

Disponibilidade de nitrogênio para o arroz irrigado por inundação, pelo método de destilação a vapor direta

Gerson Laerson Drescher⁽¹⁾, Leandro Souza da Silva⁽¹⁾, Natalia Tobin Aita⁽¹⁾, Laila Garcia Marques⁽¹⁾, Alexssandro de Freitas de Moraes⁽¹⁾, Rafael Lago Busanello⁽¹⁾ e Marta Sandra Drescher⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima 1.000, Camobi, CEP 97105-900 Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: gersondrescher@gmail.com, leandrosoles@ufsm.br, natisa.aita@hotmail.com, lailagarciamarques@gmail.com, alexssandro_freitas@hotmail.com, rafabusanello@gmail.com ⁽²⁾Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Campus Regional IV, Rua Marechal Floriano Peixoto, nº 4.557, CEP 97800-000 São Luiz Gonzaga, RS, Brasil. E-mail: marta-drescher@uergs.edu.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade do método de destilação a vapor direta (DVD) em extrair a fração de nitrogênio do solo hidrolisável em meio alcalino, e em prever a disponibilidade de N em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado por inundação. Vinte e cinco amostras foram coletadas da camada de 0–20 cm do solo, com diferenças de textura e teor de matéria orgânica. A mineralização de N por incubação anaeróbica foi realizada em laboratório, e os teores foliares e o acúmulo de N pelas plantas de arroz irrigado foram obtidos em casa de vegetação, pela simulação de condições de alagamento em vasos. Estas variáveis correlacionaram-se ao N extraído pelo método DVD. Os teores de N do solo obtidos com o método, bem como o N disponibilizado após 28 dias de incubação anaeróbica e o N acumulado pelas plantas após 45 dias de cultivo, apresentaram valores elevados. A avaliação de uma fração mais lábil do N, pelo método DVD, melhora a estimativa da disponibilidade de N, em comparação a métodos que avaliam apenas o teor de matéria orgânica, indício de que o método DVD tem potencial para avaliar a disponibilidade de N em solos sob cultivo de arroz irrigado por inundação.

Termos para indexação: *Oryza sativa*, adubação nitrogenada, análise de solo, avaliação da fertilidade do solo, incubação anaeróbica, matéria orgânica do solo.

Nitrogen availability for flooded rice by the direct steam distillation method

Abstract – The objective of this work was to evaluate the ability of the direct steam distillation (DSD) method to extract alkaline hydrolyzable nitrogen fraction in the soil and to predict N availability in rice paddies. Twenty-five soil samples were collected at the 0–20-cm soil depth, with contrasting texture and contents of soil organic matter. The mineralization of N by anaerobic incubation was determined in a laboratory, and leaf-N content and N accumulation by rice plants were obtained in a greenhouse by simulating flooding conditions in pots. These variables correlated with N extracted by the DSD method. Soil-N contents obtained with the method, as well as available N after 28-day anaerobic incubation and N accumulated by rice plants after 45 days, showed high values. The evaluation of a more labile N fraction by the DSD method improves the estimation of N availability, in comparison to methods that only assess soil organic matter contents, which indicates that the DSD method has potential for evaluating N availability in rice paddies.

Index terms: *Oryza sativa*, nitrogen fertilization, soil analysis, soil fertility evaluation, anaerobic incubation, soil organic matter.

Introdução

O teor de matéria orgânica do solo (MOS) é o índice de referência para o manejo da adubação nitrogenada em muitas regiões do Brasil, inclusive no estado do Rio Grande do Sul (Camargo et al., 1997; Manual..., 2004). Assim, as tabelas de recomendação de doses de N são baseadas em classes de teores da MOS, a partir das quais se obtêm as faixas de interpretação de disponibilidade de N para as culturas.

Para o arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), no entanto, não há boa correlação entre rendimento relativo da cultura e os teores de MOS (Scivittaro & Machado, 2004), o que faz com que as doses de N recomendadas sejam muito próximas entre as diferentes classes de teores da MOS, para uma mesma expectativa de produtividade.

Em solos alagados, ocorrem alterações de ordem física, química e biológica que afetam a dinâmica da decomposição da MOS, bem como o ciclo do N, o que

dificulta a predição da dose de fertilizante nitrogenado a ser indicada para o cultivo do arroz irrigado. Nesse sentido, Rhoden et al. (2006a) relatam que, nesses solos, a associação da MOS com o N absorvido pelas plantas ou com o rendimento relativo do arroz irrigado deixa de existir, diferentemente do que ocorre em solos bem drenados.

Por isso, diversos estudos têm sido conduzidos para o desenvolvimento e avaliação de métodos de análise de solo com potencial de estimar a disponibilidade de N para a cultura do arroz irrigado. Entre estes, destacam-se: os métodos químicos, como as extrações ácidas, alcalinas e salinas, com diferentes intensidades de extração (Wilson Jr. et al., 1994; Anh & Olk, 2001, 2002); os métodos biológicos, como os de incubação aeróbica e anaeróbica (Li et al., 2003; Rhoden et al., 2006b; Villaseñor et al., 2015); e os métodos com avaliação de parâmetros da planta, para estimar a disponibilidade de N para a cultura (Silva et al., 2007, 2008; Pcojeski et al., 2012). No entanto, esses métodos não apresentam uma rotina de laboratórios padronizada ou não têm uma calibração de campo de acordo com o rendimento da cultura.

Roberts et al. (2010, 2011) desenvolveram um protocolo de recomendação de adubação nitrogenada para o arroz irrigado no Estado de Arkansas, nos Estados Unidos, em solos argilo-siltosos. O princípio desse protocolo, denominado Nitrogen Soil Test for Rice (N-STaR), é estimar a quantidade de N que o solo pode fornecer durante o período de crescimento da cultura por meio da hidrólise alcalina, em procedimento de destilação a vapor direta (DVD) (“direct steam distillation”, DSD). A partir desses resultados, podem-se ajustar as doses de N, para otimizar o uso do fertilizante na produção de arroz irrigado.

No entanto, para que um método analítico tenha sucesso e possa ser utilizado pelos laboratórios de análise de solo, alguns fatores precisam ser considerados, como a amostragem adequada do solo e a existência de correlação dos resultados analíticos com a absorção de nutrientes e a produtividade de grãos da cultura (Roberts et al., 2013). O método DVD avalia frações lábeis da MOS que estão mais disponíveis à mineralização microbiana e, portanto, mais associadas à disponibilidade de N para as plantas. Além disso, a rapidez das análises faz com que o método apresente bom potencial para uso na recomendação da adubação nitrogenada para a cultura do arroz irrigado. Entretanto,

os solos aptos ao cultivo de arroz irrigado no Sul do Brasil diferem daqueles usados no desenvolvimento do método, especialmente quanto à amplitude de variação do conteúdo de argila, que tem efeito sobre a proteção da MOS e a capacidade preditiva do método.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade do método de destilação a vapor direta (DVD) em extrair a fração de N do solo hidrolisável em meio alcalino, e em prever a disponibilidade de N em solos aptos ao cultivo de arroz irrigado por inundação.

Material e Métodos

Oriundas de áreas representativas do cultivo de arroz irrigado do Estado do Rio Grande do Sul (Tabela 1), as amostras foram coletadas de 25 solos, na camada de 0–20 cm de profundidade, conforme recomendação do Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2004), para a cultura

Tabela 1. Identificação, locais de coleta e informações dos solos, nas diferentes regiões de cultivo de arroz irrigado por inundação, no Estado do Rio Grande do Sul.

Id ⁽¹⁾	Local de coleta	Classificação	Cultivo anterior
1	Faxinal do Soturno	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
2	Rio Grande	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
3	Viamão	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
4	Paraíso do Sul	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
5	Pelotas	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
6	Cachoeira do Sul	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
7	Agudo	Planossolo Háplico eutrófico	Soja
8	São Vicente	Planossolo Háplico eutrófico	Soja
9	Uruguaiana	Neossolo Regolítico eutrófico	Arroz
10	Santana do Livramento	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
11	Dom Pedrito	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
12	Dom Pedrito	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
13	Alegrete	Planossolo Háplico eutrófico	Pastagem
14	Bagé	Gleissolo Háplico eutrófico	Arroz
15	Caçapava do Sul	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
16	Rio Pardo	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
17	Paraíso do Sul	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
18	Dom Pedrito	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
19	Agudo	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
20	Alegrete	Plintossolo Argilúvico eutrófico	Arroz
21	Agudo	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
22	Uruguaiana	Chernossolo Ebânico carbonático	Arroz
23	São Vicente	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz
24	Cachoeira do Sul	Gleissolo Háplico eutrófico	Arroz
25	Agudo	Planossolo Háplico eutrófico	Arroz

⁽¹⁾Organizados em ordem crescente do teor de argila.

do arroz irrigado. Em seguida, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de 2 mm de malha. Após o preparo das amostras, foram determinados o pH em água e os teores de MOS, P, K, Ca e Mg, conforme Tedesco et al. (1995). A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (Donagema et al., 2011). Para a determinação dos teores totais de C e de N, retirou-se uma subamostra de cada um dos solos previamente secos e peneirados, a qual foi finamente moída em gral de ágata, para posterior análise em analisador elementar Flash EA 1112 (Thermo Finnigan, Milão, Itália). O valor de C total foi convertido a teor de MOS [C total x 1,724 (fator de van Bemmelen)] e posteriormente relacionado aos valores obtidos pelo método de rotina, nos laboratórios de análise de solos (MOS-rotina), conforme o sistema de recomendação de N para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Manual..., 2004) (Tabela 2).

A quantidade de N extraída pelo método DVD foi obtida conforme Bushong et al. (2008) e Roberts et al. (2009). Para tanto, 1 g de solo foi transferido para um tubo de digestão, ao qual foram adicionados 10 mL de solução de NaOH a 10 mol L⁻¹. A destilação a vapor foi feita em destilador semimicro Kjeldahl, com 5 mL de solução de ácido bórico (H₃BO₃) e indicadores. A quantidade de N capturado na solução indicadora foi quantificada por titulação acidimétrica, em 35 mL do destilado. Cada amostra de solo foi analisada com quatro repetições.

Para estimar o potencial de mineralização de N nos solos, realizou-se a incubação anaeróbica das amostras, com uso de 5 g de solo, incubados em tubos de vidro com capacidade para 35 mL, aos quais se adicionaram 12,5 mL de água destilada, conforme Bundy & Meisinger (1994). Posteriormente, os tubos de vidro foram agitados manualmente, para eliminação

Tabela 2. Granulometria e características químicas dos solos coletados à profundidade de 0–20 cm, nas diferentes regiões produtoras de arroz irrigado por inundação, no Estado do Rio Grande do Sul⁽¹⁾.

Solo	Areia	Silte	Argila	----- (g kg ⁻¹) -----			pH	---- (mg dm ⁻³) ----		---- (cmol _c dm ⁻³) ----	
				N	C	MOS		P	K	Ca	Mg
1	742	157	100	0,6	6,0	10,3	4,7	6,8	32	2,9	0,8
2	679	215	106	0,9	7,9	13,6	6,8	23,8	100	4,2	1,2
3	830	51	119	0,9	8,3	14,3	6,5	39,4	92	2,0	0,7
4	680	199	121	0,8	9,3	16,1	4,9	4,5	56	2,8	0,7
5	410	459	132	1,0	10,5	18,1	6,5	21,8	96	2,6	1,2
6	664	201	135	0,7	5,3	9,2	4,9	10,1	56	2,6	0,9
7	728	131	141	0,5	4,8	8,3	4,9	9,3	88	6,3	2,1
8	619	233	148	0,9	7,4	12,7	6,5	16,2	72	8,0	1,2
9	129	688	183	1,2	9,3	16,1	6,0	3,0	64	6,7	1,7
10	699	118	184	1,1	13,6	23,4	4,6	3,7	64	1,9	0,4
11	458	354	189	1,2	14,3	24,7	5,4	7,6	72	5,7	2,1
12	184	625	191	1,0	11,2	19,3	5,3	4,5	92	4,8	1,7
13	583	203	214	1,2	11,8	20,3	5,6	3,0	28	9,8	3,6
14	473	309	219	0,8	8,4	14,6	6,0	7,6	152	21,7	4,4
15	216	563	221	1,3	14,9	25,6	5,4	3,7	80	4,8	2,0
16	313	466	221	1,4	14,3	24,6	4,8	3,0	92	3,3	1,2
17	409	368	223	1,2	12,5	21,5	4,7	3,7	80	4,4	1,5
18	151	625	225	1,2	13,3	22,9	4,9	3,7	160	5,4	2,2
19	468	307	225	0,6	5,8	9,9	5,6	10,9	100	11,9	4,3
20	559	197	244	1,5	16,2	27,9	6,1	3,7	44	17,3	5,2
21	365	383	252	1,1	10,8	18,6	5,5	8,4	96	8,3	3,2
22	470	264	266	1,7	15,3	26,3	6,0	6,0	84	21,2	7,2
23	454	223	322	1,8	17,3	29,8	5,3	10,9	92	5,8	0,8
24	283	381	336	1,4	13,4	23,1	4,8	10,9	88	6,3	2,5
25	139	443	418	1,4	14,6	25,1	5,0	5,3	112	4,6	1,8

⁽¹⁾Teores de areia, silte e argila determinados pelo método da pipeta; C e N, foram determinados em analisador elementar; MOS, matéria orgânica do solo estimada pelo teor de carbono total em analisador elementar; P e K determinados com Mehlich-1; Ca e Mg determinados com solução de KCl 1 mol L⁻¹.

de bolhas de ar, cobertos com filme de plástico, para evitar trocas gasosas com o ambiente externo, e mantidos a 40°C em incubadora do tipo DBO (demanda bioquímica de oxigênio). O ensaio foi conduzido com quatro repetições por amostra.

No ensaio de incubação anaeróbica, o N mineral obtido pela análise prévia dos solos, com a solução de KCl a 2 mol L⁻¹ usada como extrator, foi considerado como resultado referente ao tempo zero (antes da incubação). As demais avaliações do teor de N foram realizadas a cada sete dias, durante quatro semanas e aos 42 e 77 dias após a instalação do experimento. Para a determinação do N mineral, a amostra (solo e água) contida nos tubos de vidro foi colocada em um frasco snap-cap, ao qual foram adicionados 12,5 mL de solução de KCl 4 mol L⁻¹, tendo-se agitado a amostra por uma hora em agitador horizontal, conforme Bundy & Meisinger (1994). Após a agitação, os frascos foram deixados para decantar por 30 min. Posteriormente, retirou-se uma alíquota de 10 mL, que foi filtrada em papel com porosidade de 2 µm, para posterior determinação do teor de N mineral (N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻) no aparelho Skalar SAN⁺⁺.

Para quantificar o N disponível, realizou-se um experimento em casa de vegetação, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, tendo-se empregado vasos com capacidade de 3 L, aos quais foram transferidos 3 kg dos solos amostrados. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com 25 tratamentos (solos) e quatro repetições.

Inicialmente, sementes de arroz da cultivar 'Puitá Inta CL' foram postas para pré-germinar. Em seguida, realizou-se o transplante de 10 plântulas em cada vaso. Após o estabelecimento, mantiveram-se sete plantas por vaso, tendo-se selecionado as mais desenvolvidas. Dois dias após o transplante, aplicou-se uma lâmina d'água de aproximadamente 1 cm, para emular o sistema pré-germinado, de modo que a mineralização da MOS ocorresse de forma anaeróbica, como no experimento de incubação. Posteriormente, após o desenvolvimento das plantas, aumentou-se a lâmina d'água para 6 cm.

Após 45 dias de cultivo, a parte aérea das plantas foi coletada e seca em estufa a 65°C, até a obtenção de massa constante. O material seco foi pesado para determinação da produção de matéria seca por vaso e, posteriormente, foi moído para determinação do teor de N total no tecido vegetal, em analisador elementar

Flash EA 1112. O nitrogênio acumulado pelas plantas foi obtido a partir do teor de N nas plantas e da produção de matéria seca, em cada um dos tratamentos. Os dados de N acumulado (mg) foram transformados (mg de N kg⁻¹ de solo; cada vaso continha 3,0 kg de solo), para comparação com os resultados de N mineralizado no experimento de incubação.

Para a análise de correlação, utilizaram-se os valores de N disponível aos 28 dias de incubação, pelo fato de esta avaliação ter apresentado o melhor coeficiente de correlação (r) com o N acumulado e com a produção de matéria seca da parte aérea das plantas. Para o teor de N na incubação (N inicial + N mineralizado após 28 dias de incubação anaeróbica) e para o conteúdo de N absorvido pelas plantas, ajustaram-se os modelos de regressão com as seguintes variáveis: quantidade de N obtida pelo método DVD; teor de MOS determinado segundo Tedesco et al. (1995) (índice MOS-rotina); teor de MOS-autoanalisador (teor de C total medido em analisador elementar x 1,724); e teor de N total determinado por analisador elementar. As relações entre estas variáveis foram comparadas pelo coeficiente de correlação (r) linear de Pearson, e a significância dos coeficientes foi avaliada pelo teste t de Student.

Resultados e Discussão

A quantidade de N disponível, após 28 dias de incubação anaeróbica, variou de 63 a 132 mg kg⁻¹ (Tabela 3 e Figura 1), o que evidencia grande diferença quanto ao potencial de disponibilizar N entre os solos do Rio Grande Sul avaliados. Essa amplitude de valores está relacionada à grande variabilidade de características intrínsecas dos solos utilizados, que apresentaram ampla variação de teores de MOS, N total e argila (Tabela 2). Observou-se, também, grande variação da produção de massa de matéria seca pelas plantas de arroz, que foi de 6,1 a 16,8 g por vaso, e da quantidade de N acumulado na parte aérea – 19 a 71 mg kg⁻¹ de solo –, após 45 dias de cultivo (Tabela 3).

Em condições naturais, a argila confere proteção e estabilidade à matéria orgânica, por meio da proteção física por oclusão em agregados de solo, e pela estabilidade química conferida à MOS, decorrente de sua interação com a fase mineral do solo (Chenu & Plante, 2006; Plaza, et al., 2013). Estes processos influenciam a disponibilidade da MOS à degradação

microbiológica e enzimática, permitindo maior acúmulo de N e MOS nos solos. No entanto, em razão do preparo prévio das amostras, que foram secas, moídas e peneiradas antes das análises, a MOS foi parcialmente exposta, o que a tornou mais suscetível ao ataque microbiano e, conseqüentemente, aumentou artificialmente a disponibilidade de N às plantas. Assim, o processo de preparo da amostra, aliado aos teores totais de N e MOS e à sua recalitrância, definiu os diferentes teores de N disponibilizados nos experimentos.

Entre os períodos de incubação testados, as quantidades de N disponibilizadas após 28 dias de incubação anaeróbica estiveram estreitamente relacionadas à produção de matéria seca e ao acúmulo de N na parte aérea das plantas de arroz após 45 dias de cultivo (Figura 1, Tabela 3). A elevada correlação obtida revela que a incubação anaeróbica utilizada consiste de

método confiável para avaliação da disponibilidade de N às plantas, conforme já verificado por Rhoden et al. (2006b).

Os índices de disponibilidade de N avaliados (MOS-rotina, MOS-autoanalisador, N total e N extraído pelo DVD) estiveram diferentemente correlacionados aos resultados da incubação anaeróbica e às quantidades de N acumulado pelas plantas (Figura 2). O teor de MOS-rotina apresentou baixa correlação ($r=0,51$) com a quantidade de N disponível na incubação anaeróbica, bem como com as quantidades de N acumulado ($r=0,45$). As maiores quantidades de N no experimento de incubação e as maiores quantidades de N acumulado pelas plantas ocorreram nos solos com 15 a 25 g kg⁻¹ de MOS-rotina que, segundo a classificação de Boeni et al. (2010), apresentam baixos teores de MOS (≤ 25 g kg⁻¹ de MOS). Esses solos, no entanto, apresentaram elevada

Tabela 3. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre o teor de N disponível, após o período de incubação anaeróbica de 0 a 77 dias, e a quantidade de N acumulado e produção de matéria seca (MS) na parte aérea de plantas de arroz.

Solo	Teor de N disponível (mg kg ⁻¹ de solo)								N acumulado (mg kg ⁻¹ de solo)	MS (g por vaso)
	0	7	14	21	28	42	56	77		
1	20,4	55,7	55,7	83,0	98,5	96,1	98,5	100,9	29,2	7,0
2	50,6	45,7	45,0	66,9	85,4	83,9	91,5	99,1	21,3	6,1
3	28,0	46,6	40,3	70,0	89,0	82,1	93,2	104,4	24,8	7,7
4	20,8	61,8	59,2	88,2	103,9	96,2	101,6	107,0	28,5	7,9
5	26,3	49,2	57,4	68,7	93,0	97,8	101,5	105,2	32,1	8,4
6	18,2	20,9	27,7	56,7	63,1	73,3	79,3	85,2	22,7	7,1
7	23,7	42,8	44,4	70,1	88,3	87,2	91,9	96,5	25,7	8,6
8	11,2	52,9	41,3	71,0	88,0	83,2	89,3	95,4	23,7	7,4
9	22,5	58,8	71,9	91,2	105,3	100,1	105,1	110,0	43,6	11,7
10	29,7	72,9	83,1	106,7	120,9	109,4	117,2	125,0	67,2	14,5
11	21,6	64,3	75,5	97,1	111,3	106,0	112,0	117,9	40,6	10,8
12	22,0	71,4	73,1	94,4	112,4	104,6	109,2	113,7	40,6	10,7
13	29,2	38,6	65,4	90,3	107,4	100,4	112,1	123,9	36,9	10,1
14	21,7	64,0	65,4	80,6	99,7	96,2	106,5	116,9	27,7	8,0
15	25,1	76,3	78,8	102,9	119,3	107,4	111,1	114,9	50,7	13,0
16	42,0	83,1	83,9	112,8	132,5	121,5	130,4	139,2	67,4	16,3
17	31,3	85,4	85,4	114,5	128,2	117,9	124,2	130,5	70,8	13,7
18	20,8	74,3	76,5	101,8	119,4	109,0	121,8	134,6	58,6	15,3
19	18,9	32,5	34,9	58,6	77,7	83,7	84,0	84,2	19,3	6,3
20	24,5	70,2	78,7	103,1	116,3	111,4	119,7	128,0	40,7	10,1
21	27,5	42,5	54,8	83,5	77,3	64,3	65,6	66,9	28,9	8,7
22	28,0	66,8	76,2	107,0	121,3	111,9	121,2	130,5	41,1	11,0
23	34,7	61,4	52,8	85,7	108,2	100,5	112,2	123,9	61,4	16,8
24	26,4	72,6	74,7	107,4	123,9	117,3	130,9	144,5	63,7	14,3
25	29,6	35,6	50,3	75,8	100,4	101,2	110,4	119,5	29,7	9,3
r N acumulado	0,30 ^{ns}	0,79*	0,79*	0,85*	0,85*	0,79*	0,79*	0,77*	-	-
r MS	0,29 ^{ns}	0,72*	0,71*	0,78*	0,80*	0,73*	0,75*	0,75*	-	-

^{ns}Não significativo. *Significativo a 0,1% de probabilidade.

amplitude nos valores das variáveis avaliadas (88 a 132 mg kg⁻¹, para o N incubação, e 24 a 71 mg kg⁻¹ para o N acumulado). Essa elevada amplitude, observada em solos de uma mesma classe de MOS, reforça as limitações do atual método de rotina para a estimativa da disponibilidade de N e justifica a baixa eficácia do atual sistema de recomendação de N para arroz irrigado.

O índice MOS-autoanalisador apresentou maior coeficiente de correlação com as quantidades de N após 28 dias de incubação ($r=0,75$). No entanto, observou-se maior dispersão dos valores de N acumulado, nos pontos com índice acima de 20 g kg⁻¹. Para esses pontos, o N acumulado variou de 30 a 71 mg kg⁻¹, o que resultou em um menor coeficiente de correlação ($r=0,70$) do que o observado para o N proveniente da incubação (Figura 2). No entanto, mesmo com essa redução, as correlações foram bem superiores às observadas com o índice MOS-rotina. Portanto, o uso de uma técnica mais precisa de determinação do teor de C nos solos pode melhorar expressivamente a avaliação da disponibilidade de N às plantas de arroz irrigado.

A limitação do índice MOS-rotina em estimar a disponibilidade de N para a cultura do arroz irrigado, observada no presente estudo, está de acordo com os resultados obtidos por Roberts et al. (2012) e Kader et al. (2013), que apontaram correlações insatisfatórias do C orgânico com o N mineralizável, com a produção de arroz e com a absorção de N pelas plantas. Roberts et al. (2012) afirmam que, apesar da existência de

relação intrínseca e indiscutível entre os teores de N total e C total, a relação entre essas variáveis e o potencial de mineralização em um determinado solo não está claramente definida. Além disso, a grande quantidade de fatores que influencia a mineralização do N orgânico nos solos limita ainda mais a avaliação da disponibilidade de N para as culturas por meio desse índice (Dahnke & Johnson, 1990).

O índice relativo ao N total teve comportamento similar ao da MOS-autoanalisador, tendo apresentado maior correlação com a quantidade de N disponível aos 28 dias de incubação ($r=0,66$) do que com a quantidade de N absorvida pelas plantas ($r=0,64$) (Figura 2). A maior dispersão dos valores de N acumulado, nos pontos com mais de 1,2 g kg⁻¹ de N total, foi responsável pela menor correlação para essa variável. No entanto, o N total também possibilitou melhores resultados do que a MOS-rotina, possivelmente pela maior precisão analítica do analisador elementar, em comparação à solução sulfocrômica e colorimetria utilizadas na determinação da MOS-rotina. Os resultados para este índice aproximaram-se dos obtidos por Rhoden et al. (2006a), após dois cultivos sucessivos de arroz irrigado.

Em geral, observou-se elevada dispersão em alguns solos, quanto aos teores de N proveniente da incubação e quanto às quantidades de N acumulado pelas plantas (Figura 2), com o uso dos índices MOS-rotina, MOS-autoanalisador e N total. Em contrapartida, o índice DVD apresentou distribuição mais uniforme, para ambas as variáveis, o que resultou nas maiores

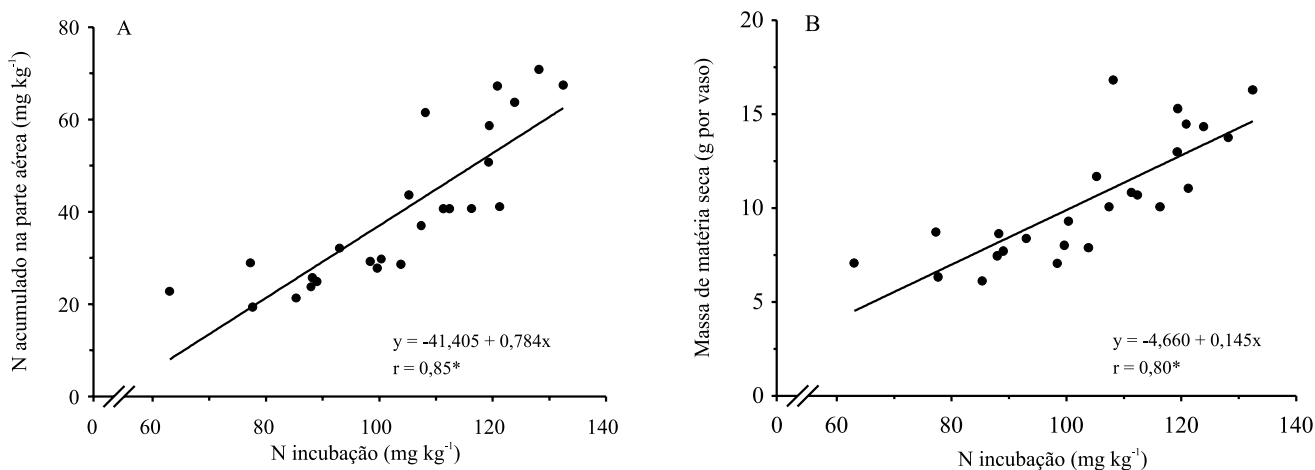


Figura 1. Correlação do teor de N disponível, após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação), com a quantidade de N acumulado na parte aérea (A) e com a massa de matéria seca (B) das plantas de arroz. *Significativo a 0,1% de probabilidade.

correlações observadas no trabalho ($r=0,78$ e $r=0,72$, respectivamente). É provável que a avaliação de uma fração mais lábil do N, pelo método DVD, seja a responsável pela melhor estimativa de disponibilidade de N nos solos avaliados, em comparação aos métodos que avaliam frações totais da MOS. As frações nitrogenadas extraídas pelo método DVD referem-se ao $N-NH_4^+$ + N alcalino hidrolisável, principalmente na forma de açúcares aminados, como a glucosamina, e de aminoácidos, como a glutamina (Roberts et al., 2009).

Stanford (1982), em trabalho clássico de avaliação da disponibilidade de N, afirma que o N total não é um índice confiável de disponibilidade de nitrogênio em muitos solos, o que, em certa medida, é confirmado pelos menores valores de correlação obtidos pelo presente trabalho, na comparação com os índices MOS-autoanalisador e DVD. Magdoff (1991) também verificou que o teor de N total (ou de variáveis relacionadas a este índice) não é adequado para prever a disponibilidade de N às plantas em diversas situações. Segundo Wang et al. (2001), esse índice

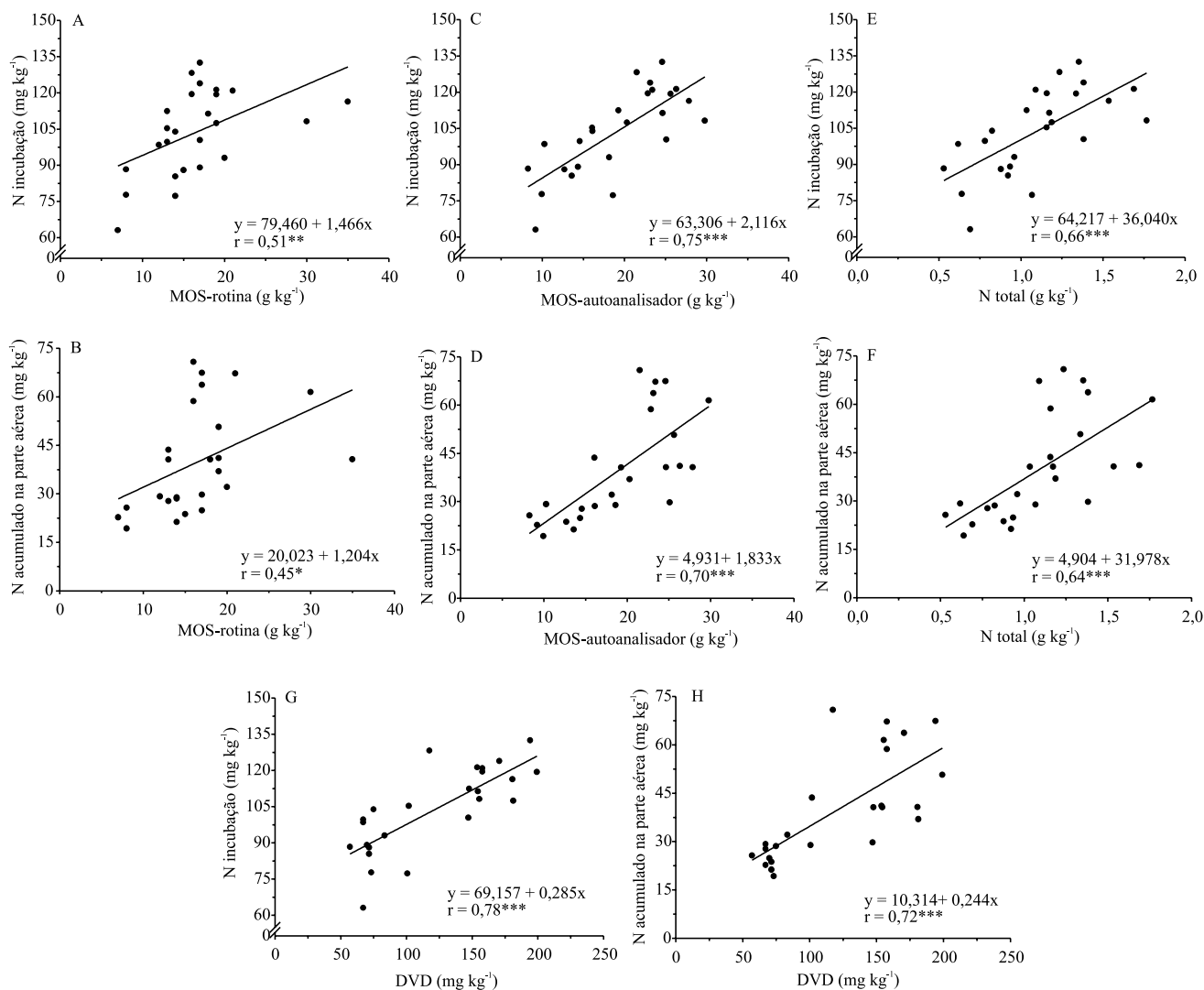


Figura 2. Correlação do teor de N disponível, após 28 dias de incubação anaeróbica (N incubação), com: os índices MOS-rotina (A); MOS-autoanalisador (C); N total (E); e N potencialmente mineralizável estimado pelo DVD (G); e correlação do N acumulado na parte aérea das plantas com: os índices MOS-rotina (B); MOS-autoanalisador (D); N total (F); e N potencialmente mineralizável estimado pelo DVD (H). *, ** e ***Significativo a 5, 1 e 0,5% de probabilidade, respectivamente.

está relacionado a um compartimento dezenas ou centenas de vezes maior do que o compartimento do N prontamente disponível às plantas, cuja disponibilidade, por sua vez, é regida por diversos fatores. Portanto, os autores consideram demasiadamente simples estimar a disponibilidade de N pela medida do conteúdo de N total nos solos.

Os resultados obtidos com o método DVD estão de acordo com os relatados por Sharifi et al. (2007), que observaram correlações significativas do índice com o N mineralizado após 24 semanas de incubação aeróbia ($R^2=0,61$, equivalente a $r=0,78$), em solos do Canadá e do Nordeste dos EUA; e por Bushong et al. (2008), que verificaram $R^2=0,58$ (equivalente a $r=0,76$) entre N mineralizado após 14 dias de incubação anaeróbia e o índice DVD, num total de 25 solos da principal região produtora de arroz do Estado do Arkansas nos EUA. Esses autores salientaram a possibilidade de se obter correlações ainda mais elevadas, se a calibração for realizada em solos com menor variação das propriedades físicas e químicas. Esse relato indica que pode ser interessante a aplicação do método DVD, em condições de rotina, para condições mais específicas de manejo do solo, área geográfica e rotação de culturas.

Roberts et al. (2011) também observaram elevada correlação entre o N estimado pelo DVD e as variáveis da planta, em solos do Estado do Arkansas. Segundo os autores, as correlações do índice DVD com o N total absorvido pelas plantas e com a produtividade da cultura foram de 0,68 ($R^2=0,46$) e de 0,85 ($R^2=0,73$), respectivamente. Além disso, os autores relataram também elevado coeficiente de determinação ($R^2=0,89$, equivalente a $r=0,94$) entre a dose de N necessária para o atingimento de 95% da produtividade máxima de grãos e o teor de N obtido pelo DVD. Esses resultados, aliados aos obtidos no presente trabalho, evidenciam que o N hidrolisável em meio alcalino, obtido com método DVD, pode ser correlacionado e, futuramente, calibrado para a recomendação da adubação nitrogenada da cultura do arroz irrigado, em solos do Rio Grande do Sul.

Conclusões

1. A baixa correlação obtida do índice MOS-rotina com o N proveniente da incubação anaeróbica e com o N acumulado pelas plantas de arroz mostra a inadequação do atual índice de disponibilidade de N

para a recomendação de adubação nitrogenada para a cultura do arroz irrigado por inundação.

2. A estimativa de nitrogênio mineralizável, obtida pelo método DVD, apresenta a melhor correlação com os teores de N proveniente da incubação e com o N acumulado pelas plantas de arroz e pode ser utilizada como indicador da disponibilidade de N, em solos representativos do cultivo do arroz irrigado por alagamento no Estado do Rio Grande do Sul.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao International Plant Nutrition Institute (IPNI-Brasil), por auxílio financeiro e bolsas de iniciação científica, mestrado e produtividade em pesquisa concedidas aos autores.

Referências

- ANH, T.T.N.; OLK, D.C. Prediction of crop nitrogen uptake and grain yield response by soil nitrogen availability tests for irrigated lowland rice and comparison to laboratory indices. **Omonrice**, v.9, p.46-54, 2001.
- ANH, T.T.N.; OLK, D.C. Prediction of crop nitrogen uptake and grain yield by soil nitrogen availability tests for irrigated lowland rice - Correlations between seasons for grain yield, plant nitrogen uptake, soil properties and soil availability indices. **Omonrice**, v.10, p.67-73, 2002.
- BOENI, M.; ANGHINONI, I.; GENRO JUNIOR, S.A.; OSÓRIO FILHO, B.D. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA, 2010. 40p. (Boletim técnico, 9).
- BUNDY, L.G.; MEISINGER, J.J. Nitrogen availability indices. In: WEAVER, R.W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. Part 2, p.951-984.
- BUSHONG, J.T.; ROBERTS, T.L.; ROSS, W.J.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON, C.E. Evaluation of distillation and diffusion techniques for estimating hydrolyzable amino sugar-nitrogen as a means of predicting nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p.992-999, 2008. DOI: 10.2136/sssaj2006.0401.
- CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.575-579, 1997. DOI: 10.1590/S0100-06831997000400007.

- CHENU, C.; PLANTE, A.F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex'. **European Journal of Soil Science**, v.57, p.596-607, 2006. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00834.x.
- DAHNIKE, W.C.; JOHNSON, G.V. Testing soils for available nitrogen. In: WESTERMAN, R.L. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. chapter 6, p.127-139. (Soil Science Society of America Book Series, 3).
- DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).
- KADER, M.A.; SLEUTEL, S.; BEGUM, S.A.; MOSLEHUDDIN, A.Z.M.; DE NEVE, S. Nitrogen mineralization in sub-tropical paddy soils in relation to soil mineralogy, management, pH, carbon, nitrogen and iron contents. **European Journal of Soil Science**, v.64, p.47-57, 2013. DOI: 10.1111/ejss.12005.
- LI, H.; HAN, Y.; CAI, Z. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu region of China under anaerobic conditions: dynamic and model fitting. **Geoderma**, v.115, p.161-175, 2003. DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00358-0.
- MAGDOFF, F.R. Field nitrogen dynamics: implications for assessing N availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.22, p.1507-1517, 1991. DOI: 10.1080/00103629109368511.
- MANUAL DE ADUBAÇÃO E DE CALAGEM PARA OS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.
- PLAZA, C.; COURTIER-MURIAS, D.; FERNÁNDEZ, J.M.; POLO, A.; SIMPSON, A.J. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: a central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. **Soil Biology and Biochemistry**, v.57, p.124-134, 2013. DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.07.026.
- POCOJESKI, E.; SILVA, L.S. da; BUNDT, A. da C.; MARCHESAN, E.; CAMARGO, E.R.; SCIVITTARO, W.B. Estimativa do teor de nitrogênio em arroz irrigado com o clorofilômetro e a cartela de cores. **Ciência Rural**, v.42, p.1982-1988, 2012. DOI: 10.1590/S0103-84782012005000087.
- RHODEN, A.C.; SILVA, L.S. da; BRITZKE, D.; RANNO, S.K. Relação entre características de solos de várzea e a absorção de nitrogênio pelo arroz irrigado em dois cultivos sucessivos em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.12, p.325-331, 2006a. DOI: 10.18539/CAST.V12I3.4629.
- RHODEN, A.C.; SILVA, L.S. da; CAMARGO, F.A. de O.; BRITZKE, D.; BENEDETTI, E.L. Mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.36, p.1780-1787, 2006b. DOI: 10.1590/S0103-84782006000600017.
- ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; ROSS, W.J.; SLATON, N.A.; WILSON, C.E. Soil depth coupled with soil nitrogen and carbon can improve fertilization of rice in Arkansas. **Soil Science Society of America Journal**, v.76, p.268-277, 2012. DOI: 10.2136/sssaj2011.0116.
- ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON JR., C.E.; ROSS, W.J. N-ST*R: a soil-based nitrogen test for fertilizer recommendations in Arkansas rice production. In: NORMAN, R.J.; MOLDENHAUER, K.A.K. (Ed.). **Wells Rice Research Studies 2009**. Fayetteville: Arkansas Agricultural Experiment Station, 2010. p.190-196. (Research Series 581).
- ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON, C.E.; ROSS, W.J.; BUSHONG, J.T. Direct steam distillation as an alternative to the Illinois Soil Nitrogen Test. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, p.1268-1275, 2009. DOI: 10.2136/sssaj2008.0165.
- ROBERTS, T.L.; NORMAN, R.J.; FULFORD, A.; SLATON, N. Assimilation of ¹⁵N labeled fertilizer injected at various depths by delayed-flood rice. **Soil Science Society of America Journal**, v.77, p.2039-2044, 2013. DOI: 10.2136/sssaj2013.02.0076.
- ROBERTS, T.L.; ROSS, W.J.; NORMAN, R.J.; SLATON, N.A.; WILSON JR., C.E. Predicting nitrogen fertilizer needs for rice in Arkansas using alkaline hydrolyzable-nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, v.75, p.1161-1171, 2011. DOI: 10.2136/sssaj2010.0145.
- SCIVITTARO, W.B.; MACHADO, M.O. Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.259-304.
- SHARIFI, M.; ZEBARTH, B.J.; BURTON, D.L.; GRANT, C.A.; COOPER, J.M. Evaluation of some indices of potentially mineralizable nitrogen in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.71, p.1233-1239, 2007. DOI: 10.2136/sssaj2006.0265.
- SILVA, L.S. da; BOHNEN, H.; MARCOLIN, E.; MACEDO, V.R.M.; POCOJESKI, E. Resposta a doses de nitrogênio e avaliação do estado nutricional do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.13, p.189-194, 2007.
- SILVA, L.S. da; POCOJESKI, E.; GRAUPE, F.A.; PIT, L.L.; BUNDT, A. da C.; GUTERRES, A.P. Leitura crítica do clorofilômetro para manejo da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.14, p.125-127, 2008.
- STANFORD, G. Assessment of soil nitrogen availability. In: STEVENSON, F.J. (Ed.) **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.651-688. (Agronomy, 22).
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174 p. (UFRGS. Boletim técnico, 5).
- VILLASEÑOR, D.; ZAGAL, E.; STOLPE, N.; HIRZEL, J. Relationship between mineralized nitrogen during anaerobic incubations and residual effect of nitrogen fertilization in two rice paddy soils in Chile. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.75, p.98-104, 2015. DOI: 10.4067/S0718-58392015000100014.

WANG, W.; SMITH, C.J.; CHALK, P.M.; CHEN, D. Evaluating chemical and physical indices of nitrogen mineralization capacity with an unequivocal reference. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.368-376, 2001. DOI: 10.2136/sssaj2001.652368x.

WILSON JR., C.E.; NORMAN, R.J.; WELLS, B.R. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils: I. Comparison to laboratory indices. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.25, p.573-590, 1994. DOI: 10.1080/00103629409369064.

Recebido em 25 de junho de 2015 e aprovado em 26 de janeiro de 2016