

A ADIÇÃO DE SUPERFOSFATO TRIPLO E A PERCOLAÇÃO DE NITROGÊNIO NO SOLO⁽¹⁾

Analu Mantovani⁽²⁾, Paulo Roberto Ernani⁽³⁾ & Luis Sangoi⁽³⁾

RESUMO

A percolação do N adicionado ao solo na forma amoniacal ou em formas que resultem em NH_4^+ depende parcialmente da nitrificação porque o NH_4^+ é adsorvido pelas cargas negativas do solo, enquanto o NO_3^- permanece na solução do solo. Como a diminuição do pH na zona de aplicação dos fertilizantes pode prejudicar a nitrificação, o presente trabalho objetivou avaliar o efeito da adição de fosfato acidificante junto com adubos nitrogenados na diminuição da percolação de N num solo ácido. O experimento foi realizado em colunas de lixiviação, em 2003, usando-se amostra de um Nitossolo Vermelho com 760 g kg^{-1} de argila, 40 g kg^{-1} de matéria orgânica e pH- H_2O 4,8. Uréia, sulfato de amônio e nitrato de Ca ($150 \text{ mg kg}^{-1} \text{ N}$), além de um tratamento sem N, foram combinados fatorialmente com 0 e $751 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$ na forma de superfosfato triplo (SFT). Efetuaram-se 19 percolações semanais com 300 mL de água destilada cada, totalizando o equivalente a 720 mm de chuva. A adição de SFT antecipou a percolação de NH_4^+ devido ao seu deslocamento das cargas negativas pelo Ca. A percolação de NO_3^- ocorreu nas primeiras adições de água onde foi aplicado N nítrico, independentemente do SFT. Para os demais fertilizantes, a mobilidade de NO_3^- só foi intensificada a partir da sétima percolação, porém foi antecipada pela adição de SFT, provavelmente devido à antecipação da nitrificação causada pelo deslocamento do NH_4^+ para a solução do solo. A adição de SFT dobrou a percolação de NO_3^- onde foi aplicada uréia, porém diminuiu em aproximadamente 20 % nos tratamentos com sulfato de amônio ou nitrato de Ca. Na ausência de SFT, 70 % do N aplicado pela uréia permaneceu no solo após as percolações, mas, na presença do fosfato, nada dele ficou no solo. A adição do SFT juntamente com os fertilizantes amoniacais ou amídicos aumenta e, ao invés de retardar, antecipa a percolação de N, possivelmente em consequência da adição de Ca.

Termos de indexação: desnitrificação, uréia, sulfato de amônio, nitrato de cálcio.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor apresentada no curso de mestrado em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Recebido para publicação em junho de 2005 e aprovado em junho de 2007.

⁽²⁾ Doutorando da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: a6am@cav.udesc.br

⁽³⁾ Professor da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Av. Luis de Camões 2090, Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Pesquisador do CNPq. E-mail: prernani@cav.udesc.br

SUMMARY: ADDITION OF TRIPLE SUPERPHOSPHATE ANTICIPATES NITROGEN LEACHING IN SOIL

Leaching of N added to soils as ammonium or as other forms that transform into it depends partially on nitrification because ammonium is retained by the soil negative charges, while nitrate remains completely in the soil solution. Since the decrease of the soil pH at fertilized sites can negatively affect nitrification, our study aimed to evaluate the effect of adding an acidifying phosphate together with nitrogen fertilizers on nitrogen leaching in an acid soil. The experiment was carried out in 2003, in an Alfisol with clay and organic matter contents of 760 and 40 g kg⁻¹, respectively and pH (H₂O) of 4.8. Treatments consisted of three nitrogen sources (urea, ammonium sulfate and calcium nitrate) at rates of 150 mg kg⁻¹ of N plus one control treatment without N in factorial combination with triple superphosphate (TSP) at a rate of 751 mg kg⁻¹. Treated experimental soil units were packed into PVC leaching columns and percolated with 300 mL of distilled water every seven days, during 19 weeks, totalizing an amount equivalent to 720 mm of rain. TSP addition anticipated ammonium leaching due to displacement of ammonium from the soil negative charges by added calcium. Nitrate leaching from the soil treated with calcium nitrate occurred in the first percolations regardless of TSP addition. In soils treated with the other two N fertilizers, nitrate leaching was intensified only after the seventh percolation, but it was anticipated to the fifth percolation by TSP addition due to earlier nitrification caused by displacement of exchangeable ammonium to the soil solution. TSP addition doubled nitrate leaching in the urea treated soil, while leaching decreased by about 20 % when TSP was mixed with ammonium sulfate or calcium nitrate. In the absence of TSP, 70 % of the N added via urea remained in the soil after the end of the percolations, but in the presence of TSP all applied N was lost. Overall, TSP combined with ammonium or amide-containing nitrogen fertilizers anticipates, rather than delay N leaching, possibly as a result of calcium addition.

Index terms: percolation, denitrification, nitrogen fertilizers, urea, ammonium sulfate, calcium nitrate.

INTRODUÇÃO

O N é o nutriente exigido em maior quantidade pela maioria das espécies vegetais, podendo ser absorvido como cátion (NH₄⁺) ou ânion (NO₃⁻). O N está sujeito a grande número de reações no solo, sendo difícil de ser manejado eficientemente. Como a nitrificação normalmente ocorre em poucos dias (Silva & Vale, 2000) e o nitrato não é adsorvido por complexos de superfície, a lixiviação é o fenômeno mais preocupante que ocorre com o N em solos com carga líquida negativa, pois implica grandes perdas do nutriente (Wang & Alva, 1996), principalmente em regiões com altas precipitações pluviométricas e em solos arenosos (Wang & Alva, 1996). A lixiviação consiste no transporte vertical de íons no perfil do solo para camadas profundas. Ela é influenciada pelo fluxo descendente de água (Drouineau, 1969), pela concentração iônica da solução do solo (Ernani & Barber, 1993) e pelas sucessivas reações de atração dos íons pelos componentes da fase sólida durante o processo de descida.

Em solos com carga líquida negativa, grande parte do amônio é adsorvida eletrostaticamente a essas cargas. A maioria dos ânions, mesmo possuindo o mesmo tipo de carga do solo, é adsorvida por complexos de esfera interna. O nitrato, entretanto, por ter o compor-

tamento de uma base fraca, tem pouca afinidade pelos centros eletrofilicos dos sítios de adsorção química, permanecendo, portanto, totalmente na solução do solo. A movimentação de nitrato para camadas profundas é indesejável, pois, além de não ser mais absorvido pelas plantas, pode contaminar as águas subterrâneas (Aulakh et al., 2000; Ottman & Pope, 2000). Como todos os fertilizantes nitrogenados minerais são completamente solúveis, as opções mais utilizadas para diminuir a lixiviação de nitrato no solo incluem o fracionamento da quantidade de N a ser aplicada (Errebhi et al., 1998; Basso & Ceretta, 2000), o uso de plantas com sistema radicular profundo (Menezes et al., 1997; Aulakh et al., 2000) e a inibição temporária da nitrificação. Em situações em que hajam cargas elétricas positivas, o nitrato é adsorvido eletrostaticamente a elas.

Os adubos nitrogenados existem em várias formas químicas e afetam em magnitudes variáveis o pH (Silva & Vale, 2000) e a concentração eletrolítica do solo ao redor de seus grânulos. O N integrante da uréia necessita de duas reações (hidrólise e nitrificação) até atingir a forma nítrica. Isso pode retardar a lixiviação de nitrato em relação aos fertilizantes nítricos, uma vez que essas reações não são imediatas e o amônio pode ficar temporariamente retido nas cargas negativas. Além disso, a dissolução da uréia

eleva o pH do solo nas primeiras semanas nas adjacências dos grânulos do fertilizante (Kiehl, 1989; Ernani et al., 2001), com reflexos no aumento das cargas negativas e, conseqüentemente, no aumento da adsorção de amônio. Tanto o pH do solo quanto o método de adição de uréia (superficial ou incorporada) afetam a quantidade de N lixiviada e o período de início do processo de lixiviação (Ernani et al., 2002). O sulfato de amônio, por outro lado, diminui o pH ao redor dos grânulos (Silva & Vale, 2000; Vitti et al., 2002), podendo, com isso, inibir a nitrificação (Strong et al., 1997; Silva & Vale, 2000) e manter parte do amônio temporariamente adsorvida.

Em valores baixos de pH, a nitrificação é retardada (Silva & Vale, 2000; Rosolem et al., 2003) e aumenta a chance de existência de cargas positivas do solo, que podem inibir ou retardar a lixiviação de nitrato do solo. A diminuição do pH do solo nas regiões fertilizadas pode ser obtida pelo uso de fertilizantes fosfatados acidificantes, como o superfosfato triplo (Figueiredo, 1985; Ernani et al., 2001), juntamente com os adubos nitrogenados. O presente trabalho objetivou avaliar a percolação de N num solo ácido em função da combinação de fertilizantes nitrogenados minerais com um fertilizante fosfatado de reação ácida.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages-SC, em 2003. Utilizou-se um Nitossolo Vermelho (NV), coletado em área com vegetação campestre nativa que tinha $\text{pH-H}_2\text{O} = 4,8$, $\text{Al}^{3+} = 30 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $\text{Ca} = 7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $\text{Mg} = 5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, P (Mehlich-1) = $1,8 \text{ mg dm}^{-3}$, K (Mehlich-1) = 58 mg dm^{-3} , 760 g kg^{-1} de argila e 40 g kg^{-1} de matéria orgânica.

Os tratamentos consistiram de um fatorial (4 x 2) envolvendo três fertilizantes nitrogenados (uréia, sulfato de amônio e nitrato de Ca), além de um tratamento sem N, combinados ou não com superfosfato triplo. As doses de N e de P foram de 150 e 751 mg kg^{-1} , totalizando 200 e 1.000 mg, respectivamente, por unidade experimental (1,33 kg de solo). As três repetições foram arranjas no delineamento experimental completamente casualizado.

As unidades experimentais foram constituídas por colunas de lixiviação, confeccionadas a partir de tubos de PVC, com 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Na base de cada coluna foi colocada uma tampa de PVC, na qual se fez um orifício na parte central, com aproximadamente 3 mm de diâmetro, a fim de permitir a saída da solução percolada. A metade inferior de cada coluna foi envolta com um saco plástico, ajustado na forma de funil, o qual continha um furo na extremidade inferior, para facilitar o direcionamento da solução percolada para os frascos de coleta.

Em cada coluna, acondicionou-se 1,33 kg de solo (base seca, 105°C), numa altura de 25 cm, perfazendo densidade de $0,70 \text{ g dm}^{-3}$ num volume de 1,9 L. O solo foi colocado na coluna de uma única vez, sem compactação, até o preenchimento do volume desejado. Após isso, a coluna foi suspensa até uma altura de 10 cm e solta verticalmente sobre um balcão de concreto, para o assentamento do solo dentro dela, procedimento que foi repetido mais duas vezes. Os 5 cm da parte superior de cada coluna não foram preenchidos com solo, para facilitar a adição de água por ocasião das percolações. Dos 25 cm ocupados com solo, os 5 cm superficiais, assim como os 15 cm da parte inferior, não receberam nenhum tratamento. Os fertilizantes nitrogenados e o fosfato foram aplicados em 20 % do volume total do solo de cada coluna, perfazendo uma espessura de 5 cm, a qual foi acondicionada entre as duas camadas não tratadas, com o objetivo de evitar perdas de N por volatilização.

Após o preenchimento com solo, as colunas foram acondicionadas em suportes longitudinais de madeira, cuja base inferior ficava 20 cm acima da superfície de apoio, a fim de permitir a colocação dos frascos de coleta embaixo delas. Uma semana depois, foram iniciadas as percolações, as quais foram repetidas a cada sete dias, durante 19 semanas. Em cada percolação, adicionaram-se 300 mL de água destilada sobre a superfície de cada coluna, na velocidade aproximada de 5 mL min^{-1} , por meio de uma bomba peristáltica, simulando uma precipitação pluviométrica semanal de 38 mm. A solução percolada foi coletada no dia seguinte, para determinação de volume, pH, condutividade elétrica e concentrações de NH_4^+ , NO_3^- , Ca, Mg e K. O pH e a condutividade elétrica foram determinados por meio de potenciometria e condutivimetria, respectivamente. O NH_4^+ e o NO_3^- , que inclui o NO_2^- , foram determinados por arraste de vapor, em aparelho semimicro Kjeldahl, conforme método proposto por Tedesco et al. (1995). O Ca e o Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, e o K, por espectrofotometria de emissão.

Ao término das percolações, todo o volume de solo de cada coluna foi homogeneizado e foram coletadas amostras para quantificação das quantidades de amônio e nitrato remanescentes. Essas formas foram extraídas do solo com KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e determinadas utilizando-se o procedimento descrito anteriormente.

Os valores totais de NH_4^+ , NO_3^- , Ca, Mg e K resultantes das 19 percolações foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). Quando foi atingido o nível de significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Recuperação do N adicionado

A quantidade de N recuperada variou com o fertilizante nitrogenado e com a presença ou não do

superfosfato triplo. Na ausência de SFT, o somatório do N percolado e do N remanescente no solo (N recuperado), após as 19 adições de água, foi semelhante à quantidade adicionada pela uréia (102 %) e pelo sulfato de amônio (93 %); contudo, para o nitrato de Ca foi de apenas 59 % do N aplicado (Quadro 1), provavelmente em razão da ocorrência de desnitrificação. Como as colunas de solo foram percoladas com água semanalmente, é provável ter havido períodos com insuficiente suprimento de O₂, que propiciaram a perda gasosa de N, sobretudo nos últimos centímetros da parte inferior da coluna. Na presença de SFT, a recuperação de N foi muito menor que na sua ausência, para todos os fertilizantes, cujos valores variaram de 35 a 64 % (Quadro 1), reforçando a hipótese de desnitrificação – nesse caso, favorecida pelo incremento da atividade microbiana decorrente da adição de P ao solo. Assim, parte do N nitrificado nos tratamentos que receberam uréia ou sulfato de amônio também sofreu o processo de desnitrificação. Além disso, o aumento no percentual de percolação de amônio relativamente ao de nitrato, decorrente da adição do fosfato, em todos os fertilizantes nitrogenados (Quadro 1), também evidencia a ocorrência de desnitrificação.

Na ausência de SFT, a quantidade percolada representou 32, 68 e 59 % do N aplicado respectivamente pela uréia, pelo sulfato de amônio e pelo nitrato de Ca, representando 32, 73 e 100 % do N recuperado, respectivamente. Na presença do fosfato, praticamente não existiu N mineral no solo ao término do experimento para nenhum dos fertilizantes nitrogenados, e, portanto, todo o N recuperado percolou das colunas (Quadro 1). Na ausência do fosfato, a percolação ocorreu predominantemente na forma nítrica, a qual representou 75, 68 e 94 % do N percolado, respectivamente nos tratamentos com uréia, sulfato de amônio e nitrato de Ca. Na presença do fertilizante fosfatado, houve diminuição na percolação de nitrato relativa-

mente ao amônio em todos os fertilizantes, provavelmente em razão do incremento na desnitrificação ocasionada pela adição de P, e o sulfato de amônio foi o único adubo nitrogenado que proporcionou maior perda de amônio do que de nitrato (Quadro 1).

Percolação de amônio

A percolação de amônio variou com os fertilizantes nitrogenados (Quadro 1 e Figura 1). Tanto na presença quanto na ausência de superfosfato triplo (SFT), as maiores perdas ocorreram no tratamento com sulfato de amônio, seguidas daquele que recebeu uréia, e só começaram após várias percolações com água destilada (Figura 2). No tratamento em que foi aplicado nitrato de Ca, apenas 6 % do N percolado ocorreu na forma de amônio (Quadro 1), em razão da inexistência da forma amoniacal neste fertilizante (Figura 1), totalizando aproximadamente 8 e 20 mg, respectivamente na ausência e na presença de SFT (Figuras 1 e 2). No tratamento em que não foi aplicado N, independentemente da presença ou não de SFT, a percolação de amônio também foi muito pequena no decorrer das 19 percolações (Figuras 1 e 2) e resultou da mineralização da matéria orgânica nativa do solo (Silva & Vale, 2000).

A adição de SFT junto com uréia ou com sulfato de amônio aumentou a percolação de amônio (Figuras 1 e 2). O aumento ocasionado pelo fosfato foi de aproximadamente três vezes no tratamento com uréia e de 1,6 vez naquele com sulfato e ocorreu em função do deslocamento do amônio das cargas negativas para a solução do solo pelo Ca do SFT. Na ausência do fosfato, apenas 32 % do N percolado do sulfato de amônio ocorreu na forma amoniacal, tendo aumentado para 63 % na presença do fosfato (Quadro 1). Na solução, o amônio se combina com ânions presentes, incluindo o fosfato adicionado, podendo se deslocar verticalmente caso haja fluxo descendente de água.

Quadro 1. Percentagem de nitrogênio mineral (amônio + nitrato) recuperado em relação ao aplicado, percentagem lixiviada total e percentagem remanescente no solo após 19 percolações com água destilada em função da adição de fertilizantes nitrogenados minerais a um Nitossolo Vermelho ácido na presença ou não de superfosfato triplo

Tratamento	N recuperado		N lixiviado		N no solo	
	Sem SFT	Com SFT	Sem SFT	Com SFT	Sem SFT	Com SFT
	%					
Uréia	102	64	32 (25A + 75N) ⁽¹⁾	60 (39A + 61N)	70	4
Sulfato de amônio	93	59	73 (32A + 68N)	59 (63A + 37N)	20	0
Nitrato de cálcio	59	35	59 (6A + 94N)	42 (24A + 76N)	0	0

⁽¹⁾ Valores entre parênteses expressam as percentagens percoladas de amônio (A) e nitrato (N), respectivamente, em relação ao percentual percolado em cada tratamento.

A adição do fosfato junto com o adubo amoniacal ou amídico antecipou a percolação de amônio. Quando o SFT foi aplicado junto com a uréia, a percolação de amônio iniciou-se a partir da sexta adição de água e atingiu o máximo, de aproximadamente 50 mg L^{-1} , na nona percolação (Figura 2); na ausência de SFT, a percolação iniciou-se na décima primeira adição de água e foi aumentando gradativamente até a última percolação, atingindo a concentração máxima de aproximadamente 10 mg L^{-1} (Figura 2). Nos tratamentos com sulfato mais SFT, a percolação de amônio iniciou-se na quinta percolação e atingiu o máximo de 60 mg L^{-1} , na décima primeira percolação; na ausência do fosfato, as perdas somente começaram na déci-

ma percolação (Figura 2). A percolação do N amoniacal começou somente após várias adições de água, provavelmente porque durante as primeiras semanas o NH_4^+ permaneceu adsorvido eletrostaticamente às cargas negativas do solo (Wang & Alva, 1996). À medida que a nitrificação do amônio na solução do solo prossegue, a atividade do amônio na solução diminui e parte da fração retida nas cargas negativas migra para a fase líquida, podendo ser percolada. A manutenção prolongada da forma amoniacal provavelmente ocorreu devido à baixa taxa de nitrificação, que normalmente acontece em solos com valores de pH bastante baixos, como o do presente estudo (Silva & Vale, 2000; Rosolem et al., 2003; Mantovani, 2004).

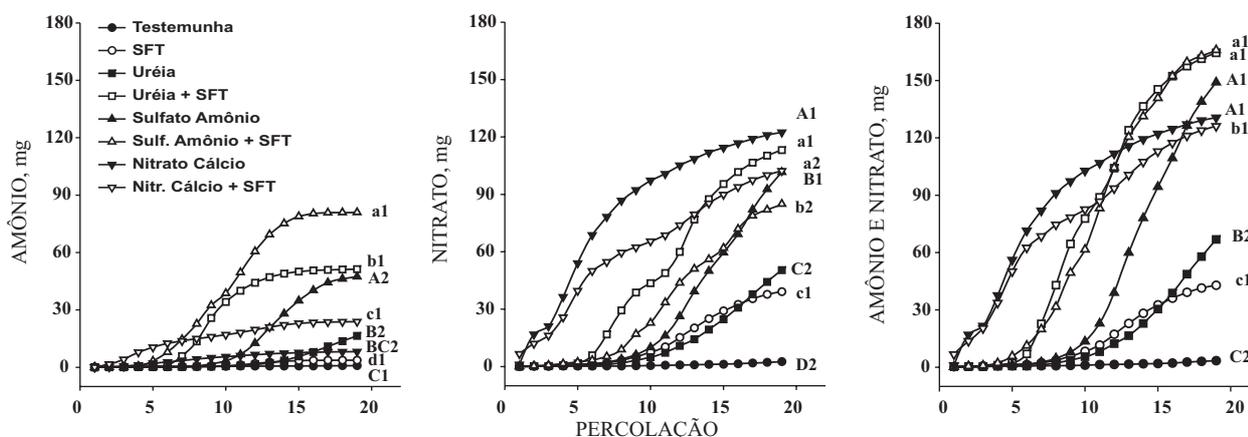


Figura 1. Quantidades acumuladas de amônio, nitrato e amônio + nitrato lixiviadas de um Nitossolo Vermelho fertilizado com adubos nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo, e submetido a 19 percolações com água destilada. Média de três repetições (médias seguidas pela mesma letra ou número não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: letras maiúsculas comparam adubos na ausência de SFT; letras minúsculas comparam adubos na presença de SFT; números comparam o efeito do SFT dentro de cada adubo nitrogenado).

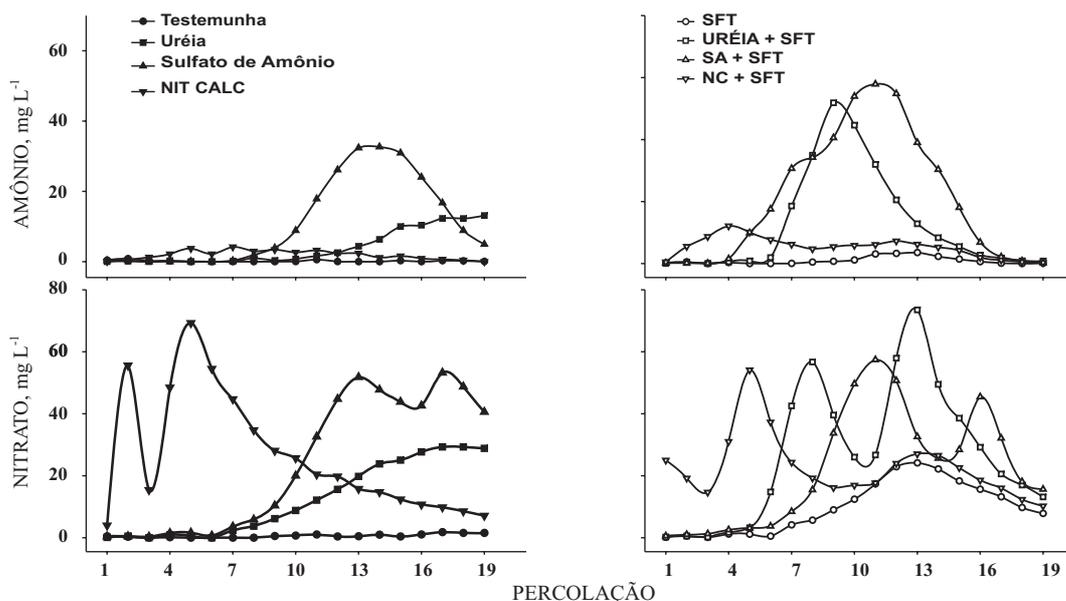


Figura 2. Concentração de amônio e nitrato no efluente das 19 percolações com água destilada a que foi submetido um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo.

A quantidade de amônio remanescente nas amostras de solo coletadas ao término do experimento foi muito menor na presença do que na ausência de SFT (Figura 3), refletindo o incremento ocasionado na percolação pelo fosfato. Na ausência do fertilizante fosfatado, as quantidades remanescentes foram altas no tratamento em que foi aplicado sulfato de amônio e, principalmente, naquele que recebeu uréia. Por alguma razão, grande parte do N amoniacal permaneceu no solo nos tratamentos que receberam uréia. Na presença do fosfato, as concentrações de amônio foram baixas e não diferiram entre os fertilizantes, possivelmente porque o Ca aplicado pelo SFT deslocou o amônio das cargas negativas para a solução do solo, que, assim, percolou em maior magnitude, relativamente aos tratamentos sem SFT.

Percolação de nitrato

A percolação total de nitrato também variou com os fertilizantes nitrogenados (Figura 1). Na ausência de SFT, a magnitude da percolação obedeceu à seguinte ordem: nitrato de Ca > sulfato de amônio > uréia > testemunha; na presença do fosfato, ela foi maior no tratamento com uréia (Figura 1). Onde não foi aplicado N, a percolação total de nitrato foi de apenas 2,5 mg, tendo aumentado para 39 mg com a adição do fosfato (Figura 1), provavelmente devido ao estímulo ocasionado pelo P na mineralização da matéria orgânica e na nitrificação (Lemos et al., 1988). A partir do momento em que o nitrato está na solução do solo, ele se combina com o Ca adicionado pelo SFT, ou mesmo com algum outro cátion deslocado pelo Ca das cargas negativas, e pode se deslocar verticalmente com o fluxo descendente de água.

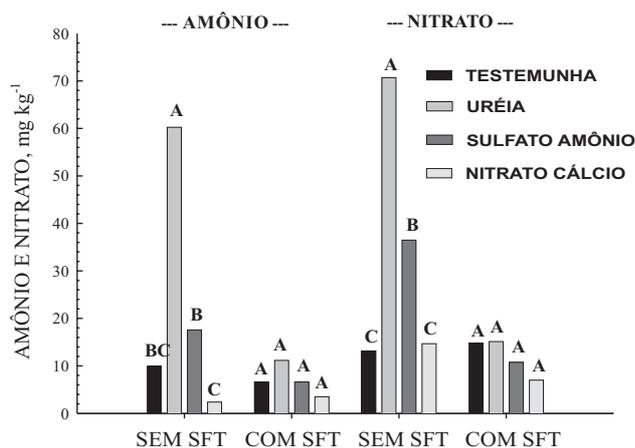


Figura 3. Valores de amônio e nitrato remanescentes no solo após 19 percolações com água destilada em função da adição de adubos nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo (SFT). Médias seguidas por letras diferentes dentro de cada nível de SFT significam diferença entre os fertilizantes nitrogenados pelo teste de Tukey a 5 %, para cada forma de nitrogênio.

A percolação de nitrato foi rápida onde foi aplicado fertilizante nítrico. Nos tratamentos com nitrato de Ca, a perda de nitrato ocorreu praticamente toda nas primeiras adições de água: sem SFT, já houve concentração de 55 mg L⁻¹ no efluente da segunda percolação, atingindo o pico máximo (70 mg L⁻¹) na quinta percolação; na presença de SFT, houve concentração de 25 mg L⁻¹ de nitrato no efluente da primeira percolação, cujo máximo (50 mg L⁻¹) foi também atingido na quinta percolação (Figura 2). A concentração de nitrato nas amostras de solo coletadas ao término do experimento não diferiu daquela observada no tratamento que não recebeu N, tanto na presença quanto na ausência de SFT (Figura 3). Wang & Alva (1996) também observaram que praticamente todo o nitrato aplicado a solos arenosos foi lixiviado nas primeiras percolações de água, em experimento com colunas de lixiviação, num método similar ao do presente estudo. Em solos de regiões com altas precipitações pluviométricas deve-se, portanto, evitar a adição de fertilizantes nítricos. Como o nitrato não é adsorvido por meio de complexos de superfície, ele vai todo para a solução após dissolução do fertilizante, podendo ser lixiviado.

A percolação de nitrato demorou a se iniciar onde o N foi aplicado na forma amoniacal ou amídica (Figura 2). Essa demora aconteceu devido à permanência do N na forma amoniacal (Silva & Vale, 2000), provavelmente em decorrência do baixo pH (4,8) do solo (Silva & Vale, 2000; Rosolem et al., 2003). Predomínio da forma amoniacal sobre a nítrica foi observado por Gonçalves et al. (2001) em várias áreas experimentais com essências florestais, principalmente naquelas com pH baixo. Ausência de nitrificação abaixo de 40 cm de profundidade foi encontrada por Lemos et al. (1988) numa lavoura de cana-de-açúcar, diferindo da camada de 20 a 40 cm, onde a nitrificação começou a partir da quinta semana e da camada superficial, onde ela ocorreu já a partir da primeira semana.

A adição de SFT junto com uréia ou com sulfato de amônio antecipou a percolação de nitrato (Figura 2). A combinação do fosfato com a uréia antecipou o pico máximo de perda da décima sétima percolação, com 30 mg L⁻¹, para a oitava percolação, com 55 mg L⁻¹. Nos tratamentos com sulfato de amônio, o pico foi antecipado pelo fosfato da décima terceira, com 55 mg L⁻¹, para a décima primeira percolação, com 60 mg L⁻¹, porém tendo iniciado na sétima percolação. O efeito do SFT na antecipação da percolação de nitrato ocorreu, provavelmente, devido ao estímulo ocasionado na nitrificação pelo aumento do P na solução do solo e, sobretudo, pelo deslocamento do amônio das cargas negativas para a solução do solo.

O efeito da adição de SFT junto com os fertilizantes nitrogenados na quantidade total de nitrato percolada variou com a fonte de N (Figura 1). A adição do fosfato praticamente dobrou a quantidade total percolada nos tratamentos com uréia e diminuiu as perdas em

aproximadamente 20 % naqueles com sulfato de amônio ou nitrato de Ca (Figuras 1 e 2). No tratamento em que foi aplicada uréia, a quantidade de N remanescente no solo ao final das 19 percolações, tanto de amônio quanto de nitrato, foi muito maior na ausência do que na presença de SFT (Figura 3). Isso mostra que algum fator qualquer, provavelmente a insuficiência de íon acompanhante, dificultou a percolação das duas formas nitrogenadas, a qual foi favorecida pela adição do fosfato de Ca. Ernani et al. (2002) também constataram que parte do N adicionado na forma de uréia não lixiviou, mesmo após 10 percolações sucessivas com água destilada. Assim, no solo onde foi aplicada uréia, o efeito do abaixamento do pH proporcionado pela dissolução do fosfato (Figueiredo, 1985; Ernani et al., 2001), tanto na diminuição da nitrificação (Silva & Vale, 2000) quanto no aumento das cargas positivas, caso tenha ocorrido, foi menos importante do que o deslocamento do amônio das cargas negativas para a solução do solo pelo Ca adicionado. Nos tratamentos com sulfato de amônio ou nitrato de Ca, o SFT diminuiu a percolação de nitrato, provavelmente pelo aumento das cargas positivas do solo decorrente da diminuição no pH ocasionada pelo fosfato, cujo efeito, acredita-se, tenha sido maior do que o incremento que a adsorção química do fosfato ocasiona nas cargas negativas (Morelli & Ferreira, 1987), ou pelo incremento na desnitrificação ocasionado pelo aumento do P no solo. Fertilizantes de dissolução ácida – a exemplo do superfosfato simples, do monoamônio fosfato e do superfosfato triplo – têm sido adicionados ao solo junto com a uréia com o objetivo de diminuir a volatilização de amônia (Sengik & Kiehl, 1995; Oliveira et al., 2003).

O nitrato remanescente no solo após as 19 percolações diferiu entre os adubos nitrogenados somente na ausência de SFT, na seguinte seqüência: uréia > sulfato de amônio > nitrato de Ca = testemunha (Figura 3). Na presença de SFT, o nitrato remanescente no solo foi baixo e semelhante em todos os tratamentos.

Alterações no pH, na condutividade elétrica e na percolação de Ca, Mg e K

As quantidades lixiviadas de Ca, Mg (Figura 4) e K (dados não mostrados) variaram com os fertilizantes nitrogenados e com a adição de SFT, apresentando comportamento semelhante ao longo das 19 percolações (Figura 4). Na testemunha (sem N e sem SFT) e no tratamento só com o fosfato, a percolação desses três cátions foi muito pequena, à exceção do Ca no solo tratado com SFT.

A percolação de Ca foi significativa no tratamento com nitrato de Ca e naqueles em que SFT foi adicionado juntamente com os adubos nitrogenados (Figura 3), em razão da presença desse cátion nesses fertilizantes e da adição ou geração de ânions. A percolação de Ca no solo tratado com nitrato de Ca ocorreu basicamente nas primeiras adições de água, atingindo o máximo de 120 mg L⁻¹, na terceira percolação, e de 180 mg L⁻¹, na segunda percolação, respectivamente na ausência e na presença de SFT. A percolação máxima de Ca nos tratamentos com uréia + SFT ou com sulfato de amônio + SFT ocorreu na décima primeira percolação, respectivamente com 70 e 41 mg L⁻¹. O comportamento das lixiviações de Ca ao longo do período experimental,

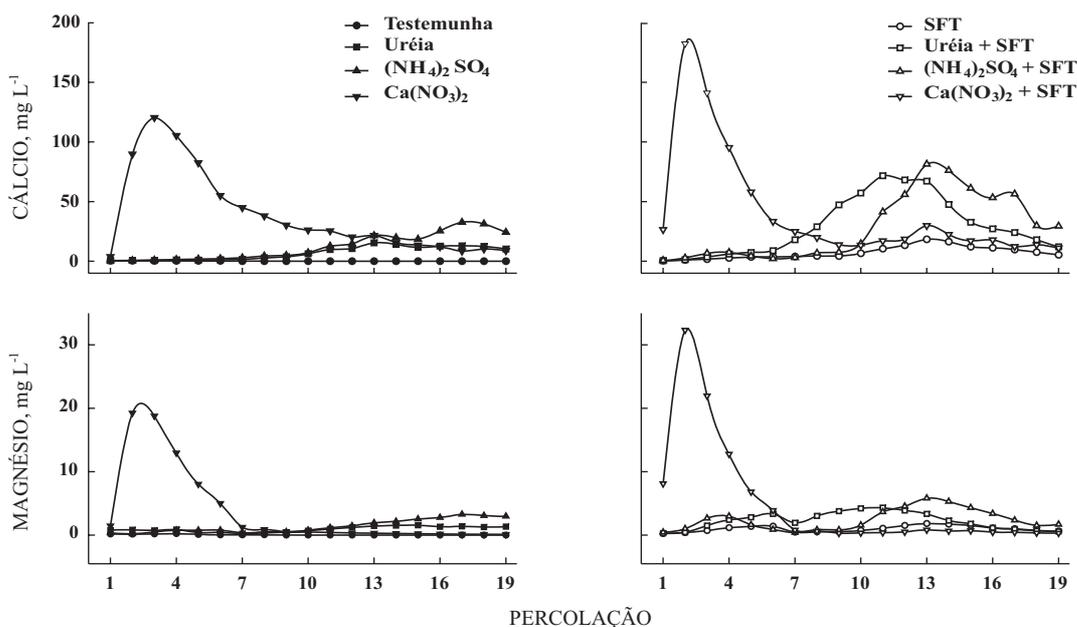


Figura 4. Concentração de cálcio e magnésio no efluente das 19 percolações com água destilada a que foi submetido um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo.

incluindo os picos de perdas, foi muito semelhante ao da percolação de nitrato, mostrando que esses dois íons desceram associados (Figura 4). Alta mobilidade vertical de Ca no perfil normalmente ocorre quando sais neutros, como nitratos, cloretos ou sulfatos, são aplicados ao solo (Ritchey et al., 1980; Ernani, 1986), devido às reações de troca de cátions e à incorporação de ânions acompanhantes que ficam disponíveis na solução do solo.

O Mg somente percolou significativamente no tratamento em que foi aplicado nitrato de Ca, sendo o processo intensificado pela adição de SFT. A lixiviação máxima de Mg ocorreu na segunda percolação, com 19 e 32 mg L⁻¹, respectivamente na ausência e na presença de SFT (Figura 4), e foi consequência de seu deslocamento das cargas negativas pelo Ca adicionado. A lixiviação de K foi pequena em todos os tratamentos, sendo aumentada e antecipada pela adição de SFT. As maiores perdas atingiram concentrações de 12 e 14 mg L⁻¹, respectivamente nos solos que receberam uréia ou sulfato de amônio em presença do fosfato (dados não mostrados).

A adição dos fertilizantes nitrogenados diminuiu o pH da solução percolada (dados não mostrados). Além do aumento da concentração de sais (Ernani & Almeida, 1986), o abaixamento do pH se deve ao deslocamento de Al das cargas negativas para a solução do solo pelos cátions integrantes dos fertilizantes, com posterior hidrólise (Ernani et al., 2004). A dissolução do SFT (Figueiredo, 1985; Ernani et al., 2001), assim como a nitrificação (Blevins et al., 1983), também diminuiu o pH, devido à liberação de H⁺. A adição de SFT diminuiu o pH da solução percolada somente no solo sem N e naquele tratado com uréia, provavelmente porque esta eleva o pH durante sua hidrólise (Ernani et al., 2001).

A condutividade elétrica variou com os fertilizantes nitrogenados no decorrer do período experimental (dados não mostrados). A aplicação de SFT aumentou a condutividade elétrica da solução percolada, em todos os tratamentos. O menor incremento ocorreu no solo que recebeu nitrato de Ca, possivelmente devido à intensa percolação proporcionada por esse fertilizante já nas primeiras percolações. A variação na condutividade elétrica das soluções percoladas foi muito similar ao comportamento verificado na percolação dos íons, uma vez que ela reflete o incremento na concentração eletrolítica da solução do solo.

CONCLUSÕES

1. A adição de fertilizantes nitrogenados amoniacais ou amídicos a solos ácidos retarda a percolação de N em relação aos adubos nítricos porque mantém o NH₄⁺ adsorvido por certo tempo nas cargas elétricas negativas.

2. A adição de SFT aumenta e antecipa a percolação de NH₄⁺ devido ao deslocamento desse cátion das cargas negativas pelo Ca adicionado.

3. Em relação ao nitrato, o fosfato antecipou sua percolação, dobrou-a no solo tratado com uréia e a diminuiu em 20% nos demais fertilizantes, provavelmente em razão do incremento proporcionado pelo P na desnitrificação.

4. A adição do SFT junto com uréia aumentou a percolação de N no solo devido ao deslocamento do amônio das cargas negativas pelo Ca adicionado, e isso foi mais importante do que o provável efeito do abaixamento do pH proporcionado pela dissolução do fosfato na diminuição da nitrificação e no aumento das cargas positivas do solo.

LITERATURA CITADA

- AULAKH, M.S.; KHERA, T.S.; DORAN, J.W.; SINGH, K. & SINGH, B. Yields and nitrogen dynamics in a rice-wheat system using green manure and inorganic fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1867-1876, 2000.
- BASSO, C.J. & CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:905-915, 2000.
- BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. & CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil Till. Res.*, 3:135-146, 1983.
- DROUINEAU, G. Influence of irrigation on the distribution of fertilizer elements in the soil profile. In: *COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE*, 7., Bern, 1969. Anais. Bern, International Potash Institute, 1969. p.96-105.
- ERNANI, P.R. & ALMEIDA, J.A. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:143-150, 1986.
- ERNANI, P.R. & BARBER, S.A. Composição da solução do solo e lixiviação de cátions afetados pela aplicação de cloreto e sulfato de cálcio em um solo ácido. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:41-46, 1993.
- ERNANI, P.R.; BAYER, C. & RIBEIRO, M.F.S. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 35:889-901, 2004.
- ERNANI, P.R.; SANGOI, L. & RAMPAZZO, C. Lixiviação e imobilização de nitrogênio num Nitossolo como variáveis da forma de aplicação da uréia e da palha de aveia. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:993-1000, 2002.
- ERNANI, P.R.; STECKLING, C. & BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:939-946, 2001.
- ERREBHI, M.; ROSEN, C.J.; GUPTA, S.C. & BIRONG, D.E. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. *Agron. J.*, 90:10-15, 1998.

- FIGUEIREDO, O.A.L. Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um Latossolo Bruno. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 85p. (Tese de Mestrado)
- GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.C.F.S. & SASAKI, C.M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do Estado de São Paulo. R. Bras. Ci. Solo, 25:601-616, 2001.
- KIEHL, J.C. Distribuição e retenção de amônia no solo após a aplicação de uréia. R. Bras. Ci. Solo, 13:75-80, 1989.
- LEMONS, E.E.P.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, V.S.B. Comparação entre o N mineralizado através de incubações com e sem percolação e o N absorvido pelo milho em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 12:127-130, 1988.
- MANTOVANI, A. Lixiviação de nitrogênio em nitossolo vermelho afetada pelo pH do solo e pela adição de fertilizantes nitrogenados combinados com superfosfato triplo. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2004. 59p. (Tese de Mestrado)
- MENEZES, R.S.C.; GASCHO, G.J.; HANNA, W.W.; CABRERA, M.L. & HOOK, J.E. Subsoil nitrate uptake by grain pearl millet. Agron. J., 89:189-194, 1997.
- MORELLI, M. & FERREIRA, E.B. Efeito do carbonato de cálcio e do fosfato diamônico em propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo. R. Bras. Ci. Solo, 11:1-6, 1987.
- OLIVEIRA, P.P.A.; TRIVELIM, P.C.O. & OLIVEIRA, W.S. Eficiência da fertilização nitrogenada com uréia (¹⁵N) em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu associada ao parcelamento de superfosfato simples e cloreto de potássio. R. Bras. Ci. Solo, 27:613-620, 2003.
- OTTMAN, M.J. & POPE, N.V. Nitrogen fertilizer movement in the soils as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. Soil Sci. Soc. Am. J., 64:1883-1892, 2000.
- RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. & CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah oxisol. Agron. J., 72:40-44, 1980.
- ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S. & OLIVEIRA, R.H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e da adubação nitrogenada, com palha na superfície. Pesq. Agropec. Bras., 38:301-309, 2003.
- SENGIK, E. & KIEHL, J.C. Controle da volatilização de amônia em terra tratada com uréia e turfa pelo emprego de sais inorgânicos. R. Bras. Ci. Solo, 19:455-461, 1995.
- SILVA, C.A. & VALE, F.R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes de nitrogênio. Pesq. Agropec. Bras., 35:2461-2471, 2000.
- STRONG, D.T.; SALE, P.W.G. & HELYAR, K.R. Initial soil pH affects the pH at which nitrification ceases due to self-induced acidification of microbial microsites. Aust. J. Soil Res., 35:565-570, 1997.
- TEDESCO, M.J.; VOLKSVEISS, S.J. & BOHEN, H. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 188p. (Boletim Técnico, 5)
- VITTI, G.C.; TAVARES Jr., J.E.; LUZ, P.H.C.; FAVARIN, J.L. & COSTA, M.C.G. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. R. Bras. Ci. Solo, 26:663-671, 2002.
- WANG, F.L. & ALVA, A.K. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 60:1454-1458, 1996.