6), ou seja, 13% a mais do que o estimado. Essa diferença pode ter sido devido a perdas de N ao longo do tempo de alagamento, mesmo sem a adição do elemento no solo ou a presença de plantas de arroz podem ter incrementado a decomposição da MO do solo pela oxidação da rizosfera e liberado maior quantidade de N nos vasos com plantas, ou ainda, a ocorrência simultânea

desses dois fenômenos. A participação do N proveniente da MO original do solo é, normalmente, significativa no fornecimento de N para as plantas de arroz (De DATTA, 1995). No presente experimento, da quantidade total de N acumulada pelas plantas, 62, 64 e 36 % nos tratamentos com uréia incorporada ao solo, cama de aves e uréia parcelada, respectivamente, eram originários da MO nativa do solo. Russel et al. (2006) e De Datta (1995) citam que 50 a 70% do N utilizado pelas plantas de arroz irrigado são provenientes da MO nativa do solo.

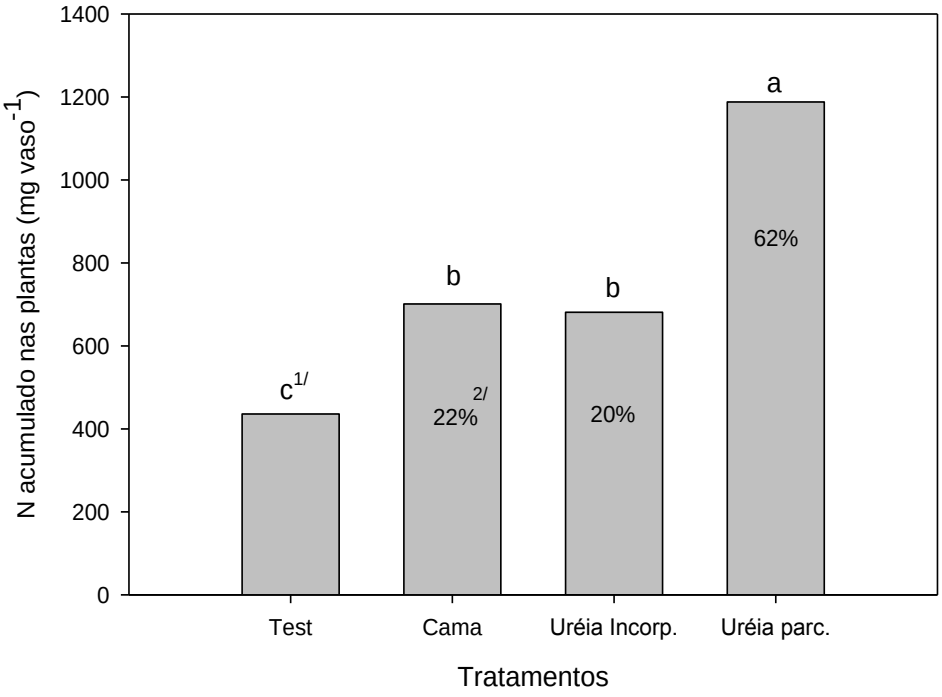

Figura 5. Quantidade de nitrogênio acumulada pelas plantas de arroz irrigado, cultivar SCS 115 CL, colhidas por ocasião da formação da panícula, cultivadas em vasos, em casa-de-vegetação após a aplicação de 200 mg de N kg^{-1} de solo na forma de uréia ou de cama de aves. Médias de 4 repetições. Test = testemunha sem aplicação de N; cama = cama de aves totalmente incorporada ao solo dez dias antes do alagamento e semeadura do arroz; uréia incorp. = dose total incorporada ao solo alagado imediatamente antes da semeadura do arroz; uréia parc. = a dose total foi subdividida em três épocas (aos 30, 50 e 70 dias após a semeadura do arroz). Todos os vasos, com adubação nitrogenada, receberam 1.200 mg de N $vaso^{-1}$
1/ Barras com a mesma letra não diferiram entre si pelo teste de Duncan ($p<0,05$)
2/ Percentual de recuperação de N.

Trabalhos referentes ao uso de cama de aves em arroz irrigado, cultivado no sistema pré-germinado, são escassos. As pesquisas com a utilização de cama de aves em arroz semeado em solo seco com alagamento aos 30 dias após a semeadura do arroz têm revelado baixos índices de recuperação de N. No presente experimento recuperaram-se 22% da quantidade de N aplicada pela cama de aves (Figura 5). Slaton et al. (2003), em trabalhos realizados no estado do Arkansas, EUA, obtiveram recuperação de 5 a 25% da quantidade de

N incorporada pela cama de aves em solo seco imediatamente antes da semeadura do arroz e alagado aos 30 dias após. Verificaram também que a recuperação do N foi tanto menor quanto maior a dose de cama de aves aplicada. Já Golden et al. (2006), comparando cama de aviário peletizada com cama fresca, na cultura do arroz irrigado, obtiveram, na média, 14% de recuperação do N. Cabe salientar que no sistema de semeadura do arroz em solo seco com posterior irrigação, a cama de aves é incorporada, em média, 30 a 40 dias antes do alagamento do solo. Durante esse período, o N amoniacal formado pela decomposição da cama de aves, na presença de oxigênio, passa para a forma nítrica (ERNANI, 2008; ROGERI, 2009) o qual é rapidamente perdido por desnitrificação assim que o solo é alagado (PONNAMPERUMA, 1972; REDDY & PATRICK, 1986; MADRUGA, 1999). Por outro lado, nos solos alagados, a decomposição da matéria orgânica ocorre de forma mais lenta do que em solos oxigenados, já que naqueles o material é atacado por um grupo menor e menos eficiente de bactérias (; PONNAMPERUMA, 1972; SOUSA, 2000). Nesse caso, a incorporação da cama de aves, em solo seco, com uma certa antecedência ao alagamento poderia acelerar a decomposição inicial da MO e liberar um pouco mais de N durante o alagamento. Portanto, a definição de uma época adequada para a incorporação da cama de aves no solo visando aumentar o aproveitamento do N pelo arroz cultivado no sistema pré-germinado, carece de pesquisas.

No tratamento com a uréia incorporada ao solo imediatamente antes da semeadura a recuperação de N foi de apenas 20% do N aplicado (Figura 5). Embora tenha sido verificada alta concentração de amônio no solo até 40 dias após a semeadura do arroz (Figura 2), nesse período, as plantas de arroz normalmente não possuem grande capacidade de absorção de N (LOPES, 1995) e o elemento pode ser perdido na forma de amônia (De DATTA et al., 1991; DUARTE et al., 2007; WATANABE et al., 2009), pode ser imobilizado pela flora microbiana do solo (SAVANT & De DATTA, 1982; BUREH, 2008) ou, mais provavelmente, ser perdido através da nitirificação-desnitrificação (PONNAMPERUMA, 1972; WATANABE & MITSUI, 1979; MADRUGA, 1999; GRAUPE, 2005).

A uréia aplicada parcelada, em três coberturas, proporcionou o maior índice de recuperação de N entre os tratamentos testados, atingindo 62% do N aplicado (Figura 6). A aplicação de uréia em cobertura sobre a lâmina de água pode provocar altas perdas de N (FILLERY et al., 1984; De DATTA, et al., 1991; DUARTE et al., 2007). Entretanto, o fornecimento de N nas fases de alta demanda de N pelas plantas, ou seja, nos estádios de início de perfilhamento (V4), perfilhamento pleno (V6) e na diferenciação do primórdio floral (RO), aumenta o aproveitamento do N pelas plantas (SOSBAI, 2010). Knoblauch et al.

(2007), testando diferentes formas e épocas de aplicação de uréia no arroz irrigado, em sistema pré-germinado, concluíram que, para as cultivares de arroz de ciclo longo (mais de 142 dias de ciclo biológico), a melhor forma de aplicação do fertilizante foi em três coberturas, em doses igualitárias. O número de panículas por unidade de área e o número de grãos cheios por panícula são os dois componentes do rendimento mais importantes na produtividade grãos de arroz (FAGERIA et al., 2003; SILVA et al., 2007; KNOBLAUCH & STUKER, 2007;). A definição do número de panículas e do número de grãos cheios por panícula ocorrem, normalmente, na fase de perfilhamento das plantas (V4 a V8) e na fase reprodutiva (RO a R4), respectivamente. Nas cultivares de ciclo longo, essas fases ocorrem, normalmente, entre os 30 e 85 e entre os 85 e 115 DAS. Portanto, a disponibilidade de N nessas duas fases da cultura são imprescindíveis para se auferir altos rendimentos de grãos. Além disso, o fornecimento de N nos momentos críticos de elevada demanda de N pelas plantas de arroz é mais importante do que disponibilizar níveis razoáveis do elemento durante todo o período de crescimento (CHANG, 1978).

4.5 CONCLUSÕES

1. O nitrato existente no solo antes do alagamento não é aproveitado pelas plantas uma vez que este é rapidamente perdido por desnitrificação;

2. A uréia e a cama de aves incorporadas ao solo, antes da semeadura do arroz, não são eficientes no suprimento de N nas fases de maior demanda das plantas de cultivares de arroz de ciclo longo enquanto a uréia aplicada, de forma parcelada, disponibiliza o elemento nas fases mais críticas da cultura.

5 CAPÍTULO IV

VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA EM SOLO ALAGADO INFLUENCIADA PELA FORMA DE APLICAÇÃO DA URÉIA

5.1 RESUMO

A volatilização de amônia (NH_3) e a nitrificação seguida pela desnitrificação são as principais formas de perdas de N nos solos alagados e, por consequência, responsáveis pelas baixas taxas de recuperação do N pelas plantas de arroz. O objetivo do presente trabalho foi quantificar a volatilização de amônia em solos alagados influenciada pela forma de aplicação de uréia, em casa-de-vegetação. Foram conduzidos dois experimentos: um no estado do Mississippi - EUA e outro em Santa Catarina, utilizando-se um Vertissolo nos EUA e um Gleissolo em SC. A captação de amônia foi realizada por esponjas colocadas dentro de tubos de PVC com 15 cm de diâmetro por 60 cm de altura encravados dentro de baldes com 15 cm de espessura de solo, sem a presença de plantas. Aplicou-se uréia na dose de 353 mg N $vaso^{-1}$, equivalente a 200 kg de N ha^{-1}, nas seguintes formas: uréia aplicada sobre a superfície do solo úmido (80% da capacidade de campo, sem alagamento); uréia solubilizada em água, ou em grânulos, aplicada sobre a lâmina de água de alagamento; uréia incorporada ao solo alagado e uréia em solo seco e alagado 48 horas depois, além de uma testemunha (sem N). As esponjas captadoras de amônia foram trocadas aos 1, 3, 6, 9, 13, 17 e 22 dias. Na água de alagamento determinou-se o pH e a concentração de amônio dissolvido. A emissão de amônia variou com a forma de aplicação da uréia, com comportamento similar nos dois solos. As perdas de N na testemunha foram insignificantes. As menores perdas ocorreram quando a uréia foi incorporada ao solo alagado seguido pela uréia aplicada em solo seco com posterior alagamento e atingiram 4 e 14 % no Vertissolo e 6 e 10 % no Gleissolo. As maiores perdas foram com uréia aplicada na lâmina de água (nas duas formas), seguida pela uréia aplicada em solo úmido (sem alagamento) e atingiram 32 e 26 % no Vertissolo e 38 e 22 % no Gleissolo. Os maiores valores de pH da água foram com uréia sobre a lâmina de água atingindo pH 9,0 no 9º dia no Vertissolo e 8,4 no 3º dia no Gleissolo. As menores perdas de amônia ocorrem quando a uréia é incorporada no solo alagado, depois quando ela é aplicada em solo seco com posterior alagamento e as maiores perdas são da uréia aplicada sobre a lâmina de água.

5.2 INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é o nutriente requerido em maior quantidade pelo arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) (FAGERIA, et al., 2003; MATTOS, 2004). Todavia, a dinâmica desse elemento no solo é bastante complexa, devido à multiplicidade de formas químicas e às reações e processos aos quais ele está sujeito (SCIVITTARO, 2006). Nos solos alagados, essas transformações são ainda mais complexas, em função da existência de uma lâmina de água sobre o solo, de uma fina camada oxidada na interface solo-água, seguida por uma camada reduzida abaixo desta, e de outra camada oxidada em torno das raízes do arroz (PONNANMPERUMA, 1972; REDDY et al., 1984). Isso se reflete diretamente sobre a eficiência de recuperação do N pelas plantas de arroz que raramente excede a 50% da quantidade aplicada (SCIVITTARO et al., 2002; ISHERWOOD, 2003; FAGERIA et al., 2003).

Em função do menor custo por unidade de N, da alta concentração do elemento e da compatibilidade com um grande número de fertilizantes e defensivos, a uréia é o fertilizante nitrogenado mais utilizado na agricultura brasileira (CANTARELA, 2007). Apesar dos vários aspectos favoráveis, a uréia apresenta como característica indesejável uma reação inicial alcalina [$CO(NH_2)_2 + 2H_2O$ ----> $(NH_4)_2CO_3$ ---> $2NH_4 + 2OH^- + CO_2$ ---> $NH_4^+ + OH^-$ (aquoso) ---> $H_2O + NH_3$ (gás)], tornando-a suscetível a perdas de N por volatilização de amônia. Vários fatores influenciam na intensidade dessas perdas em solos alagados, destacando-se os parâmetros relativos à água de inundação como pH, concentração de NH_4^+, pressão de CO_2, temperatura, profundidade da lâmina e atividade das algas; parâmetros de solo como pH, pressão de CO_2, capacidade de troca de cátions e atividade microbiana, e das condições atmosféricas como velocidade do vento, temperatura do ar e radiação solar. Além desses, outros fatores como manejo da água, forma e tipo do fertilizante aplicado, e estádio da cultura, afetam a taxa de perdas de N (VLECK & CRASWELL, 1981; LINDAU et al., 1989; WATANABE, 2009).

Buresh et al. (2008) afirmam que as maiores perdas de N em solos alagados, cultivados com arroz irrigado, ocorrem pela volatilização da amônia. Estudos realizados por Vleck & Craswel (1981), em lâmina de água com diversos níveis de pH, verificaram que 50% do N amoniacal encontrava-se na forma de amônia em pH 9,2. Hayashi (2006) relata citações de perdas por volatilização de amônia em arroz irrigado entre 7 e 47% na China e entre 9 e 39% nas Filipinas. Scivittaro et al. (2005), em trabalhos realizados no Rio Grande do Sul,

verificaram perdas de amônia de 15% quando a uréia foi aplicada em solo saturado e de 22% quando foi aplicada em solo seco. Já Duarte et al. (2007) verificaram perdas de amônia de aproximadamente 15% da quantidade de N aplicada, não havendo diferenças entre aplicações da uréia em solo úmido, solo saturado ou na presença de lâmina de água, em trabalho realizado com um Planossolo hidromórfico, em casa-de-vegetação.

Até 2004, a recomendação de aplicação de N em cobertura para o arroz cultivado no sistema de semeadura em solo seco com posterior irrigação indicava aplicar a uréia após o alagamento da lavoura. No sistema pré-germinado, a recomendação era para que todas as coberturas com uréia fossem realizadas sobre a lâmina de água (CQFS, 1994; IRGA, 2001). A nova recomendação de adubação nitrogenada para o arroz irrigado (CQFS, 2004; SOSBAI, 2010) sugere, para o sistema de semeadura em solo seco com posterior irrigação, a aplicação da uréia antes do alagamento. Nesse caso, condiciona-se o máximo de três dias entre a aplicação de uréia e a entrada de água na lavoura, para evitar possíveis perdas de N. Todavia, para o sistema pré-germinado, a recomendação continua indicando a aplicação da uréia sobre a lâmina de água, já que o solo é alagado antes da semeadura do arroz.

Esses fatores de manejo da água e da forma de aplicação da uréia podem representar diferentes possibilidades de perdas de N, com consequências na eficiência de aproveitamento do fertilizante e na produtividade do arroz. No Brasil, pouco se conhece sobre perdas de N por volatilização de amônia em solos alagados e inexistem estudos a campo sobre esse tipo de perda no arroz cultivado em sistema pré-germinado.

O objetivo do presente trabalho foi quantificar a volatilização de amônia em solos alagados influenciada pela forma de aplicação de uréia, em casa-de-vegetação.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos, um na Delta Research and Extension Center da Mississippi State University, nos Estados Unidos, e outro na Estação Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), em Itajaí, SC. No experimento conduzido nos Estados Unidos, utilizou-se a camada superficial de 0 a 15 cm de um solo de lavoura de arroz classificado como Charkey Clay Soil – ***Thermic Vertic Haplaquepts*** (Vertissolo); no experimento conduzido na Epagri, utilizou-se a camada superficial de 0 a 15 cm de um solo de arrozeira classificado como Gleissolo Háplico

Distrófico – ***Entisoil Aeric***. Algumas propriedades dos solos encontram-se na Tabela 1. Os solos foram secos ao ar, passados em peneira com malha de 0,5 cm e colocados em baldes plásticos perfazendo uma camada com espessura de 15 cm. Para coletar a amônia volatilizada, foram usados tubos com 15 cm de diâmetro e 60 cm de altura, sendo de acrílico transparente no experimento realizado nos Estados Unidos, e de PVC no experimento realizado na Epagri. Os tubos foram introduzidos verticalmente no solo, dentro dos baldes, até atingir o fundo dos mesmos formando uma espécie de câmara.

Tabela 1. Características da camada (0 – 15 cm) dos solos utilizados nos experimentos

Solo	pH-H_2O	MO[1/]	$CTC_{pH7,0}$[2/]	Argila
		g dm^{-3}	$cmol_c$ dm^{-3}	g dm^{-3}
Vertissolo	7,5	20	32,0	630
Gleissolo	4,4	28	7,2	290

[1/] *Matéria orgânica*
[2/] *Capacidade de troca de cátions determinada com solução tamponada a pH 7,0*

Os tratamentos foram aplicados somente no solo que ficou do lado de dentro dos tubos. Foi utilizada uréia, em dose equivalente a 200 kg de N ha^{-1} (353 mg N $vaso^{-1}$), nas seguintes formas: N aplicado sobre a superfície do solo úmido (80% da capacidade de campo), o qual não recebeu alagamento durante todo o período de avaliação; N solubilizado previamente em água destilada e posteriormente aplicado sobre a lâmina de água de alagamento; N aplicado em grânulos sobre a lâmina de água; N incorporado ao solo alagado e N aplicado em solo úmido (80% da capacidade de campo), o qual foi alagado 48 horas após a aplicação. Nos tratamentos em que o solo foi alagado, a lâmina de água foi mantida numa espessura de 7,0 cm, durante todo o período do experimento. Também foi utilizado um tratamento testemunha (sem N).

Para avaliar a volatilização de amônia, foram colocados dois discos de espuma (esponja) comercial, com 2,5 cm de espessura e densidade 24 kg m^{-3}. Um deles foi colocado dentro do tubo, a uma altura de 15 cm em relação à lâmina de água, e outro foi colocado no topo do tubo, para evitar a contaminação por amônia proveniente da atmosfera. Antes de serem utilizadas, as esponjas foram lavadas com água de torneira e em seguida com ácido fosfórico 0,73 mol L^{-1}, sequencialmente foram enxaguadas com água deionizada e secadas ao ar. Após isso, as espumas receberam 20 mL de ácido fosfórico 0,73 mol L^{-1} contendo 30% de glicerina. As esponjas da parte inferior do tubo foram trocadas aos 1, 3, 6, 9, 13, 17 e 22 dias após a aplicação da uréia, enquanto as esponjas da parte superior permaneceram as mesmas

durante todo o período do experimento. Após serem retiradas dos tubos, as esponjas foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e guardadas em geladeira até o momento das análises. Para a extração do fosfato de amônio formado, cada esponja foi saturada com 100 mL de KCl 1,0 mol L^{-1} e após 12 horas em repouso foram exprimidas manualmente para a retirada da solução. As determinações de amônio foram realizadas em aparelho 'Flow Solution III', na Mississippi State University, e em destilador semi-micro Kjeldahl, conforme Tedesco et al. (1995), na Universidade Estadual de Santa Catarina, em Lages, SC. Além das perdas de amônia, determinou-se também, no mesmo dia de cada troca das esponjas, o pH e a concentração de amônio na água que estava acima da superfície do solo. Foi utilizado delineamento experimental completamente casualizado, com três repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas entre si pelo teste de Duncan ($p<0,05$).

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A emissão de amônia variou com a forma de aplicação da uréia havendo um comportamento similar nos dois solos (Figura 1). As perdas de N no tratamento testemunha (sem N) foram insignificantes, atingindo, após 22 dias de avaliação, 2,6 e 3,8 kg ha^{-1} no Vertissolo e no Gleissolo, respectivamente (Figura 1). A maior quantidade de N perdida pelo Gleissolo ocorreu, provavelmente, devido ao seu maior teor de matéria orgânica e sua menor CTC relativamente ao Vertissolo. Altos teores de matéria orgânica liberam maiores quantidades de N durante a sua decomposição. Parte do N liberado transforma-se em amônia e se perde para a atmosfera (GRIGS, et al., 2007; SANGOI et al., 2003). Além disso, solos com baixa CTC tendem a reter menos NH_4^+ pela menor quantidade de cargas negativas (CANTARELA, 2007) facilitando as suas perdas.

As maiores volatilizações de amônia ocorreram quando a uréia foi aplicada sobre a lâmina de água, tanto na forma de solução quanto em grânulos, seguida pelas aplicações em solo úmido sem alagamento, depois, pela uréia aplicada em solo úmido com alagamento 48 horas após, e, por último, pela uréia incorporada no solo alagado (Figura 1). Dos 353 mg de N aplicados sobre a lâmina de água na forma de solução, 122 e 137 mg $vaso^{-1}$ foram perdidos, correspondendo a 35 e 39 % da quantidade de N aplicada no Vertissolo e no Gleissolo, respectivamente (Tabela 2). Valores similares foram encontrados quando a uréia foi aplicada

na forma de grânulos, onde as perdas foram de 104 e 132 g vaso^{-1}, correspondendo 30 e 38% da quantidade de N aplicada no Vertissolo e no Gleissolo, respectivamente (Tabela 2).

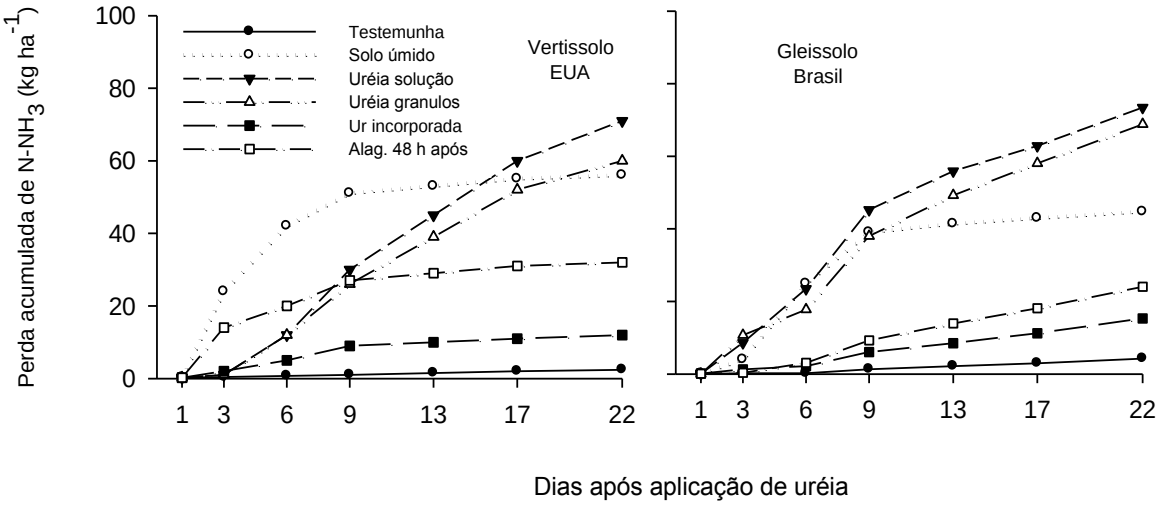

Figura 1. Perda acumulada de amônia em função da forma de aplicação de uréia no solo. Testemunha (sem N); solo úmido = uréia aplicada sobre a superfície do solo úmido, sem alagamento durante todo o período de avaliação; uréia solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre a lâmina de água; uréia grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; ur incorporada = uréia incorporada no solo previamente alagado; 48 h após = uréia aplicada na superfície solo úmido o qual foi alagado 48 h após a aplicação da mesma.
Todos os tratamentos receberam 353 mg de N por vaso, na forma de uréia, equivalente a 200 kg de N ha^{-1}.

As altas perdas de N verificadas nos tratamentos em que a uréia foi aplicada sobre a lâmina de água, em ambos os solos, demonstram que e a presença da água não inibiu a emissão da amônia para a atmosfera, apenas retardou no Vertissolo. Todavia, considerando que nesse experimento foi utilizada uma dose equivalente a 200 kg ha^{-1} de N, os percentuais de perdas acumuladas encontrados são inferiores aos encontrados por Fillery et al. (1986), que verificaram perdas equivalentes a 11, 27 e 47% pelo uso de uréia em cobertura, sobre lâmina de água, nas doses de 40, 60 e 80 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Por outro lado, foram superiores aos 15% verificados por Duarte, et al. (2007), que utilizaram uma dose equivalente a 100 kg de N ha^{-1} em um Planossolo Hidromórfico do Rio Grande do Sul.

Devido à diversidade nas épocas e nas condições em que os experimentos foram conduzidos, não foram realizadas comparações estatísticas entre os dois solos estudados. Entretanto, é nítido o diferencial na dinâmica de emissão de amônia, em alguns tratamentos, entre os solos. No Vertissolo, quando a uréia foi aplicada sobre a lâmina de água a emissão de amônia iniciou no 3^{o} dia e estendeu-se até o final do período de avaliação, enquanto no

Gleissolo a emissão de amônia iniciou no primeiro dia após a aplicação da uréia e diminuiu de intensidade a partir do 13º dia (Figura 1). Embora os dois solos estivessem alagados, no Vertissolo a lâmina de água provocou atraso na hidrólise da uréia, o que não ocorreu no Gleissolo. Esse fato pode ser atribuído à alta concentração de amônio na água do Gleissolo um dia após a adição da uréia (Figura 2). A rápida hidrólise da uréia no Gleissolo pode ter ocorrido em função do seu maior teor de MO, uma vez que altos conteúdos de matéria orgânica aumentam a população microbiana e esta, por sua vez, intensifica a atividade da urease que catalisa a hidrólise da uréia (SONGOI, et al., 2003).

Tabela 2. Perdas acumuladas de amônia, após 22 dias de aplicação dos tratamentos, em função da forma de aplicação de uréia.

Tratamento	Perda de $N\text{-}NH_3$			
	Vertissolo (EUA)		Gleissolo (Brasil)	
	mg $vaso^{-1}$	%	mg $vaso^{-1}$	%
Uréia em solo úmido	100 b	26 *b*	78 b	22 *b*
Uréia em solução	122 a	34 a	137 a	38 a
Uréia em grânulos	104 b	29 b	132 a	37 a
Uréia incorporada	14 d	4 d	21 d	6 d
Alagamento 48 h após	52 c	14 c	35 c	10 c
CV (%)	10,0	10,0	5,2	5,2

1/ Médias seguidas da mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan (P<0,05).

Tratamentos: testemunha (sem N); uréia em solo úmido = uréia aplicada na superfície de solo úmido (80% da capacidade de campo) sem alagamento durante todo o período de avaliação; uréia em solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre lâmina de água; uréia em grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; uréia incorporada = uréia incorporada ao solo alagado; alagamento 48 h após = uréia aplicada em solo úmido sendo alagado 48 h após a aplicação da mesma. Médias de três repetições.
Todos os tratamentos receberam 353 mg de N por vaso, equivalente a 200 kg de N ha^{-1}.

Quando a uréia foi aplicada em solo úmido, o qual permaneceu arejado durante todo o período de avaliação, foram perdidos 101 e 78 mg $vaso^{-1}$ de N, correspondendo a 26 e 22% da quantidade aplicada no Vertissolo e no Gleissolo, respectivamente (Tabela 2). Nesse tratamento, a intensidade das emissões de amônia foi diferente entre os dois solos. No Vertissolo, as emissões de amônia iniciaram a partir do 1º dia de aplicação de uréia e atingiu uma perda equivalente a 52 kg de N ha^{-1}, enquanto no Gleissolo as perdas iniciaram no 3º dia e atingiram 44 kg de N ha^{-1} (Figura 1). A antecipação da emissão de amônia no Vertissolo é atribuída ao elevado pH inicial desse solo (Tabela 1). Em ambos os solos, as emissões de amônia ocorridas no tratamento em que os solos não foram alagados, cessaram aos nove dias após a aplicação da uréia (Figura 1). Isto ocorreu porque para manter a umidade dos solos em

80% da capacidade de campo, aos nove dias após a aplicação de uréia, foi adicionado água. A aplicação de água nos solos favoreceu o deslocamento descendente da uréia e do amônio que estavam na superfície, evitando, dessa forma, a volatilização da amônia (SANGOI et al., 2003, SAVANT et al., 1987).

No tratamento em que os solos foram alagados 48 horas após a aplicação da uréia, foram perdidos 52 e 35 mg $vaso^{-1}$ de N, equivalentes a 14 e 10 % no Vertissolo e no Gleissolo, respectivamente (Tabela 2). As menores perdas de amônia nesse tratamento, quando comparadas às perdas dos tratamentos com uréia aplicada sobre a lâmina de água e uréia aplicada em solo úmido sem alagamento, demonstram que a aplicação de uréia no solo seco com posterior alagamento é uma prática eficiente no aproveitamento do N da uréia pelo arroz irrigado. Em trabalho realizado a campo com um Planossolo Hidromórfico, no município de Capão do Leão RS, Scivittaro et al. (2005) verificaram perdas de amônia da ordem de 20% quando a uréia foi aplicada em solo seco e alagamento aos 10 dias após. Verificaram também, que após a entrada da água, a emissão de amônia praticamente cessou. A emissão de amônia no tratamento que foi alagado 48 h após a aplicação de uréia foi intensa a partir do 1º dia no Vertissolo e iniciou de forma mais moderada, a partir do 3º dia, no Gleissolo, atingindo uma perda acumulada de 29,6 e 20,0 kg de N ha^{-1} no Vertissolo e no Gleissolo, respectivamente (Figura 1). A diferença na intensidade de emissão de amônia nos primeiros dias após a aplicação de uréia é atribuída ao pH inicial de cada solo, visto que o Vertissolo possui pH alcalino enquanto o Gleissolo possui pH ácido (Tabela 1). Verifica-se, todavia, que enquanto no Vertissolo a emissão de amônia diminuiu de intensidade a partir do 9º dia, no Gleissolo ela se manteve de forma praticamente constante durante todo o período de avaliação. O decréscimo na intensidade da emissão de amônia no Vertissolo, ao longo do tempo, é atribuído à sua alta CTC (Tabela 1). Kiehl (1989), estudando a distribuição e retenção de NH_4^+ em solos com características diferentes, verificou retenções equivalentes a 15,7% e 29,3% dos 100 kg ha^{-1} de N aplicados, em solo com baixa e alta CTC, respectivamente.

A incorporação da uréia no solo alagado diminuiu substancialmente a emissão de amônia em ambos os solos. Foram perdidos 14 e 22 mg $vaso^{-1}$ de N, equivalentes a 4,0 e 6,1% da quantidade aplicada, no Vertissolo e no Gleissolo, respectivamente (Tabela 2). As baixas perdas de N verificadas nesse tratamento são atribuídas, principalmente, às baixas concentrações de amônio na água de alagamento (Figura 2) e ao fato de o aumento do pH ao redor dos grânulos de uréia, durante a sua hidrólise, ser tamponado pelos íons H^+ existentes

no solo (SAVANT et al., 1987; ERNANI, 2008), além da adsorção dos íons NH_4^+ aos colóides do solo diminuindo a sua movimentação em direção à superfície do solo. De Datta et al. (1989), em trabalhos com uréia incorporada ao solo alagado, realizados nas Filipinas, verificaram perdas de amônia de 9,0% do N aplicado. Mikkelsen (1987) encontrou relatos de perdas de N por volatilização de amônia inferiores a 5% quando a uréia foi incorporada na lama. Por outro lado, embora os resultados obtidos mostrem altas perdas de N por volatilização de amônia, a presença de plantas e fatores importantes na emissão de amônia como a temperatura da água e a velocidade do vento, não foram avaliados no presente trabalho. Além disso, quando se incorpora a uréia ao solo alagado, no intuito de se diminuir as perdas por volatilização de amônia, pode-se incrementar as perdas pelo fenômeno nitrificação-desnitrificação. Portanto, os percentuais absolutos de perdas de N acumuladas, quantificadas no presente trabalho, devem ser interpretados com cautela e referendados em trabalhos de campo.

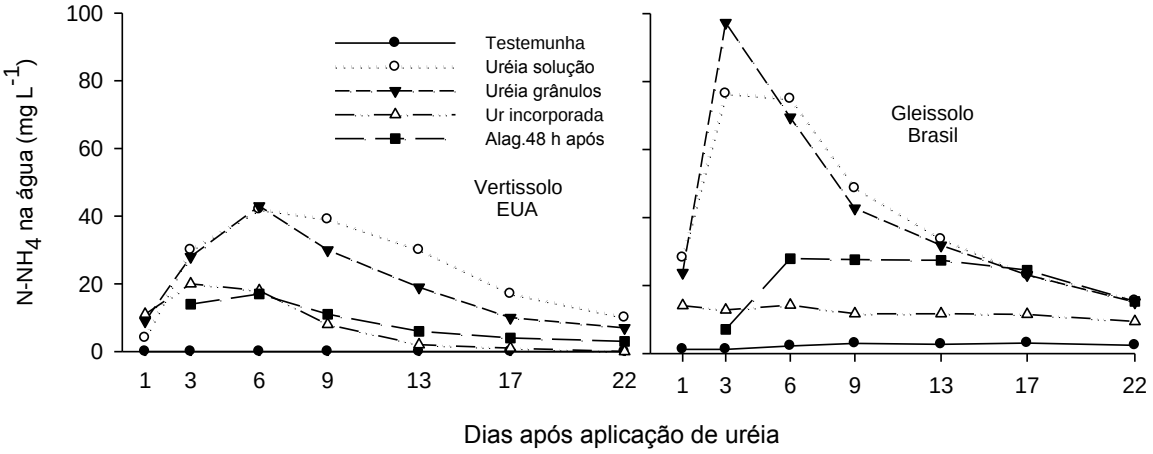

Figura 2. Concentração de amônio na água de alagamento dos solos em função da forma de aplicação da uréia. Testemunha (sem N); uréia solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre a lâmina de água; uréia grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; ur incorporada = uréia incorporada ao solo previamente alagado; Alag. 48 h após = uréia aplicada na superfície solo úmido o qual foi alagado 48 h após a aplicação da mesma.
Todos os tratamentos receberam 353 mg de N por vaso, na forma de uréia, equivalente a 200 kg de N ha^{-1}.

Os teores de amônio na água de alagamento dos solos foram altos nos primeiros dias após a aplicação da uréia e diminuíram com o passar do tempo, tendo havido um comportamento diferencial entre os tratamentos e entre os solos (Figura 2). No tratamento testemunha (sem N), os valores foram insignificantes nos dois solos (Figura 2). Nos tratamentos que receberam uréia, as maiores concentrações de amônio na água ocorreram

entre o 3º e o 9º dia após a aplicação do fertilizante e foram maiores nos tratamentos com uréia aplicada sobre a lâmina de água, tanto na forma de solução como em grânulos, seguidas pela uréia aplicada em solo úmido com alagamento 48 horas após e, por último, pelo tratamento com uréia incorporada no solo alagado (Figura 2).

Nos tratamentos em que a uréia foi aplicada sobre a lâmina de água, o pico de concentração de amônio, no Vertissolo, foi de 42 mg L^{-1}, no 6º dia após a aplicação de uréia; a partir desse tempo, começou a decrescer, de forma moderada (Figura 2). No Gleissolo, a uréia aplicada sobre a lâmina de água proporcionou o pico de concentração de amônio na água no 3º dia após a aplicação do fertilizante, tendo atingido 100 mg L^{-1} quando a uréia foi aplicada na forma de grânulos e 80 mg L^{-1} quando ela foi aplicada na forma de solução. No Gleissolo, o decréscimo na concentração de amônio na água ocorreu de forma mais acentuada do que no Vertissolo (Figura 2). As altas concentrações de amônio na água de alagamento ocorridas nos tratamentos em que a uréia foi aplicada sobre a lâmina de água intensificaram a ação dos dois principais fatores que favorecem a emissão de amônia, ou seja, elevado pH e alta concentração de amônio. Além disso, os teores de amônio na água verificados quando a uréia foi aplicada sobre a mesma são muito superiores aos 14 mg L^{-1} encontrados por Fillery et al. (1984) e aos 20 mg L^{-1} encontrados por De Datta et al. (1991). As diferenças nos valores encontrados no presente trabalho e nos trabalhos citados são atribuídas, principalmente, às diferenças nas doses de uréia utilizadas nos experimentos e a alguns atributos do solo como a CTC.

No tratamento em que os solos foram alagados 48 horas após a aplicação de uréia, o pico de concentração de amônio na água ocorreu no 6º dia para ambos os solos. Entretanto, no Vertissolo o pico atingiu 20 mg L^{-1} e começou a decrescer, enquanto no Gleissolo o pico foi de 30 mg L^{-1} e se manteve praticamente uniforme até o 17º dia (Figura 2). A principal causa dessas diferenças está na CTC dos solos (Tabela 1). Nesse caso, a maior CTC do Vertissolo confere a ele maior capacidade de retenção de NH_4^+ do que o Gleissolo.

Quando a uréia foi incorporada ao solo alagado, a concentração máxima de amônio na água de alagamento do Vertissolo ocorreu no 3º dia e atingiu 20 mg L^{-1}. Após esse tempo esta começou a decrescer e praticamente desapareceu 13º dia (Figura 2). No Gleissolo, a concentração máxima foi de aproximadamente 15 mg L^{-1}, porém se manteve praticamente constante durante os 22 dias de avaliação.

Após o alagamento dos solos, houve aumento do pH da água de todos os tratamentos (Figura 3). No tratamento testemunha, o pH da água de alagamento do Vertissolo foi superior

ao pH da água do Gleissolo. Este fato está relacionado ao pH alcalino do Vertissolo e ao pH ácido do Gleissolo (Tabela 1). Por outro lado, o alagamento reduz os compostos oxidados do solo. As reações de redução normalmente aumentam o pH dos solos ácidos e diminuem o pH dos solos alcalinos (PONNAMPERUMA, 1972). No Gleissolo, o pH do tratamento que não recebeu N teve uma elevação constante até o final das avaliações, já no Vertissolo, o pH da água começou a decrescer 17 dias após o alagamento (Figura 3).

Quando a uréia foi aplicada sobre a lâmina de água, o pH da água do Vertissolo atingiu valores próximos a 9,0, aos nove dias após a aplicação de uréia, e permaneceu praticamente constante durante os 22 dias de avaliação; no Gleissolo, o pico ocorreu no 3º dia, tendo atingido pH em torno de 8,4, e decresceu logo em seguida. Nesse caso, o pH da água, verificada nos dois solos, seguiu a cinética da concentração de amônio (Figura 2).

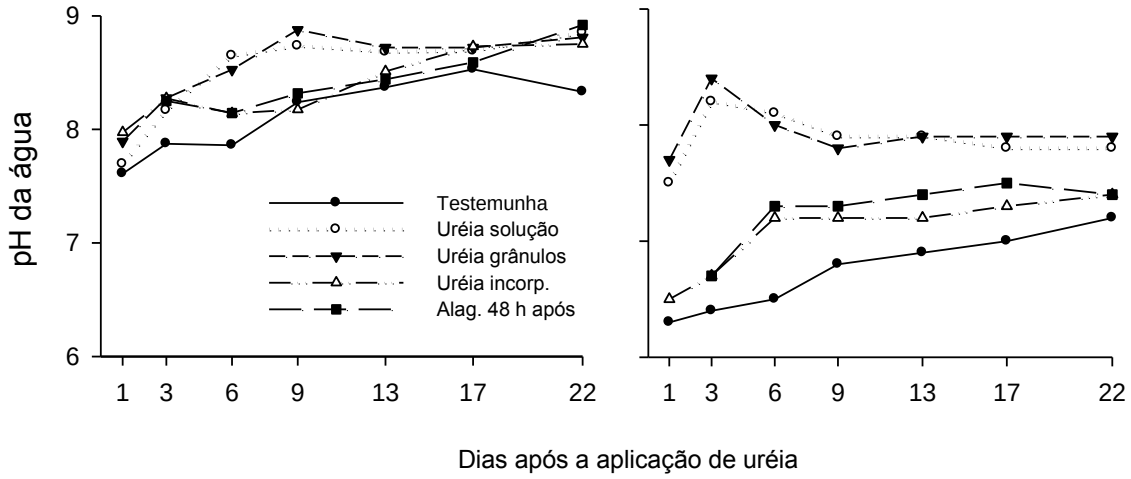

Figura 3. pH da água de alagamento dos solos em função da forma de aplicação de uréia. Testemunha (sem N); uréia solução = uréia solubilizada em água destilada e aplicada sobre a lâmina de água; uréia grânulos = uréia aplicada sobre lâmina de água, na forma de grânulos; uréia incorp. = uréia incorporada no solo previamente alagado; Alagamento 48 h após = uréia aplicada na superfície solo úmido o qual foi alagado 48 h após a aplicação da mesma.
Todos os tratamentos receberam 353 mg de N por vaso, na forma de uréia, equivalente a 200 kg de N ha^{-1}

Nos tratamentos em que a uréia foi incorporada no solo alagado e quando a uréia foi aplicada em solo úmido com alagamento 48 horas após, o pH da água teve um comportamento similar nos dois solos (Figura 3). Entretanto, enquanto no Vertissolo o pH da água atingiu valores próximos a 8,2 e se manteve praticamente constante durante todo o período de avaliação, no Gleissolo o pH da água não passou de 7,2.

O pH da água de alagamento é de grande importância na intensidade de emissão de amônia. Buresh et al. (2008) verificaram que a amônia aquosa encontrava-se em teores

insignificantes quando o pH da água era 7,5, mas aumentaram rapidamente com o aumento do pH, atingindo concentração igual à de NH_4^+ quando o pH atingiu 9,2. Mikkelsen (1987) verificou que a concentração de NH_3 na água de alagamento do arroz aumentou dez vezes quando o pH da mesma passou de 7,5 para 9,5. Diante dessas referências, esperava-se que a volatilização de amônia no Vertissolo fosse muito superior àquela quantificada no Gleissolo. Entretanto, a CTC do Vertissolo era praticamente quatro vezes maior do que a CTC do Gleissolo (Tabela 1), o que deve ter minimizado as emissões de NH_3 no Vertissolo. Portanto, embora o pH da água do Vertissolo pudesse ter favorecido a emissão de amônia, a sua alta CTC deve ter atuado como um fator atenuante dessas emissões, resultando num certo equilíbrio nos valores das perdas de amônia nos dois solos (Tabela 2).

5.5 CONCLUSÕES

1. A lâmina de água não evita as perdas de N da uréia por volatilização de amônia;
2. As perdas de N por volatilização de amônia são menores quando a uréia é aplicada em solo aerado seguido de alagamento do que quando esta é aplicada sobre a lâmina de água;
3. Quando a uréia é incorporada ao solo alagado, as perdas de N por volatilização de amônia são insignificantes.
4. No sistema de cultivo de arroz pré-germinado, sempre que possível, a uréia deve ser aplicada em solo seco e o alagamento realizado logo em seguida.

6 CAPÍTULO V

A INCORPORAÇÃO ANTECIPADA DA PALHA DE ARROZ DIMINUI A FORMAÇÃO DE ÁCIDO ACÉTICO E ALTERA O pH DA SOLUÇÃO E A DINÂMICA DO N NO SOLO ALAGADO

6.1 RESUMO

A incorporação da palha do arroz próximo ao preparo final do solo e alagamento para a semeadura pode imobilizar o N mineral do solo e originar a produção de ácidos orgânicos prejudiciais ao desenvolvimento das plântulas de arroz e afetar negativamente a produtividade de grãos. O presente estudo teve por objetivos avaliar a formação de ácidos orgânicos, alterações no pH, e quantificar o N mineral no solo em função de diferentes épocas de incorporação da palha do arroz ou da incorporação da cinza da queima da palha, antes do alagamento do solo. O experimento foi conduzido em vasos, em casa-de-vegetação utilizando-se um Cambissolo Háplico e consistiu dos seguintes tratamentos: testemunha (sem palha); incorporação da cinza da queima prévia da palha e palha incorporada aos 60, 30 ou aos 15 dias antes do alagamento e um tratamento com a palha incorporada no dia do alagamento. As unidades experimentais foram baldes plásticos com 5,0 kg de solo. Os baldes permaneceram alagados durante todo o período do experimento e sem o cultivo de arroz. As amostras de solo alagado foram coletadas a cada sete dias até a 13ª semana após o alagamento, onde determinou-se o N mineral. Na solução do solo determinou-se o pH e a concentração de ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico). Houve um comportamento sigmoidal na formação de amônio em todos os tratamentos, ou seja, os teores do íon começaram a aumentar logo após o alagamento do solo, diminuíram levemente e voltaram a subir novamente. Aos 91dias após o alagamento, as concentrações de amônio no solo eram 56, 73, 53 mg kg^{-1} nos tratamentos testemunha, palha incorporada com 60 ou 30 dias de antecedência e cinza incorporada equivalendo ao acúmulo de 84, 110 e 80 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Quando a palha foi incorporada no dia do alagamento ou 15 dias antes os teores de $N\text{-}NH_4^+$ no solo eram 28 e 54 mg kg^{-1} equivalendo a um acúmulo de N no solo de 42 e 81 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Houve formação apenas de ácido acético e este atingiu níveis tóxicos (7,2 mmol L^{-1}) aos 15 dias no tratamento com palha incorporada no dia do alagamento. O pH de todos os tratamentos aumentou após o alagamento sendo mais rápido nos tratamentos com palha depois com cinza e por último na testemunha. Entretanto, ao final de 60 dias todos os valores de pH atingiram em torno de 6,5. A incorporação da palha do arroz no solo deve ser realizada com antecedência mínima de 30 dias ao alagamento caso contrário poderá imobilizar parte do N mineral e produzir ácido acético.

6.2 INTRODUÇÃO

A palha do arroz (*Oryza sativa* L.), ou a resteva, é constituída pelas partes aéreas das plantas que ficam na lavoura após a colheita e retirada dos grãos. A quantidade de palha produzida pelas cultivares do tipo moderno é, em média, similar à quantidade de grãos em casca (KNOBLAUCH & SCHIOCCHET, 2001; COSTA et al., 2000). A recomendação técnica é que se faça a incorporação da palha ao solo ao invés de queimá-la (SOSBAI, 2010). Em Santa Catarina, existe uma lei estadual que restringe a prática da queima da palha do arroz. Todavia, a incorporação da palha próximo ao preparo final do solo e alagamento para a semeadura pode originar a produção de ácidos orgânicos prejudiciais ao desenvolvimento das plântulas (CAMARGO et al., 1993; AGOSTINETO et al., 2001; SOUSA & BORTOLON, 2002; SHMIDT et al., 2007) e imobilizar N mineral do solo (BROADBENT & NAKASHIMA, 1970; SERPA et al., 2009), que podem influenciar negativamente a produtividade de grãos (CAMARGO et al., 1995).

Por outro lado, em solos alagados, a decomposição da matéria orgânica (MO) é realizada por um grupo restrito de bactérias e, além disso, os fungos e actinomicetos, atuantes em solos aerados, praticamente não atuam nesse tipo de ambiente, o que torna a decomposição orgânica mais lenta do que em solos oxigenados (BECKER, 1994; SOUSA, et al., 2000). Em vista disso, a imobilização do N torna-se menor do que em solos oxigenados (BURESCH, 2008). No Estado da Califórnia, EUA, era comum a queima da palha nas lavoras de arroz irrigado até o início dos anos 1990, quando a queima passou a ser restringida (LINQUIST et al., 2006). Mutters (2009) observou, naquele estado, que a transição da queima para a incorporação da palha do arroz ao solo coincidiu com uma queda na produtividade das lavouras de arroz irrigado. Em Santa Catarina, muitos produtores de arroz não têm incorporado a palha ao solo devido a dificuldades operacionais e a observações relacionadas com um melhor estabelecimento e desenvolvimento inicial das plântulas onde a palha é queimada em relação à incorporação da mesma. Em decorrência disso, muitos agricultores queimam a palha ao invés de incorporá-la ao solo. Todavia, a queima é considerada prejudicial ao solo, por destruir parte da matéria orgânica, e ao meio ambiente, por liberar dióxido de carbono e outros gases para a atmosfera. Além disso, a palha possui, além do N e C, outros elementos em quantidades significativas, como P, K e S que podem ser perdidos durante a combustão. Ponnamperuma (1984), ao queimar a palha do arroz em laboratório, com temperatura de 700^{o}C, encontrou perdas 25% do P, 21% do K, e de 100% do C e do N.

Todavia, não existem trabalhos de pesquisa nessa área, em Santa Catarina, que tenham dimensionado e/ou caracterizado o problema da queima ou incorporação da palha do arroz para que se possa definir uma estratégia de manejo dos restos culturais do arroz sem prejuízos ao produtor e ao meio ambiente. O presente experimento teve por objetivos avaliar a formação de ácidos orgânicos, alterações no pH e quantificar o N mineral no solo durante 91 dias de alagamento em função de diferentes épocas de incorporação da palha do arroz ou da incorporação da cinza da queima da palha, antes do alagamento do solo.

6.3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em vasos, em casa-de-vegetação, na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, entre os meses de setembro de 2009 e fevereiro de 2010. Utilizaram-se amostras da camada superficial de 0 a 15 cm de um Cambissolo Háplico, coletadas no município de Pouso Redondo, SC, em áreas de cultivo de arroz no sistema irrigado por alagamento. O solo possuía pH-H_2O = 4,8, pH-SMP = 5,1, P = 2,0 mg kg^{-1}, K = 60 mg kg^{-1}, matéria orgânica (MO) = 20,0 g kg^{-1}, Al = 1,7 $cmol_c$ dm^{-3}, Ca = 2,0 $cmol_c$ dm^{-3}, Mg = 0,8 $cmol_c$ dm^{-3} e argila = 340 g dm^{-3}.

O experimento constou de seis tratamentos: testemunha, sem palha nem cinza; incorporação da cinza da queima prévia da palha; palha incorporada ao solo úmido aos 60, aos 30 e aos 15 dias antes da inundação, respectivamente e palha incorporada no dia do alagamento do solo. A quantidade de palha utilizada foi equivalente a 18,0 t ha^{-1} (peso seco), o que correspondeu a 50,0 g de tecido e a 12,0 g de cinza em cada vaso. Antes da incorporação, a palha de arroz foi picada em pedaços de aproximadamente 5,0 cm de comprimento.

As unidades experimentais foram constituídas por vasos com 5,0 kg de solo, o qual foi seco à sombra e passado em malha de 1,0 cm. Após o período de incubação de todos os tratamentos aplicados no solo aerado, os vasos foram inundados com água destilada e procedeu-se a formação de lama. A partir daí, os vasos permaneceram com uma lâmina de água de aproximadamente 5,0 cm acima da superfície durante os 91 dias de condução do experimento. Não houve cultivo de plantas de arroz.

Para a determinação do N mineral, as amostras de solo foram coletadas a cada sete dias, a partir da 1ª até a 13ª semana após o alagamento. Elas foram retiradas dos vasos com

auxílio de uma broca de ferro com 12,0 cm de comprimento e 1,0 cm de espessura. Após cada coleta, cada amostra foi homogeneizada manualmente, da qual foi retirada uma subamostra com aproximadamente 10 g para extração do N mineral (amônio e nitrato), sendo o restante utilizado para determinação da umidade, em estufa. As duas formas de N foram extraídas do solo com KCl 1,0 mol L^{-1} e determinadas em destilador semi-micro Kjeldahl, conforme metodologia de Tedesco et al. (1995).

O pH e os ácidos orgânicos (acético, butírico e propiônico) foram determinados em amostras de solução do solo. A solução foi extraída dos solos por tubos de PVC com 5,0 cm de diâmetro e 6,0 cm de comprimento, envoltos, nas duas extremidades, por tela de nylon de 150 mesh. Os tubos foram introduzidos no solo de modo que a parte superior permaneceu 1,0 cm abaixo da superfície. Para a retirada da solução do solo, conectou-se um tubo de plástico ao cano de PVC, ao qual foi fixada uma rolha na parte superior com o objetivo de evitar as trocas gasosas entre a atmosfera e a solução do solo. As amostras de solução do solo foram coletadas com auxílio de seringa aos 3, 6, 10, 15, 18, 23 e 29 dias após o alagamento. Após as coletas, as amostras foram acidificadas com ácido sulfúrico 1,0 mol L^{-1} até atingirem pH < 3,0, acondicionadas em frascos plásticos e guardadas em geladeira até a data da realização das análises.

As determinações dos ácidos orgânicos foram realizadas no laboratório da Estação Experimental da Epagri em Itajaí, da seguinte forma: previamente à injeção da solução do solo no cromatógrafo, 1,5 mL da amostra foram transferidos para tubos eppendorf e centrifugados a 13.000 rpm. Em seguida, parte do material foi transferida para frascos adequados para análise em cromatografia. A determinação dos ácidos orgânicos foi realizada utilizando a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), em um equipamento da marca Shimadzu, modelo LC10-VP, dotado de bomba para gradiente quaternário, injetor automático com suporte de amostras termostatizado (10^{o}C), forno de coluna (40^{o}C) e detector de absorção ultra violeta (ajustado para 210 nm). O sistema é gerenciado por uma estação de trabalho dotada de software específico. A coluna utilizada foi a Aminex-HPX-87H (BioRad). Para maior proteção, o sistema conta ainda como uma pré-coluna. A fase móvel utilizada foi H_2SO_4 5 mM L^{-1}, em modo isocrático com fluxo de 0,6 mL min^{-1}. O volume de injeção das amostras foi de 20 uL. O pH da solução do solo foi determinado aos 10, 14, 17, 22, 30, 60 e 90 dias após o alagamento. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições.

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No tratamento em que não foi aplicado cinza e nem palha (testemunha), os teores de amônio no solo começaram a aumentar a partir do dia do alagamento, atingiram valores próximos a 40 mg kg^{-1} de N aos 28 dias após o alagamento. Sequencialmente, diminuíram levemente, estabilizaram e voltaram a aumentar a partir dos 63 dias, atingindo 56 mg kg^{-1} aos 91 dias após o alagamento (Figura 1). Este comportamento sigmoidal na liberação de N durante a mineralização da MO nativa de solos alagados também foi verificado por outros autores (LI et al., 2003, 2006; VAHL, 1999; BECKER et al., 1994; SAVANT & De DATTA, 1982), que afirmam que a formação de amônio em solos alagados ocorre normalmente em duas fases: uma rápida onde é mineralizada a fração da MO mais lábil seguida por uma lenta onde estaria sendo mineralizada a fração da MO mais recalcitrante. Considerando-se uma camada de solo de 15 cm onde estariam mais de 95% das raízes do arroz (ESPINAL, 1997), ao final de 91 dias de alagamento haveria um acúmulo no solo de aproximadamente 86 kg de $N\text{-}NH_4^+$ ha^{-1}.

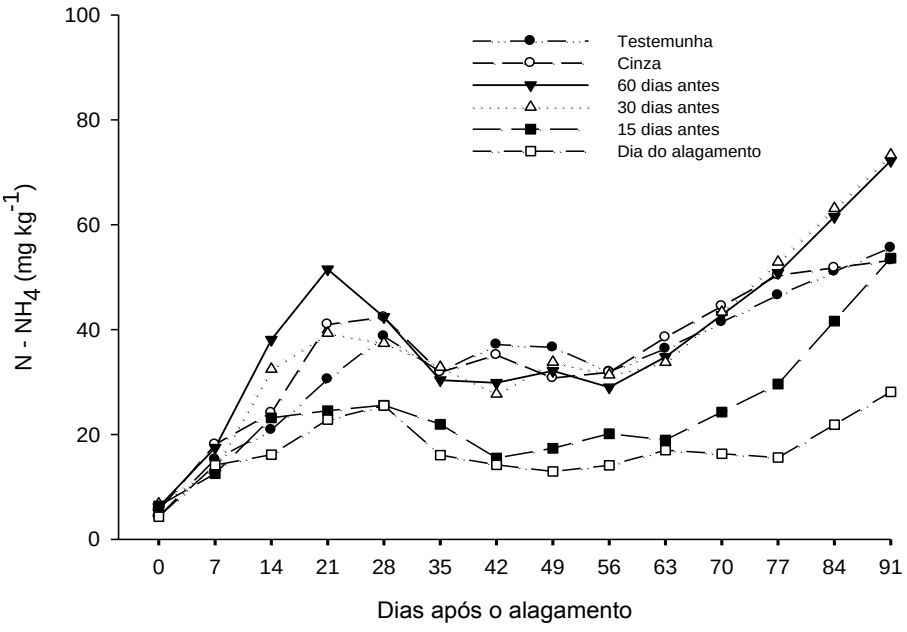

Figura 1. Variação temporal do teor de amônio no solo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no dia do alagamento. Medias de quatro repetições. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza.

Os demais tratamentos que receberam a aplicação de palha ou de cinza da queima da palha tiveram um comportamento sigmoidal de acúmulo de amônio no solo, idêntico ao tratamento testemunha (Figura 1), sendo que a diferença foi apenas na quantidade de amônio acumulada que em alguns tratamentos foi maior e em outros menor do que aquela ocorrida na testemunha (Figura 2). Até os 70 dias de alagamento, as maiores concentrações de amônio no solo ocorreram na testemunha, no tratamento com cinza incorporada ao solo e naqueles com palha incorporada aos 60 e aos 30 dias de antecedência, atingindo uma média de 43 mg de N-NH_4^+ kg^{-1} de solo, (Figura 1). Entretanto, a partir dos 70 dias de alagamento, os tratamentos com palha incorporada 60 ou 30 dias antes continuaram com alta taxa de acúmulo de amônio (72 e 73 mg kg^{-1} aos 91 dias após o alagamento, respectivamente) enquanto a testemunha e aquele com cinza incorporada ao solo diminuíram de intensidade e acumularam, ao final de 95 dias, apenas 56 e 53 mg kg^{-1}, respectivamente (Figura 1). Considerando uma camada de 15 cm de solo, a quantidade de amônio acumulada no solo, ao final de 91 dias de alagamento, equivaleu a 110 kg ha^{-1} de N-NH_4^+ nos tratamentos com palha incorporada aos 60 e aos 30 dias antes e a 84 e 80 kg ha^{-1} de N-NH_4^+ na testemunha e naquele com cinza incorporada ao solo, respectivamente. Isto demonstra que a partir dos 56 dias de alagamento a palha do arroz continuou liberando N enquanto os tratamentos sem palha diminuíram sensivelmente a taxa de mineralização.

Os tratamentos em que a palha foi incorporada no dia do alagamento ou 15 dias antes tiveram comportamentos semelhantes na formação de amônio até aos 63 dias após o alagamento e, a partir daí, passou a ser diferenciada (Figura 1). Nesse caso, até os 63 dias, os tratamentos em que a palha do arroz foi incorporada no dia do alagamento ou 15 dias antes acumularam em torno de 17 e 19 mg de N-NH_4^+ kg^{-1} de solo, respectivamente (Figura 1). A partir desse tempo, houve maior formação de amônio quando a palha foi incorporada com 15 dias de antecedência do que quando ela foi incorporada no dia do alagamento, acumulando, em 91 dias 54 e 28 mg kg^{-1} (Figura 1) que equivalem a 81 e 42 kg ha^{-1}, respectivamente. Considerando as diferenças no acúmulo de amônio nos tratamentos em que a palha do arroz foi incorporada aos 60 e aos 30 dias antes do alagamento com o tratamento em que a palha foi incorporada ao solo no dia do alagamento, houve uma diferença a favor dos tratamentos com palha incorporada com antecedência de aproximadamente 68 kg de N-NH_4^+ ha^{-1} ou 151 kg de uréia ha^{-1}.

Na Figura 2 são apresentados os teores de amônio no solo nos tratamentos que receberam palha ou cinza incorporadas ao solo, após subtrair os valores existentes na

testemunha, onde não foi aplicado palha e nem cinza. Os valores negativos de concentração de amônio no solo correspondem, portanto, às quantidades de amônio inferiores àquela existente no tratamento testemunha.

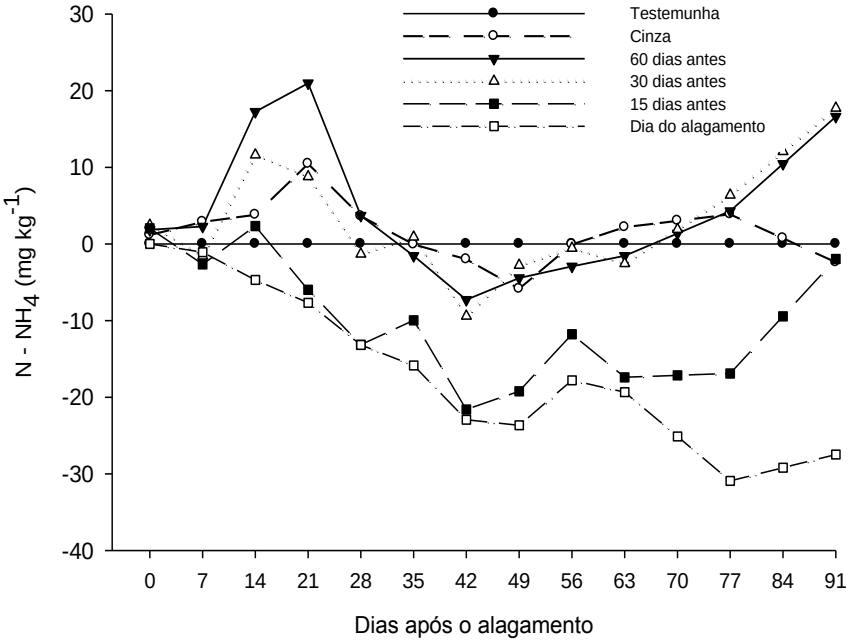

Figura 2. Variação temporal dos teores de amônio no solo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no dia do alagamento, após serem subtraídos os valores existentes no tratamento onde não foi aplicado palha ou cinza (testemunha). Medias de quatro repetições.

Nos tratamentos em que a palha do arroz foi incorporada com antecedência de 60 ou 30 dias ao alagamento e naquele que foi incorporada a cinza da queima da palha, a quantidade de amônio no solo, entre 7 e 21 dias após o alagamento, foi maior que a quantidade acumulada na testemunha (Figura 2) e isso se deve à decomposição da fração mais lábil do material orgânico adicionado (VAHL, 1999; LI et al., 2003, 2006). Após a existência de um pico de concentração, entre 14 e 21 dias de alagamento, ocorreu um período de imobilização de N, até os 49 dias aproximadamente, quando a concentração de amônio voltou a aumentar. Verifica-se, entretanto, que a partir dos 70 dias após o alagamento, os tratamentos em que a palha foi incorporada com 60 ou 30 dias de antecedência passaram a liberar amônio, enquanto no tratamento com cinza incorporada ao solo a concentração de amônio estabilizou e passou a haver imobilização do amônio formado (Figura 2). Comportamento semelhante ao verificado na dinâmica de imobilização e liberação de N nos tratamentos com incorporação antecipada

da palha do arroz foi verificado por Becker et al. (1994) em experimento conduzido nas Filipinas.

Quando a palha do arroz foi incorporada ao solo no dia do alagamento ou 15 dias antes, a concentração de amônio no solo começou a diminuir, em relação à testemunha, assim que o solo foi alagado e, aos 42 dias após o alagamento, a imobilização de N atingia valores superiores a 21 mg de $N\text{-}NH_4^+$ kg^{-1}, nos dois tratamentos (Figura 2). Nesses tratamentos, a dinâmica de imobilização de N teve comportamento semelhante até os 63 dias de alagamento e, a partir desse tempo, a palha incorporada ao solo no dia do alagamento continuou imobilizando N enquanto a palha incorporada 15 dias antes estabilizou o processo de imobilização e, a partir de 77 dias, passou a mineralizar parte do N imobilizado. Até os 77 dias após o alagamento, a quantidade de N imobilizada pela palha do arroz nos tratamentos com palha incorporada no dia do alagamento ou 15 dias antes era de 31 e 17 mg de NH_4^+ kg^{-1} de solo, respectivamente. Considerando uma camada de solo de 15 cm, a quantidade de N imobilizada foi de 47 e 26 kg de NH_4^+ ha^{-1}, aos 77 dias após o alagamento do solo. Considerando que mais de 95% das cultivares de arroz irrigado utilizadas pelos produtores catarinenses são de ciclo longo (NOLDIN, et al., 2009), que o perfilhamento do arroz é uma fase de alta demanda por N (SOSBAI, 2010), e ainda que, nas cultivares de ciclo longo, esta fase ocorre entre 30 e 80 DAS (EPAGRI, 2002), deduz-se que a incorporação da palha do arroz próximo ao alagamento do solo diminui a disponibilidade de N para as plantas em uma fase de alta demanda pelo nutriente. Por outro lado, quando a palha do arroz foi incorporada 30 ou 60 dias antes do alagamento do solo, a taxa de mineralização de N nesses dois tratamentos passou a ser maior do que na testemunha a partir dos 70 dias de alagamento. Considerando que a fase reprodutiva do arroz também possui alta demanda de N (EPAGRI, 2002) e que esta se inicia, em média, aos 80 DAS, nas cultivares de ciclo longo (SOSBAI, 2010) a incorporação da palha do arroz com antecipação mínima de 30 dias ao alagamento para a semeadura do arroz irá disponibilizar maior quantidade de N na fase reprodutiva do que aquele solo que não receber palha.

A taxa de imobilização de N decorrente da incorporação da palha de arroz varia na razão direta com a temperatura ambiente (SAVANT & De DATTA, 1982). Nesse caso, como o experimento foi realizado em casa-de-vegetação, onde as temperaturas são maiores do que àquelas verificadas no campo, a magnitude de liberação ou imobilização de N pela incorporação da palha de arroz deve variar entre esses dois ambientes. Segundo Ponnamperuma (1984) em regiões de clima quente a palha do arroz pode ser incorporada até

um mês antes do alagamento e semeadura do arroz, porém, em regiões de clima mais ameno, ela deve ser incorporada com maior antecedência.

Considerando que foram adicionadas 10 g de palha kg^{-1} de solo, com uma concentração de 6,0 mg kg^{-1} de N na matéria seca da palha, os tratamentos com palha adicionaram 60 mg kg^{-1}. Verifica-se, portanto, que nos tratamentos em que a palha foi incorporada com antecedência de 60 ou 30 dias antes do alagamento, houve a formação de 17 mg de NH_4^+ kg^{-1} a mais do que na testemunha, após 91 dias após o alagamento (Figura 2) e isso representa 28,3% da quantidade de N contida na mesma. Russel et al. (2006) afirmam que a palha do arroz incorporada em um solo de arrozeira na Califórnia, nos Estados Unidos, demorou dois anos para se decompor completamente. Já Linquist et al. (2006) após pesquisas realizadas na mesma região, recomendam diminuir a dose de N para o arroz irrigado em 20 kg ha^{-1} quando a palha for incorporada ao solo ao invés de ser queimada. Por outro lado, Camargo et al. (1995) verificaram que a incorporação de resíduos vegetais, por ocasião do preparo final do solo e alagamento para a semeadura do arroz, reduziu em até 25% a produtividade do arroz irrigado no estado do Rio de Janeiro.

Um dia antes do alagamento, os teores de nitrato no solo nos tratamentos que não tinham recebido palha incorporada eram maiores do que com palha (Figura 3) mostrando que a palha, ao ser decomposta, provocou a imobilização do nitrato disponível no solo. Nesse caso, os teores de nitrato eram maiores no tratamento testemunha, seguido pela cinza e pela palha incorporada no dia do alagamento do solo que atingiram concentrações de 40, 33 e 32 mg de $N\text{-}NO_3^-$ kg^{-1}, respectivamente (Figura 3). Quando a palha do arroz foi incorporada ao solo com antecedência ao alagamento, os teores de nitrato foram 11, 8 e 7 mg de $N\text{-}NO_3^-$ kg^{-1}, para os tratamentos com palha incorporada aos 15, 30 e 60 dias antes do alagamento, respectivamente (Figura 3). A imobilização do N mineral do solo ocorre, normalmente, quando é adicionado a ele material vegetal com alta relação C:N (ERNANI, 2008). A palha de arroz utilizada no experimento possuía relação C:N de 60:1. Para as culturas de sequeiro, este fenômeno é prejudicial às plantas, uma vez que pode restringir a disponibilidade de N. Já no arroz irrigado, a imobilização do N-nitrato é benéfica à cultura, tendo em vista que parte do N imobilizado será amonificado durante a decomposição da palha após o alagamento do solo, tornando-se disponível durante o ciclo vegetativo do arroz (PONNAMPERUMA, 1984).

Todo o nitrato que havia no solo antes do alagamento, independente da concentração inicial, foi perdido por desnitrificação nos primeiros 14 dias após o alagamento do solo (Figura 3). Considerando que as plantas de arroz irrigado, cultivadas no sistema pré-

germinado, passam a demandar maiores quantidades de N a partir dos 25 a 30 DAS, (SOSBAI, 2010), o nitrato teria sido completamente perdido antes de ser absorvido pelas plântulas de arroz. A desnitrificação ocorre nos solos alagados devido à ausência de oxigênio. Nesse caso, os microrganismos utilizam o nitrato como aceptor preferencial de elétrons durante a decomposição anaeróbia da matéria orgânica e o N é perdido nas formas de N_2O e N_2, principalmente (PONNAMPERUMA, 1972; PATRICK & REDDY, 1978; PONNAMPERUMA, 1984; MADRUGA, 1999).

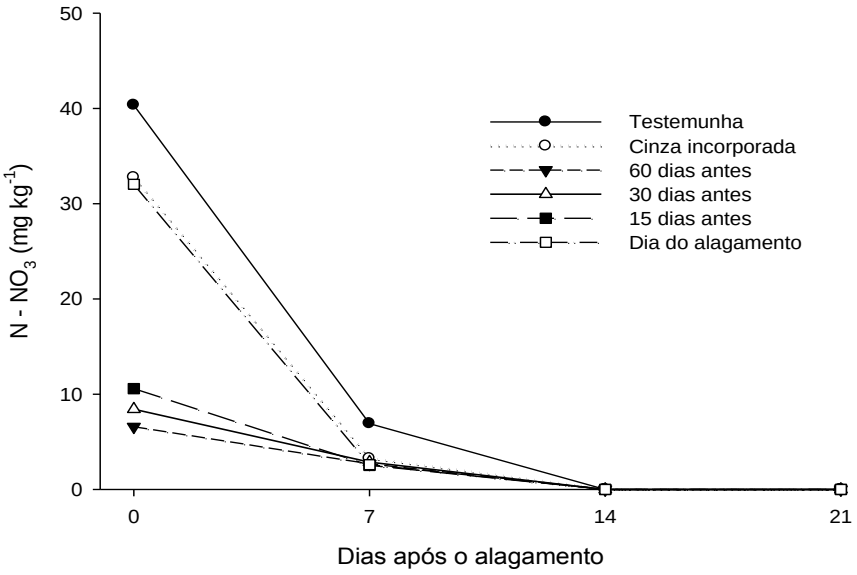

Figura 3. Variação temporal dos teores de nitrato no solo, após o alagamento dos vasos, em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no dia do alagamento. Medias de quatro repetições. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza.

O pH da solução do solo aumentou após o alagamento em todos os tratamentos (Figura 4). Na testemunha, houve um aumento constante ao longo do tempo, atingindo 4,7 aos 10 dias de alagamento, 5,6 aos 22 dias, o qual estabilizou em 6,3 após 60 dias de alagamento do solo (Figura 4). Em todos os tratamentos em que a palha do arroz foi incorporada ao solo, independente do tempo de antecedência, o aumento do pH foi mais rápido que nos tratamentos sem palha, atingindo valores próximos a 6,0 aos dez dias e tendo estabilizando em 6,5 após 22 dias de alagamento (Figura 4). A incorporação da cinza ao solo aumentou o pH da solução do solo mais rápido que a testemunha, porém mais lento que os tratamentos com palha (Figura 3).

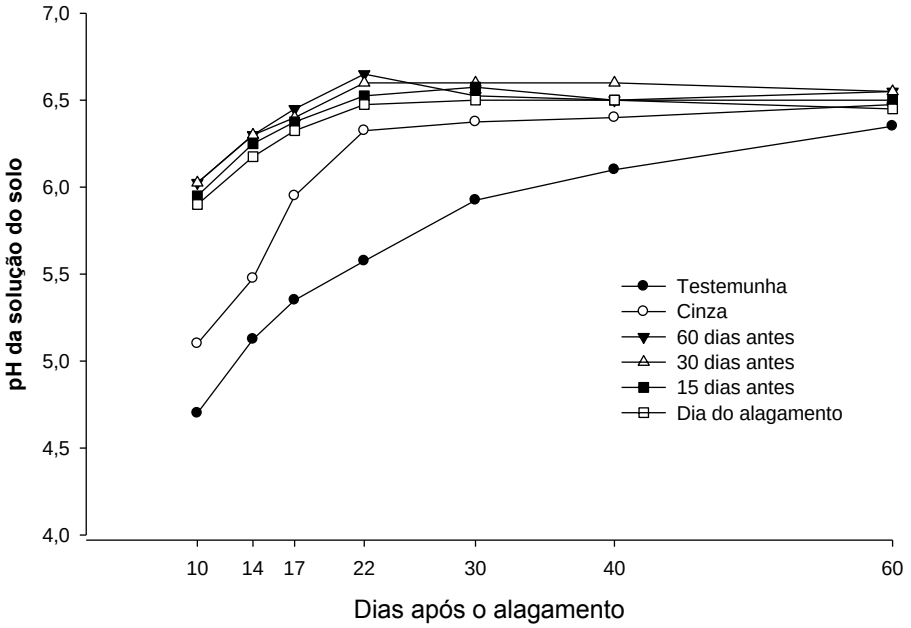

Figura 4. pH da solução do solo ao longo do tempo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento ou da incorporação da cinza da queima da palha, que ocorreu no dia do alagamento. Medias de quatro repetições. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza.

O aumento do pH dos solos, após o alagamento, ocorre devido aos processos de redução dos compostos oxidados e é tão mais rápido quanto maior for a oferta de elétrons para o meio (PONNAMPERUMA, 1972). A fonte de elétrons é a matéria orgânica do solo, e/ou os materiais orgânicos adicionados ao solo e as reações são catalizadas pelas enzimas respiratórias das bactérias (SOUSA, 2000; VAHL, 1982). Deste modo, a intensidade de redução do solo depende do tipo e da quantidade de MO disponível e de condições ambientais que afetam a atividade dos microorganismos, como pH e temperatura, principalmente. Neste trabalho, a palha do arroz foi a principal fonte de elétrons para a redução do solo. O aumento do pH de solos ácidos alagados é de extrema importância para o cultivo do arroz irrigado, pois favorece as reações de liberação de N e de P e diminui o efeito dos elementos e compostos potencialmente tóxicos como Al, Fe, Mn, CO_2, ácidos orgânicos e H_2S (SOUSA et al., 2006).

A incorporação da palha de arroz no solo liberou apenas o ácido acético, não tendo sido detectada a presença dos ácidos propiônico e butírico. A presença do ácido acético foi verificada entre 10 e 18 dias após o alagamento do solo em todos os tratamentos que receberam palha e não ocorreu nos tratamentos testemunha e cinza incorporada (Figura 5). A concentração máxima deste ácido, na maioria dos tratamentos, ocorreu aos 15 dias após o alagamento, tendo deixado de existir aos 23 dias após. As maiores concentrações do ácido ocorreram nos tratamentos que receberam palha do arroz e atingiram 7,2 3,6 e 1,9 mmol L^{-1}, nos tratamentos com palha incorporada no dia do alagamento, 30 e 15 dias antes, respectivamente (Figura 5). Concentrações de ácido acético, nessas magnitudes, são consideradas tóxicas às raízes das plântulas de arroz (FORTES, 2006), mas pode não afetar o crescimento da parte aérea (SOUSA E BORTOLON, 2002).

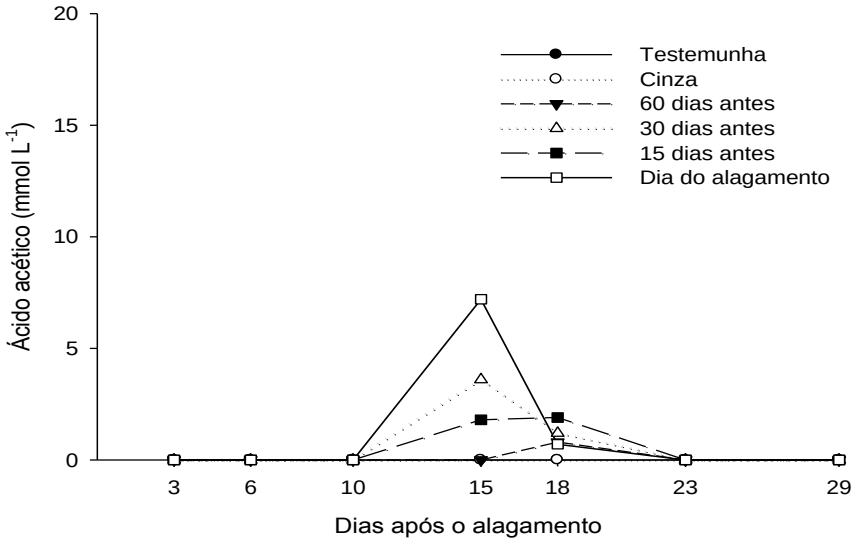

Figura 5. Concentração de ácido acético na solução do solo ao longo do tempo após o alagamento dos vasos em função da época de incorporação da palha do arroz antecedendo o alagamento por 60, 30, 15 dias e no dia do alagamento do solo e da incorporação da cinza da queima da palha realizada no dia do alagamento. Testemunha = tratamento sem aplicação de palha ou cinza

A formação de ácidos orgânicos voláteis, em solos alagados, depende de vários fatores; dentre eles, a temperatura ambiente e o pH da solução do solo, sendo que, em altas temperaturas e pH próximo ao neutro os ácidos orgânicos são produzidos em menor quantidade e possuem uma vida mais curta (PONNAMPERUMA, 1972; SOUSA et al., 2003). Sendo assim, a incorporação da palha de arroz ao solo sem a devida antecedência ao alagamento pode causar algum dano ao estabelecimento das plântulas de arroz, dependendo da temperatura ambiente e do pH da solução do solo.

6.5 CONCLUSÕES

1. A incorporação da palha do arroz no solo aumenta o pH da solução após o alagamento e, por consequência, acelera a decomposição da MO e a redução do solo aumentando a disponibilidade de alguns nutrientes;

2. A incorporação da palha do arroz no solo deve ser realizada com antecedência mínima de 30 dias ao alagamento e semeadura do arroz. Caso contrário, os microrganismos ao decomporem a palha irão provocar a imobilização do amônio, resultando em necessidade de aplicação de maiores doses de N e a fermentação da palha irá produzir ácido acético o qual poderá prejudicar o desenvolvimento das plântulas de arroz.

7. CONCLUSÕES GERAIS

1. As perdas de N pelo uso de uréia em solos alagados são inevitáveis, independente da forma de aplicação da mesma. Entretanto, as maiores perdas ocorrem quando esta é aplicada sobre a lâmina de água, seguida pela aplicação na superfície do solo úmido com posterior alagamento e, por último, quando esta é incorporada ao solo alagado. Com o objetivo de minimizar as perdas, quando não for possível incorporar a uréia ao solo esta deve ser aplicada sobre a superfície do solo drenado e o alagamento deve ser realizado logo a seguir;
2. A produtividade de grãos é altamente dependente da quantidade de panículas e do número de grãos por panícula. Esses dois componentes são definidos nas fases de perfilhamento e reprodutiva do arroz onde ocorre a maior demanda de N pelas plantas. Nas cultivares de arroz de ciclo longo, essas duas fases se estendem, normalmente, até os 110 a 120 dias após a semeadura. Sendo assim, os fertilizantes nitrogenados, independente da origem ou forma, quando aplicados antes da semeadura do arroz não possuem efeito suficientemente prolongado e, portanto, não devem ser aplicados em uma única dose, antes da semeadura;
3. Se o preparo do solo e o manejo da água do arroz cultivado em sistema pré-germinado forem realizados adequadamente e os fertilizantes forem adicionados nas doses recomendadas, não haverá contaminação das águas de superfície e nem do lençol freático por N mineral oriundo dos fertilizantes sejam eles minerais ou orgânicos;
4. O tipo de fertilizante nitrogenado, orgânico ou mineral, não afeta as principais características industriais e culinárias dos grãos mas, o teor de proteína pode ser aumentado com o aumento da disponibilidade de N para as plantas;
5. A palha do arroz deve ser incorporada ao solo com antecedência mínima de 30 dias ao preparo final do solo e alagamento para a semeadura do arroz, pois, do contrário, os microrganismos poderão imobilizar N durante a decomposição da mesma e as reações de fermentação poderão liberar ácido acético em níveis tóxicos para as plântulas. Além disso, a imobilização do $N\text{-}NO_3^-$ existente no solo devido à incorporação antecipada da palha do arroz é benéfica às plantas, pois parte do $N\text{-}NO_3^-$ que seria perdido após o alagamento, será imobilizada e depois liberada na forma de amônio durante o cultivo do arroz.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGOSTINETO, D. et al. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v.3. n.6, Santa Maria, RS. 2002

AGOSTINETO, D. et al. Ácidos orgânicos que se formam durante a decomposição da palha no solo afetam os processos de germinação e de crescimento inicial das plântulas da cultivar e arroz irga – 417. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 24. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 2. Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2001. p. 224-228.

AGUILAR, M.; GRAU, D. Influencia de las doses del abonado nitrogenado de fondo sobre los componentes del rendimiento y el comportamiento agronomico del arroz. Investigacion Agraria, **Produción y Protección Vegetales**. v.9 (1). Sevilla, 1994.

AOYAMA. M & NOZAWA, T. Microbial biomass nitrogen and mineralization-immobilization process of nitrogen in soils incubated with various organic materials. **Soil Science Plant Nutrition** 39, 1: 23-32. 1993.

ANDRADE, W.E.B de. Acúmulo e exportação de macronutrientes pelos grãos das cultivares de arroz Pesagro 104 e Epagri 109 na região das baixadas litorâneas, RJ. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 24. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 2. Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2001. p. 301-302.

ANGELS, O.R.; JOHNSON, E.S.; BURESH, R.J. Soil Solution Sampling for Organic Acids in Rice Paddy Soils. **Soil Science Society of America Journal** 70: 48-56, 2006

AULAKH, M.S. et al. Kinetics of Nitrifications Under Upland Flooded Soils of Varying Texture. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 27: 2079-2089. 1986.

BACHA, R.E. et al. Competição regional de cultivares e linhagens de arroz irrigado em Santa Catarina, 2004/05. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 4. 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2005. p. 97-99.

BARBER, S.A. **Soil Nutrient Bioavailability**. A Mechanistic Approach, New York, John Wiley &Sons, 1984, 398 p. il.

BARBOSA FILHO, M.P. Nutrição e adubação do arroz (sequeiro e irrigado). **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, Piracicaba, 1987. 129p. il.

BAYRAKLY, F. Ammonia volatilization losses from different fertilizers and effect of several urease inhibitors, CaCl2 and phosphogypsum on losses from urea. **Fertil. Res**. 23. 147-150. 1990.

BASSINELLO, P.Z; ROCHA, M. S. da; COBUCCI, R.M.A. Avaliação de diferentes métodos de cocção para arroz de terras altas para teste sensorial. (**Embrapa Arroz e Feijão, Comunicado Técnico 84**). 7p. Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2004.

BECKER, M. et al. Parameters affecting residue nitrogen mineralization in flooded soils. **Soil Society America Journal. 58**: 1666-1671, 1994.

BENNETT, E. Slow-release fertilizers. Virgínia Gardener Newsletter, Blacksburg, v.11 n.4. 1996. Disponível em: www.ext.vt.edu/

BIRD, J.A.; HORWATH. R.; EAGLE, J. A.; KESSEL, C. Van.; Immobilization of Fertilizer Nitrogen in Rice: Effects of Straw Management Pratices. **Soil Science Society of America Journal** 65: 1143-1152. 2001.

BIRD, J.A.; KESSEL, C. Van.; HORWATH. R. Stabilization of ^{13}C-Carbon and Immobilization of ^{15}N-Nitrogenfrom Rice Straw in Humic Fractions. **Soil Science Society of America Journal** 67: 806-816. 2003.

BOHENEN, H. et al. Ácidos orgânicos na solução de um gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. vol. 29. n.3. Viçosa, 2005.

BRASIL. Resolução do CONAMA: no 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 de março de 2005.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.2, p.365-372. 2000.

BRIONES, A. M. et al. Ammonia-oxidizing bacteria on root biofilms ad their possible contribution to N use efficiency of different rice cultivars. **Plant and Soil**. 250. 335-348. 2003.

BROADBENT, F.E.; NAKASHIMA, T. Nitrogen Immobilization in Flooded Soils. **Soil Science Society of America Journal.** 1970, 34: 218-221.

BROADBENT, F.E.; NAKASHIMA, T. Nitrogen Immobilization in Flooded Soils. **Soil Science Society of America Journal.** 1970, 34: 218-221.

BRUM, F. B. et al., Composição nutricional em grãos de arroz polido e parboilizado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 5. 2007, Pelotas, RS. **Anais...** Pelotas: SOSBAI, 2007. p. 572-575.

BUNDT, A. da Cas et al. Teor de macronutrientes em cultivares de arroz irrigado por alagamento em diferentes épocas de avaliação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31. Gramado, RS. 2007. Disponível em: http://w3.ufsm.br/congressos/SBCS_gramado/

BURESH, R.J. et al. Field Evaluation of Two Urease Inhibitors with Transplanted Lowland Rice. **Agronomy Journal**. 80: 763-768. 1988.

BURESH, R. J. et al. Dinitrogen and Nitrous Oxide Flux from Urea Basally Applied to Puddled Rice Soils. **Soil Science Society of America Journal. 55**: 268-273, 1991.

BURESH, R.J.; PATRICK, W.H, Jr. Nitrate Reduction to Ammonium in Anaerobic Soils. **Soil Science Society of America Journal.** 1978. 42: 913-918.

BURESH, R. J.; AUSTIN, E.R. Direct Measurement of Dinitrogen and Nitrous Oxide Flux in Flooded rice Fields Soils. **Soil Science Society of America Journal.** 1988. 52: 681-688.

BURESH, RJ.; REDDY, K.R.; Van KASSEL. Nitrogen transformations in Submerged Soils. In: Schepens, J.S.; Raun, W.R. Editors. Nitrogen in Agriculture Systems. Agronomy Monography, 49. Madison, SI (USA): ASA, CSSA, and SSSAJ. p.401-436, 2008.

BURESH, R.J.; PATRICK, W.H, Jr. Nitrate Reduction to Ammonium in Anaerobic Soils. **Soil Science Society of America Journal.** 1978. 42: 913-918.

BURESH, R.J. Site-specific nutrient management for rice. International Rice Research Institute. **Farming Outlook**. p.18-23, 2008.

BUSHONG, J.T. et al. Evaluation of Distillation and Diffusion Techiques for Estimating Hydrolyzable Amino Sugar-Nitrogen as a Means of Predicting Nitrogen Mineralization. **Soil Science Society of America Journal** 72(4):p.992-999, 2008

CABRERA, M.L. et al. Design and Ammonia-Recovery Evaluation of a Wind Speed-Sensitive Chamber System. **Soil Science Society of America Journal** 65: 1302-1306. 2001.

CAMARGO, F.A. de O. et al. Incorporação de palha de arroz em um GLEISSOLO e efeitos no rendimento da cultura do arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.7, p.983-987, 1995.

CAMARGO, F.A. de O. et al. Aspectos fisiológicos e caracterização da toxidez de ácidos orgânicos voláteis em plantas. **Ciência Rural**, vol.31 no.3. Santa Maria, RS. p.521-527. 2001.

CANTARELA, H. Nitrogênio. **In**: NOVAIS. R.F. (eds). Fertilidade do Solo. Viçosa: SBCS, 2007. p.375-470.

CARMONA. L. C. de; PULVER, E.; CARMONA, F. C. de. Fertilização antecipada como estratégia para altas produtividades. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 4. 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2005. p. 413-415.

CASTILHOS, R.M.V. e MEURER, E.J. Formas de potássio em solos do RS, cultivados com arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO 1. REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23. 1999. Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.326 - 328.

CASSMANN, K.G. et al. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: contributions from indigenous and applied nitrogen. **Field Crops Research,** n. 47, 1996.

CHANG, S.C. Evaluation of the fertility of rice soils. In: **Soils and Rice**. INTERNATIONAL RICE RESARCH INSTITUT. Los Baños. Philippines. 1978. p. 521-559.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; CANTARELLA, H. Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. In Sparks, editor: **Advances in Agronomy**, v.102, p.267-322, 2009.

CLAY, D.E.; MALZER, G.L.; ANDERSON, J.L. Ammonia volatilization from urea as influenced by soil temperature, soil water content, and nitrification and hydrolysis inhibitors. **Soil Science Society of America Journal**. 54:263-266, 1990.

CLÉMENT, A.; LADHA, J.K.; CHALIFOUR, F. Nitrogen Dynamics of Various Green Manure Species and the Relationship to Lowland Rice Production. **Agronomy Journal.** May, 1998, 90:149-154.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC – CQFS – RS/SC. **Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: SBCS – Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 394 p.

CONAMA – Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Publicada no Diário Oficial da União nº 53 de 18 de março de 2005. Seção 1.

COPENHAVER, L. M. et al. Infiltration an shor-term movement of nitrogen in a silt-loam soil typical of rice cultivation in Arkansas. **Discovery**, 7: 14-18, 2006.

COSTA, E.G.C. de. Características agronômicas da cultura principal e da soca de arroz irrigado. **Ciência agrotec**., Lavras, v.24 (Edição especial), p.15-24, dez. 2000.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Qualidade industrial e teores de nutrientes dos grãos de arroz de terras altas sob diferentes lâminas de água e níveis de adubação. **Acta Scientiarum Agronomy**. v.25, n.2, p.409-415. 2003.

DAVIDSON E.A.; MATSON P.A. & BROOS P.D. Nitrous oxide emission control and inorganic nitrogen dynamics in fertilized tropical agricultural soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 60, p.1145-1152, 1996

De DATTA, S.K. et al. Measuring Nitrogen Losses from Lowland Rice Using Bulk Aerodynamic and Nitrogen -15 Balance Methods. **Soil Science Society of American Journal.** 53: 1275-1281, 1989.

De DATTA, S.K. Nitrogen transformations in wetland rice ecosystems. **Fertilizer Research**, 42: 193-203, 1995.

De DATTA, S.K. et al. Direct Measurement of Ammonia and Denitrification Fluxes from Urea Applied to Rice. **Soil Science Society of American Journal.** 55: 543-548, 1991.

DENMEAD, O. T. Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of nitrogen in the field. In: **Gaseous loss of Nitrogen from Plant-soil Systems.** Eds. JR Freney and JR Simpson. pp. 133-157. W. Junk, Amsterdan. 1983.

DENMEAD, O. T.; J. R. Simpson, and J. R. Freney. A direct field measurement of ammonia emission after injection of anhydrous ammonia. **Soil Science Society of America Journal**. 41: 1001-1004. 1977

DICKMANN, K.H.; De DATTA, S. K.; OTTOW, J. C. G. Nitrogen uptake and recovery from urea and green manure in lowland rice measured by N^{15} and non-isotope techniques. **Plant and Soil** 148: 91-99. 1993.

DOBBIE, K.E.; SMITH K. A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N_2O emissions from an imperfectly drained gleysol. **European Journal of Soil Science**, v. 52,p.667-673. 2001.

DOBERMANN, A. Summary report on 1997 results of a project of the **International Rice Research Institute**, the Philippines, co-sponsored with IFA, IPI an PPI. 1998.

DOBERMANN, A. et al. Spatial and Temporal Variability of Ammonium in Flooded Rice Fields. **Soil Science Society of American Journal**. 58:1708-1717, 1994.

DOBERMANN, A. ; PAMPOLINO, M.F.; ADVIENTO, M.A.A. Resin Capsules for On-Sie Assessment of Soil Nutrient Supply in Lowland Rice Fields. **Soil Science Society of American Journal**. 61: 1202-1213, 1997.

DUARTE, F.M. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com aplicação de uréia em solo de várzea com diferentes níveis de umidade. **Ciência Rural**. Santa Maria, RS. v.37,n.3. p.705-711, 2007.

EAGLE, J.A. et al. Rice Yield and Nitrogen Utilization Efficiency under Alternative Straw Management Pratices. **Agronomy Journal**. 92: 1096-1103, 2000.

EAGLE, A.Y. et al. Nitrogen dynamics and fertilizer use efficiency in rice following straw incorporation and winter flooding. **Agronomy Journal**, v.93, n.6, p. 1346-1354, November-December 2001.

ENOCHS, A.J. et al. Nitrogen Content in Floodwater of Drill-seeded Delayed Flood Rice Following Urea Fertilization. Arkansas Agricultural Experiment Station. **Research Series, 571.** Fayetetville, 2008.

EBERHARDT, D.S.; BACHA, R.E.; STUCKER, H. Níveis de nitrogênio e potássio para a adubação do arroz irrigado, sistema pré-germinado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21., 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995. p.180-83.

EBERHARDT, D. S. et al. Alternativas Tecnológicas para produção orgânica de arroz irrigado no sistema pré-germinado In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DO ARROZ, 1; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DO ARROZ; RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 650-653.

EPAGRI. **A cultura do arroz irrigado pré-germinado**. Florianópolis, 2002. 273p. il.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages, 2008. 230p. il.

ERNANI, P. R. Disponibilidade de nitrogênio e adubação nitrogenada para a macieira. Paulo Roberto Ernani – Lages: 2002, 76 p.

ESPINAL, F.S.C. **Fontes de nitrogênio e épocas de aplicação de potássio em arroz irrigado**. 1997. 48 fl. il. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 1997.

FAGERIA, N.K.; SLATON, N.A.; BALIGAR, V.C. Nutrient Management for Improving Lowland Rice. Productivity and Sustainability. **Advances in Agronomy**, v.80. 2003. 152p.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. et al. Concentração adequada e estádio crítico para absorção de nitrogênio na cultura do arroz irrigado. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DO ARROZ, 1; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DO ARROZ; RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 530-533.

FILLERY, I. R. P.; DATTA, S. K. Ammonia volatilization from nitrogen sources applied to rice fields. I. Methodology, ammonia fluxes and nitrogen-15 loss. **Soil Science Society of America Journal**. 48: 80-86. 1986

FILLERY, I.R.P. ; SIMPSON, J.R. ; De DATTA, S.K. Influence of Field Environment and Fertilizer Management on Ammonia Loss from Flooded Rice. **Soil Science Society of America Journal** 48: 914-920. 1984.

FORTES, M. de A. Toxidez por ácido acético em plantas de arroz sob diferentes valores de pH e concentrações de cálcio em solução nutritiva. 2006. 71 f. il. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, RS. 2006.

FRENEY, J.R.; DENMEAD, O.T. Factors controlling ammonia and nitrous oxide emissions from flooded rice fields. **Ecological .bulletins**. 42: 188-194. April, 1992.

FRENEY, J.R. et al. The interdependence of ammonia volatilization and denitrification as nitrogen loss processes in flooded rice fields in the Philippines. **Biology and Fertility of Soils**. 9:31-36, 1990.

GAUDIN, R.; DUPUY, J. Ammoniacal Nutrition of Transplanted Rice Fertilized with Large Urea Granules. **Agronomy Journal**. 91: 33-36, 1999.

GEORGE, T. et al. Nitrate Dynamics during the Aerobic Soil Phase in Lowland Rice-Based Cropping Systems. **Soil Science Society of America Journal** 57: 1526-1532, 1993.

GOLDEN, B.R. et al. Recovery of nitrogen in fresh pelletized poultry litter by rice. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 70. p.1359-1369, 2006.

GRAUPE, F.A. Dinâmica de nitrogênio mineral após alagamento em solos de várzea do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 4. 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2005. p. 395-397.

GRIGGS, B.R. et al. Ammonia Volatilization and Nitrogen Uptake for Conventional and Conservation Tilled Dry-Seeded, Delayed-Flood Rice. **Soil Science Society of America Journal** 71: 745-751, 2007.

HAYASHI, K.; NISHIMURA, S.; YAGI, K. Ammonia volatilization from the surface of a Japanes paddy field during rice cultivation. **Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition.** 52, 545-555, 2006.

GROHS, M. et al. Influência de inibidores de urease sobre volatilização de amônia em sistemas de cultivo de arroz irrigado In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 6. 2009, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. p. 195-198.

HASEGAWA, T.; KORODA, Y.; SELIGMAN, N.G.; HORIE, ST. Response of Spikelet Number to Plant Nitrogen Concentration and Dry Weight in Paddy Rice. **Agronomy Journal**, 1994, 86: 673-676.

HOLZSCHUH, M. J. et al. Resposta do arroz irrigado ao suprimento de amônio e nitrato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 33: 1323-1331, 2009.

HONGPRAYOON, C. et al. Urea Transformations in Flooded Soil Columns: I. Experimental Results. **Soil Science Society of American Journal**, 55:1130-1134, 1991.

KAI, H.; WADA, K. Chemical and biological immobilization of nitrogen in paddy soils. In: **Nitrogen and Rice**. p.157-174. Los Baños, Philippines: IRRI. 1979.

KAPOOR, V. et al. Rice growth, grain yield, and floodwater dynamics as affected by nutrient placement and rate. **Agronomy Journal**. 100: 526-536, 2008.

KEENEY, D.R. and SAHRAWAT, K.L. Nitrogen Transformation in flooded rice soils. **Fertilizer Research** 9: 15-38, 1986.

KHERA, T.S.; AULAKH, M.S.; DORAN, J.W. Significance of soil depth on nitrogen transformations in flooded and nonflooded systems under laboratory conditions. www. scopus. com/record/display.url?eid=origin=resultlist&sort (04/06/2010)

KIHEL, J.C. Distribuição e retenção de amônia no solo após a aplicação de uréia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.75-80, 1989.

KIRK, G.J.D. Plant-mediated processes to acquire nutrientes: Nitrogen uptake by rice plants. **Plant and Soil. 232**: 129-134, 2001.

KIRK, G.J.D.; KRONZUCKER, H.J. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants: A modelling study. **Annals of Botany.** 96: 639-646, 2005.

KIRK, G.J.D. Plant-mediated processes to acquire nutrients: Nitrogen uptake by rice plants. **Plant and Soil. 232**: 129-134, 2001.

KNOBLAUCH, R.; SCHIOCCHET, M.A. Componentes do rendimento e produtividade do arroz irrigado, em sistema pré-germinado, em duas regiões de santa catarina.In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 24. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 2. 2001, Porto Alegre, RS. **Anais**... Porto Alegre: SOSBAI, 2001. p.130-133.

KNOBLAUCH, R.; EBERHARDT, D.S. Cama de aviário na fertilização do arroz irrigado em sistema pré-germinado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 25.

CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 3. 2003, Balneário Camboriú, SC. **Anais...** Balneário Camboriú: EPAGRI, 2003. p. 300-302.

KNOBLAUCH, R.; BACHA R. E. Efeito do fertilizante "Entec 26" na produtividade e nos componentes do rendimento do arroz irrigado em sistema pré-germinado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 4. 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2005. p. 398-399.

KNOBLAUCH, R. BACHA R. E. STUKER, H. Níveis de nitrogênio e potássio para a adubação do do arroz irrigado em sistema pré-germinado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 4. 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2005. p. 447-451.

KNOBLAUCH, R.; STUKER, H. Eficiência da uréia em função da forma de aplicação no cultivo do arroz irrigado em sistema pré-germinado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 5. 2007, Pelotas, RS. **Anais...** Pelotas: SOSBAI, 2007. p. 501-503.

KNOBLAUCH, R.; STUKER, H. Estimativa do estado nutricional do arroz irrigado pré-germinado, através da análise foliar.In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 5. 2007, Pelotas, RS. **Anais...** Pelotas: SOSBAI, 2007. p. 597-599.

KNOBLAUCH, R. et al. Doses de nitrogênio e potássio para adubação do arroz irrigado em sistema pré-germinado. In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 6. 2009, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. p. 187-190.

KNOBLAUCH, R. et al. Teores de nitrogênio e potássio nas folhas do arroz irrigado cultivado em sistema pré-germinado e suas relações com a produtividade de grãos. In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 6. 2009, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. (CD Room).

KOLOTA, E.; SOWINSKA-ADAMCZEWSKA, K. Efficiency of ENTEC 26 – a new concept nitrogen fertilizer in white head cabbage production. **Vegetable Crops Research Bulletin**, 69. p.74-80, 2008.

LETEY, J. et al. Nitrous Oxide Production and Reduction during Denitrification as Affected by Redox Potential. **Soil Science Society of American Journal**, 45: 727-730, 1981.

LINDSAY, M. C. et al. Infiltration and short-term movemento of nitrogen in a silt-loam soil typical of rice cultivation in Arkansas. **Discovery, v. 7**, 2006.

LINDAU, C.W. et al. Effect of redox potential on urea hydrolysis and nitrification in soil suspensions. **Soil Science**. v.148, n.3. p.184-190. 1989.

LINDAU, C.W. et al. Fertilizer Effects on Dinitrogen, Nitrous Oxide and Methane Emissions from Lowland Rice. **Soil Science Society of American Journal**, 54: 1789-1794. 1990.

LINDAU, C. W. Effect urea fertilizer and environmental factors on CH_4 emissions from a Louisiana, USA rice fields. **Plant and Soil**, 136: 195-203. 1991.

LINQUIST, B.A.; BROUDER, S.M.; HILL, J.E. Winter Straw and water Management Effects on Soil Nitrogen Dynamics in California Rice Systems. **Agronomy Journal**. 98: 1050-1059, 2006.

LINQUIST, B. A. et al. Assessing the Necessity of Surface-Applied Preplant Nitrogen Fertilizer in Rice Systems. **Agronomy Journal**. 101: 906-915, 2009.

LIWANG, Ma. L. et al. Modeling urea, ammonium and nitrate transport and transformations in flooded soil columns. **Soil Science Society of America Journal**. 164, 2: 123-132. 1999.

LOPES, S.I.G.; LOPES M.S.; MACEDO, V.R.M. Curva de resposta à aplicação de nitrogênio para a cultivar IRGA 416 e três linhagens. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21., 1995, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995. p.167-168

LOPES, A.S. Produção e demanda de fertilizantes nitrogenados e sulfatados: tendências e desafios. In: Informações Agronômicas. **POTAFOS**: 114. 2006. (Encarte do Informações Agronômicas) p.1-2.

MACHADO, S. L. de O. et al. Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial do arroz irrigado. **Ciência Rural**, v.36, n.1, p.65-71, Santa Maria, RS. 2006.

MACHADO, M.O.; FRANCO, J.C.B. Parcelamento da adubação potássica em arroz pré-germinado, no solo Pelotas (Planossolo) In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21. 1995, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995. p. 177-180.

MADRUGA, E.F. **Efeito da aplicação de material vegetal e nitrato sobre a redução do solo**. 1999. 45 f. il. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 1999.

MARCHEZAN, E. et al. Manejo dos fertilizantes fosfatados e potássicos em arroz irrigado no sistema pré-germinado. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php

MENGEL. K,; SCHON, H.G.; KEETHISINGHE, G.; De DATTA, S.K. Ammonium dynamics of puddled soils in relation to growth and yield of lowland rice. **Fertilizer Research** 9: 117-130. 1986.

MATTOS, M.L.T. **Carbono e nitrogênio da biomassa e atividade microbiana em um solo cultivado com arroz irrigado orgânico e manejado com diferentes adubos verdes. Pelotas**: Embrapa Clima Temperado, 2004. p.9-18. (Documentos, 16).

MIKKELSEN, D.S. Nitrogen budgets in flooded soils used for ric production. **Plant Soil** 100: p.71-77.

MOREL, D. Culturas de inverno para rotação com arroz irrigado. Florianópolis: EMPASC, 1983. 3p. (EMPASC. Pesquisa em andamento, 4).

NASTRI, A; TODERI, G.; BERNATI, E.; GOVI, G. Ammonia volatilization and yield response from urea applied to wheat with urease (NBPT) and nitrification (DCD) inhibitors, **Agrochimica**, 44:231-239, 2000.

NEUE, H.U. et al. Carbon in tropical wetlands. **Geodema 79**: 163-185, 1997.

NOLDIN, J.A. et al. Qualidade da semente de arroz irrigado utilizada em Santa Catarina. In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 6. 2009, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. p. 435-438.

NORMAN, R. J. Seasonal accumulation and Partitioning of Nitrogen-15 in Rice. **Soil Science Society of America Journal.** 56: 1521-1527. 1992.

NTAMATUNGIRO, S. Comparison of Plant Measurements for Estimating Nitrogen Accumulation and Grain Yield by Flooded Rice. **Agronomy Journal**. 91: 676-685. 1999.

PATRICK, W.H. Jr. & REDDY, C.N. Chemical changes in rice soils. In: **Soils and Rice**. INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, Los Baños, Laguna, Philippines. 1978. p. 361-379.

PATRICK, W.H. Jr.; REDDY, K.R. Nitrification-Denitrification Reactions in Flooded Soils and Water Bottoms: Dependence on Oxygen Supply and Ammonium Diffusion. **Journal Envinronment Quality**. v.5. n.4. 1976. 469-472.

PATRICK, W.H. Jr.; DELAUNE, R.D. Characterization of the Oxidized and Reduced Zones in Flooded Soils. **Soil Science Society of America Journal.** 1972, 36: 573-576.

OLIVEIRA, O. de. et al. Efeito do polimento sobre parâmetros nutricionais de textura e sensoriais em grãos de arroz. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 5. 2007, Pelotas, RS. **Anais...** Pelotas: SOSBAI, 2007. p. 572-575.

PEREIRA, S.F.P. et al. Nitrato em água: uma contribuição para a eutrofização no reservatório de Tucuruí. Disponível em http://www.abq.org.br/cbq/2007/trabalhos.

POCOJESKI, E. **Estimativa do estado nutricional de arroz irrigado por alagamento**. 2007, 95 f. il. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em ciência do solo. Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2007.

PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Adv. Agronomy**, 24: 29-96, 1972.

PONNAMPERUMA, F.N. Physicochemical properties of submerged soils in relation to fertility. Manilla: International Rice research Institute, 1977, 32p. (IRRI research Papers Series, 5).

PONNAMPERUMA, F.N. Straw as a source of nutrients for wetland rice: International Rice Research Institute. **Organic matter and rice**. Los Bãnos, 1984. p.118-136.

POWLSON, D.S., et al. When does nitrate become a risk for human ? **Journal of environmental quality**, v.37. p.291-295, march-april 2008.

RAO, D.N. and D.S. Mikkelsen. Effect of rice straw incorporation on rice plant growth and nutrition,. **Agronomy Journal**, 68: 752-755, 1976.

RADEL, R.J. et al. Tiophosphoryl triamide. A dual purpose urease/nitrification inhibitor. **Fertil. Res**. 31, 275-280, 1992.

REDDY, K.R. Mineralization of Nitrogen in Organic Soils. **Soil Science Society of America Journal** 46: 561-566, 1982.

REDDY, K.R.; PATRICK, J.R. Fate of Fertilizer Nitrogen in the Rice Root Zone. S**oil Science Society of America Journal.** 1986, 50: 649-651.

REDDY, K.R.; PATRICK Jr, W.H. Nitrogen Transformation and Loss in Flooded Soils and Sediments, In: **Critical Reviews in Environmental Control**. Vol. 13, 4: 273-309. 1984.

REDDY, K.R.; D ANGELO, E.; LINDAU, C.; PATRICK, Jr.W.H. Urea losses in flooded soils with established oxidized and reduced soil layers. **Biology and Fertility of soils.** 1990. 9: 283-287

REDDY, K.R. et al. Ammonium diffusion as a factor in nitrogen loss from flooded soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.40, n.4, p.528-533, 1976

REDDY, K.R. Nitrogen cycling in flooded-soil ecosystem planted to rice (Oriza sativa L). **Plant and Soil** 67, 209-220. 1982.

REITER, M.S. et al., Rice yield and nitrogen recovery from nitrogen-fortified poultry litter granular fertilizers. In: Nathan A. Slaton, (ed.). AAES, Division of Agriculture University of Arkansas System. Research Series 558. 2008. p.49-53. Disponível em: http://arkansasagnews.uark.edu/

RICORDI, V.G. et al. Otimização do uso do nitrogênio da uréia pela cultura do arroz irrigado. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16. 2007. Pelotas, RS.

RHODEN, A.C.; et al. Mineralização anaeróbica do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. Ciência Rural, Santa Maria, v.36, n.6, p.1780-1787, 2006.

ROBERTSON, G.P. GRACE, P.R. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potential. **Environment, Development and Sustainability**, v.6.p.51-63, 2004

ROBERTS, T. L. et al. Direct Steam Distillation as an Alternative to the Ilinois Soil Nitrogen Test. **Soil Science Society of America Journal.** 73:1268-1275. 2009.

RUSSEL, C.A. et al. Soil tests predict optimum fertilizer nitrogen rate for rice. **Field Crops Research**, 97. p.286-301, 2006.

SANGOI, L. et al. Volatilização de N-NH_3 em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33 n.4, p.687-692, jul-ago, 2003.

SANTOS, A. B. et al. Manejo do nitrogênio em arroz irrigado. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DO ARROZ, 1; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DO ARROZ; RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 565-568.

SARTORI, G.M.S et al. Manejo da adubação e seus efeitos na ocorrência de algas e na produtividade de arroz irrigado em áreas com residual de imidazolinonas. In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 6. 2009, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. p. 199-202.

SAVANT, N.K.; de DATTA, S.K. Movement an Distribution of Ammonium following Deep Placement of Urea in a Wetland Rice Soil. **Soil Science Society of America Journal.** 1980, 44: 559-565.

SCHMIDT, F. et al. Toxidez pelos ácidos propiônico e butírico em plântulas de arroz. **Ciência Rural**. vol.37, n.3, Santa Maria 2007. Disponível em: http//www.scielo.br/scielo.php

SCHIOCCHETT, M.A. et al. Competição regional de linhagens e cultivares de arroz irrigado em Santa Catarina, safra 2008/09. In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 6. 2009, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. p. 131-133.

SCHNIER, H.F. et al. Nitrogen-15 balance in transplanted and direct-seeded flooded rice as affected by different methods of urea application. **Biology and Fertility of Soils**, 10: 89-96. 1990.

SCIVITTARO, W.B. Inovações tecnológicas no manejo do nitrogênio para o arroz irrigado. (**Embrapa Clima Temperado, Documentos 170**). 27 p. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006.

SCIVITTARO, W.B. et al. Uso de indicadores do nível de nitrogênio na planta de arroz para a predição da necessidade de adubação nitrogenada na diferenciação da panícula. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 4. 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2005. p. 447-451.

SCIVITTARO, W.B. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia em cultivo de arroz irrigado. . In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26. CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 4. 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: SOSBAI, 2005. p. 477-480.

SEGANFREDO, M.A. O impacto ambiental na utilização da cama de aves como fertilizante do solo. Disponível em: file:///C:/users/owner/AppData/Local/Microsoft/Windows/Tempor... Acessado em 28 de setembro de 2010.

SERPA, M. da S. et al. Estratégias de manejo da palha de azevém para cultivo do arroz irrigado em sucessão. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DO ARROZ IRRIGADO. 2009, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: SOSBAI, 2009. p. 276-279.

SHEEHY, J.E. et al. Can Smarter nitrogen fertilizers be designed? Maching nitrogen supply to crop requirements at high yields using a simple model. **Field Crop Research**, 94. p.54-66, 2005.

SHEEHY, J.E. DIONORA, M.K.A. and MITCHEL, P.L. Critical nitrogen concentrations: Implications for high-yielding rice (*Oriza sativa*) cultivars in tropics. **Field Crop Research**, 39:31-41. 1998.

SKOPP, J. Oxygen Uptake and Transport in Soils: Analysis of the Air-water Interfacial Area. **Soil Science Society of America Journal.** 49: 1327-1331. 1985.

SINGH, U.; CASSMAN, K.G.; LADHA, J.K. BRONSON, K.F. Innovative nitrogen management stategies for lowland rice systems. In: Fragile Lives in Fragile Ecosystems. p. 229-254. **International Rice Research Institute**, Manila, Philippines. 1995.

SILVA, L. S da.; SOUZA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da Matéria Orgânica em Ambientes Alagados. In: **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais**. Gabriel Araújo Santos, ed. 2ª ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

SILVA, L.S. da. et al., Modelos matemáticos para a estimativa do potencial de mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo,** 32:1513-1520, 2008.

SILVA, L.S da. et al., Resposta a doses de nitrogênio e avaliação do estado nutricional do arroz irrigado. **R. Bras. Agrociência**, Pelotas, v. 13. n. 2, p.189-194. 2007.

SILVA, L. S da. et al. Alterações nos teores de nutrientes em dois solos alagados, com e sem plantas de arroz. **Ciência Rural**, v.33, n.3, p.487-490. 2003.

SILVA, L.S. da. & BOHNEN, H. Liberação de nutrientes durante a decomposição de palha de arroz com diferentes teores de silício. In: **FERTIBIO,** 2000. Santa Maria, RS. SBCS, SBM. 2000. p. 135-138.

SKIBA, U.; SMITH, K.A.; FOWLER, D. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil. **Soil biology & Biochemistry**, 25. 1527-1536. 1993.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. I Reunião Técnica Sul-Brasileira de Arroz – Porto Alegre: **SOSBAI**, 2010. 181 p. il.

SOUZA, A.I. de. Arroz: desempenho da produção vegetal. **Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2006/2007,** Florianópolis, pg.40-49, 2007.

SOUSA, R.O. et al. Efeito do ácido acético na absorção de potássio em arroz. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Botucatu: SBCS / UNESP, 2003.

SOUSA, R.O. de; BORTOLON, L. Crescimento radicular e da parte aérea do arroz (*Oryza sativa* L.) e absorção de nutrientes, em solução nutritiva com diferentes concentrações de ácido acético. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.8, n.3, p. 231-235. 2002.

SOUSA, R.O. de; CAMARGO, F.A. de O.; VAHL, L.C. Solos alagados. In: MEURER,E.J. (Ed.). **Fundamentos de Química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000. p.127-150.

TEDESCO, M.J.; GIANELO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; WOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, planta e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos. Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1995. 174P. (Boletim técnico, 5).

TEIRA-ESMATGES, M.R.; CLEEMPUT, O. Van; PORTA-CASANELLAS. Fluxes of Nitrous Oxide and Molecular Nitrogen from Irrigated Soils of Catalonia (Spain). **Journal Environment Quality**. May, 1998. 27: 687-697.

TRIPATHI, B.P.; LADHA, J.K.; TSIMSINA, J.; PASCUA, S.R. Nitrogen Dynamics and balance in Intensified Rainfed Lowland Rice-Based Cropping Systems. **Soil Science Society of America Journal.** 1997, 61: 812-821

THUY, N.H. et al. Nitrogen Supply in Rice-Based Cropping Systems as Affected by Crop Residue Management. **Soil Science Society of America Journal.** 72 (2): 514-523. 2008.

VAHL, L.C. Fertilidade de solos de várzea. In: GOMES, A. S.; PAULETO, E. A . (eds.) **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 119-162.

VAHL, L.C. Nutrição de plantas de arroz irrigado. In: **Produção de Arroz Irrigado**. Silmar Teichert Peske; Luis O. B. Schuch e Antônio C. S. A. Barros. Eds. Pelotas: Ed. Universitária, Universidade Federal de Pelotas, 2004.

VLEK, P.L.G.; STUMPE, J.; BYRNES, B.H. Urease activity and inhibition in flooded soil systems. **Fertilizer Research** 1: 101-202. 1980.

VLECK, P.L.G.; CRASWELL, E.T. Ammonia volatilization from flooded soils. **Fertilizer Research 2**: 227-245. 1981.

WATANABE, I. Anaerobic decomposition of organic matter in flooded ice, In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Organic matter and rice**. Los Bãnos, 1984. p.237-258.

WATANABE, T. et al. Measurement of ammonia volatilization from flooded paddy fields in Vietnam. **Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition**, 55. 793-799, 2009.

WATANABE, T. ; MITSUI, S. Denitrification loss of fertilizer nitrogen in paddy soils – its recognition and impact. **INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. Research Paper Series**, 37. 1979.

WELL, R.; MYROLD, D. A Proposed Method for Measuring Subsoil Denitrification In Situ. **Soil Science Society of America Journal** 66: 507-518. 2002.

WILSON, C.E. Jr.; WELLS, B.R.; NORMAN, R.J. Fertilizer nitrogen uptake by rice from urea-ammonium nitrate solution vs. granular urea. **Soil Science Society of America Journal** 58: 1825-1828. 1994.

YAN, X.; SHI, S.; DU, L.; XING, G. Pathways of N_2O emission from rice paddy soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32. p.437-440. 2000.

YING-HUA, D. et al. Mechanisms of Enhanced Rice Growth and Nitrogen Uptake by Nitrate. **Pedosphere**, 17 (6): 697-705, 2007.

XIONG-HUI, J. et al. Study of Dynamics of Floodwater Nitrogen and Regulation of its Runoff Loss in Paddy Field-Based Two-Cropping Rice with Urea and Controlled Release Nitrogen Fertilizer Application. Agricultural Science in China, 6 (2): 189-199, 2007.

ZERULLA. W. et al., 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) – A new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. **Biology and Fertility of Soils**. vol. 34, n.2. 2001. p. 79-83.