

ANTÔNIO MARCOS COELHO

BALANÇO DE NITROGÊNIO (15 N) NA CULTURA DO MI-
LHO (*Zea mays*, L) EM UM LATOSSOLO VERMELHO-
ESCURO FASE CERRADO

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura de Lavras, como parte das exigências do curso de mestrado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do grau de MESTRE.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE LAVRAS

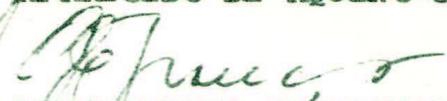
LAVRAS - MINAS GERAIS

1987

BALANÇO DE NITROGÊNIO (15 N) NA CULTURA DO MILHO (*Zea mays*, L.)
EM UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO FASE CERRADO

APROVADA:


GERALDO APARECIDO DE AQUINO GUEDES


GONÇALO EVANGELISTA DE FRANÇA


ANTÔNIO FERDINANDO DE CASTRO BAHIA FILHO


VICTOR GONÇALVES BAHIA

À memória de meus pais, JOSÉ FRANCISCO COELHO E LÚCIA

BOTELHO COELHO

DEDICO

À minha esposa JUSSARA e aos meus filhos IGOR, ANDREI e
KENIA, com amor e carinho, pela compreensão, apoio e estímulo

OFEREÇO.

BIOGRAFIA

ANTÔNIO MARCOS COELHO, filho de José Francisco Coelho e Lúcia Botelho Coelho, nasceu no dia 30 de setembro de 1952, em Lavras, MG.

Em 1973, iniciou o curso de Engenharia Agrônômica na Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), concluindo-o em 1976.

Iniciou as atividades profissionais em 1977, na Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio de Janeiro (EMATER-RIO). No mesmo ano, foi contratado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Minas Gerais (EPAMIG), sendo lotado em Janaúba, MG, onde, participou do projeto de transferência de tecnologia em solos tropicais ("Benchmark Soils Project"), convênio EPAMIG/Universidade de Porto Rico.

Em 1980, foi designado para exercer a função de Coordenador do Programa Estadual de Pesquisa de Milho e Sorgo, atuando junto ao Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (EMBRAPA), em Sete Lagoas, MG. Em 1985, iniciou o curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, na Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL).

AGRADECIMENTOS

À Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Minas Gerais (EPAMIG), a oportunidade;

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pela bolsa de estudos concedida;

À Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), em especial ao Departamento de Ciência do Solo, os ensinamentos;

Ao Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS-EMBRAPA), as facilidades oferecidas para realização, em suas dependências, de todas as etapas da tese;

Ao International Fertilizer Development Center (IFDC), Muscle Shoals, Alabama, USA, pela assessoria do Dr. Bruce C. Christianson;

À Unidade de Apoio ao Programa Nacional de Pesquisa em Biologia do Solo (PNPBS-EMBRAPA), nas pessoas do Dr. Robert M. Bodey e Dr. Segundo S. U. Caballero, pelas facilidades oferecidas para as análises de nitrogênio - 15;

Ao Dr. Gonçalo Evangelista de França, Dr. Antônio Fernandino de Castro Bahia Filho; aos Professores Dr. Geraldo Aparecido de A. Guedes e Dr. Fabiano Ribeiro do Vale, pela amizade, empenho e dedicação na orientação deste trabalho;

Ao Dr. Antônio Carlos de Oliveira e Dr. Augusto R. de Moraes, pela orientação nas análises estatísticas;

Ao Professor, MS, Vicente Gualberto pela amizade e revisão do texto;

Ao Professor, Dr. Victor Gonçalves Bahia, pela amizade, apoio e sugestões durante a realização do curso;

Ao Dr. Marcelo de Aguiar Sans pela amizade e colaboração em algumas etapas de realização deste trabalho;

À Equipe Multidisciplinar de Pesquisadores e funcionários do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS - EMBRAPA), a amizade e colaboração durante a realização deste trabalho; e

À Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPE), pela ajuda financeira na impressão deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1.
2. REVISÃO DE LITERATURA	3.
2.1. Aspectos Gerais do Nitrogênio em Solos Tropicais	3.
2.2. Mecanismos de Perdas de Nitrogênio no Solo	4.
2.2.1. Movimento do Nitrogênio no Perfil do Solo e Perdas por Lixiviação	5.
2.2.2. Desnitrificação	12.
2.2.3. Volatilização de Amônia	13.
2.3. Balanço do Nitrogênio no Sistema Solo-Planta	20.
2.3.1. Uso do Isótopo (^{15}N) no Estudo do Balanço do Nitrogênio no Sistema Solo-Planta	23.
2.4. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado	30.
2.5. Métodos para Determinar a Recuperação do Nitrogênio	34.
2.5.1. Método Direto ou Isotópico - ^{15}N	34.
2.5.2. Métodos Indiretos	35.
2.5.2.1. Método da Diferença	35.

2.5.2.2. Método da Regressão Linear	35.
2.6. Considerações Sobre os Métodos de Determinar a Recuperação do Nitrogênio	35.
3. MATERIAL E MÉTODOS	39.
3.1. Localização do Experimento	39.
3.2. Características Edafo-Climáticas	39.
3.3. Caracterização Química do Solo	41.
3.4. Calagem	41.
3.5. Ensaio em Branco	41.
3.6. Delineamento Experimental e Tratamentos	44.
3.7. Parcela Experimental	44.
3.8. Preparo do Solo e Adubação Corretiva	47.
3.9. Adubação de Manutenção e Semeadura	47.
3.10. Aplicação de Herbicida	48.
3.11. Irrigação	48.
3.12. Desbaste	49.
3.13. Adubação Nitrogenada em Cobertura	49.
3.14. Controle de Pragas	50.
3.15. Colheita	50.
3.15.1. Amostragem de Plantas	51.
3.15.2. Amostragem de Material de Solo	51.
3.16. Preparo das Amostras	55.
3.16.1. Planta	55.
3.16.2. Solo	55.
3.17. Análises de Nitrogênio	56.

	Página
3.17.1. Análise de N-Total no Solo	56.
3.17.2. Análise de N-Total na Planta	59.
3.17.3. Análise de N-Inorgânico no Solo	60.
3.17.4. Teste de Destilação	61.
3.17.4.1. Eficiência da Destilação	61.
3.17.4.2. Ocorrência de Contaminação Cruzada Durante a Destilação	62.
3.17.5. Teste de Digestão	64.
3.17.6. Determinação da Relação Isotópica e Porcentagem de ¹⁵ N nas Amostras	64.
3.18. Cálculos	65.
3.18.1. Porcentagem de N-Total no Solo e Planta	65.
3.18.2. Quantidade de N-Total no Solo	65.
3.18.3. Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante....	66.
3.18.4. Quantidade de N-Total na Planta	66.
3.18.5. Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante ..	67.
3.18.6. Porcentagem de Recuperação de ¹⁵ N no Material de So lo e Planta	67.
3.18.7. Nitrogênio Inorgânico no Solo	68.
3.18.8. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogena- do	69.
3.18.9. Balanço de ¹⁵ N-Fertilizante no Sistema Solo-Planta.	70.
3.19. Análises Estatísticas	70.
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73.
4.1. Componentes da Produção e Resposta do Milho a Adubação Nitro- genada	73.

	Página
4.2. Produção de Matéria Seca e Nitrogênio Absorvido	78.
4.3. Efeito de Fontes de Nitrogênio	83.
4.4. Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante	85.
4.5. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado	90.
4.6. Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante	95.
4.6.1. Nitrogênio Total	95.
4.6.2. Nitrogênio Inorgânico	99.
4.7. Balanço do Nitrogênio Proveniente do Fertilizante no Sistema Solo-Planta	99.
5. CONCLUSÕES	108.
6. RESUMO	111.
7. SUMMARY	114.
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117.
APÊNDICE	136.

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1. Estimativas das perdas de nitrogênio por lixiviação, em diferentes condições de solos, clima e culturas, de experimentos realizados no Brasil	11
2. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante no sistema solo-planta e respectivas perdas em experimentos sobre o balanço de nitrogênio	26
3. Resultados das análises de algumas características químicas do solo em estudo. Sete Lagoas, MG. 1987	42
4. Fontes, doses e métodos de aplicação de nitrogênio nos tratamentos utilizados	45
5. Átomos % de ¹⁵ N nos padrões de sulfato de amônio utilizados para verificar a ocorrência de contaminação cruzada durante a destilação das amostras de material de solo e planta. Sete Lagoas, MG. 1987	63
6. Influência de níveis, fontes e métodos de aplicação de nitrogênio nos componentes da produção de milho cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987	74

- | | |
|---|----|
| 7. Influência de níveis, fontes e métodos de aplicação de nitrogênio na produção de matéria seca e nitrogênio absorvido pelo milho cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987 | 79 |
| 8. Efeito do método de aplicação do ^{15}N -uréia (60 kg N/ha), na produção de matéria seca, na quantidade de nitrogênio absorvido, átomos % de ^{15}N , nitrogênio derivado do fertilizante e recuperação do nitrogênio pelo milho, cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987 | 86 |
| 9. Produção de matéria seca, nitrogênio absorvido, átomos % de ^{15}N , nitrogênio derivado do fertilizante e recuperação do N-uréia (60 kg N/ha), pelo milho cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987 | 88 |
| 10. Efeito de fontes, doses e métodos de aplicação na recuperação (%) do nitrogênio do fertilizante pelo milho, calculada pelos métodos indiretos (diferença e regressão linear) e direto ou isotópico (^{15}N). Sete Lagoas, MG. 1987 | 91 |
| 11. Distribuição do nitrogênio total, átomos % ^{15}N e nitrogênio total proveniente do fertilizante no perfil do solo após a colheita do milho, em função dos métodos de aplicação da uréia na dose de 60 kgN/ha. Sete Lagoas, MG. 1987 | 96 |

12. Nitrogênio total, átomos % ^{15}N e nitrogênio total proveniente do fertilizante no perfil do solo após a colheita do milho. Sete Lagoas, MG. 1987. (Dados médios dos métodos de aplicação da uréia, na dose de 60kgN/ha). 97
13. Recuperação do nitrogênio do fertilizante nas formas inorgânicas, à várias profundidades no perfil do solo, após a colheita do milho. Sete Lagoas, MG. 1987. (Dados médios dos métodos de aplicação da uréia, na dose de 60 kg N/ha) 100
14. Balanço do nitrogênio, proveniente da uréia (60kgN/ha), no sistema solo-planta da cultura do milho, em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987. 102

LISTA DE FIGURA

Figura	Página
1. Detalhes da parcela experimental mostrando a disposição da microparcela para aplicação da uréia enriquecida com ^{15}N	46
2. Representação esquemática do quadro de metal e folha de compensado utilizados nas amostragens de material de solo nas microparcelsas tratadas com ^{15}N	53
3. Produção de milho em função da aplicação de doses de nitrogênio em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987	76
4. Influência de níveis de nitrogênio na produção de matéria seca à 60°C (A) e na quantidade de nitrogênio absorvido pelo milho (B) cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987	80
5. Efeito de fontes e métodos de aplicação de nitrogênio na produção de grãos e na quantidade de nitrogênio absorvido pelo milho cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987	84

Figura

Página

6. Influência de níveis, fontes e métodos de aplicação na recuperação do N-fertilizante pelo milho, calculadas pelos métodos da diferença e regressão linear (A), e pelos métodos da diferença e direto - ^{15}N (B) 92
7. Balanço do nitrogênio, proveniente da uréia (60kgN/ha), no sistema solo-planta da cultura do milho em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987... 103

1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio é um dos nutrientes que mais limita a produção de cereais no Brasil. O elevado custo deste fertilizante, que é o mais caro, em termos de energia por tonelada produzida, e a recente preocupação com a poluição do meio ambiente, tem direcionado a atenção para a eficiência de utilização do nitrogênio pelas culturas. Assim, torna-se necessário um estudo mais completo do balanço do nitrogênio no sistema solo-planta.

Um grande número de experimentos foram realizados no Brasil, ao longo dos anos, com o objetivo de desenvolver curvas de respostas para vários fertilizantes nitrogenados, em diferentes solos e condições agroclimáticas. Observa-se porém, que estes experimentos foram conduzidos com o objetivo de demonstrar efeitos dos fertilizantes para uma determinada cultura. Entretanto, é difícil explicar tais efeitos pois pouco se conhece sobre o manejo e as transformações dos fertilizantes no solo e suas relações com as respostas das culturas.

Essas informações são imprescindíveis para formular novas

linhas de pesquisas, cuja meta final é elevar o índice de utilização do nitrogênio pelas culturas.

O uso do isótopo estável ^{15}N constitui uma técnica valiosa nas pesquisas com nitrogênio, a qual pode ser empregada para determinar as transformações e a eficiência dos fertilizantes nitrogenados no sistema solo-planta. O seu uso possibilita determinar a porcentagem do nitrogênio aplicado que é absorvido pela planta, que fração permanece no solo e pode ser aproveitado pela cultura seguinte, e, por diferença, as perdas que ocorrem no sistema.

O objetivo principal deste trabalho foi de estudar a dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta da cultura do milho (*Zea mays*, L.), através da avaliação do balanço e da eficiência de utilização deste nutriente em função do método de aplicação na superfície e incorporado ao solo; do fertilizante uréia marcado com ^{15}N .

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos Gerais do Nitrogênio em Solos Tropicais

Diversos trabalhos têm mostrado a necessidade da aplicação de fertilizantes nitrogenados para sustentar altas produções das culturas cultivadas em solos tropicais, das regiões úmidas e periodicamente úmidas (32, 42, 50, 51), devido, principalmente, à baixa capacidade desses solos em suprir nitrogênio, e à baixa eficiência de utilização tanto do nitrogênio nativo, como do fertilizante aplicado, BARTHOLOMEW (09). A baixa eficiência dos fertilizantes nitrogenados em condições tropicais tem sido atribuída ao grande potencial de perdas, sendo a lixiviação, desnitrificação e volatilização de amônia (NH_3) os mecanismos mais importantes, GAMBOA et alii (47) e OSINAME et alii (87).

Nestas condições, a recuperação aparente do nitrogênio adicionado é da ordem de 50 a 60%, quando doses de 60 a 120 kgN/ha são aplicadas (26, 27, 42, 50, 51). Recuperação inferior a 50% tem sido observada com aplicação de altas doses de nitrogênio ou quando o fertilizante foi aplicado em solos com alta capacidade de suprimento de nitrogênio, FOX et alii (42), GROVE et alii (51).

Considerando a existência de um potencial de grandes perdas de nitrogênio inorgânico, os altos preços dos fertilizantes nitrogenados, o baixo nível econômico dos agricultores e os substanciais investimentos realizados nesses solos, visando incorporá-los ao processo produtivo, torna-se essencial um manejo eficiente dos fertilizantes nitrogenados.

Informações sobre o manejo adequado dos fertilizantes nitrogenados em solos da região tropical são ainda limitadas, GROVE et alii (51) e PERES & SUHET (89), assim como estudos do balanço do nitrogênio.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos para avaliar o movimento de nitrogênio no perfil dos solos e perdas por lixiviação. Entretanto, antes de se obter tais informações é necessário compreender as interações dos diversos fatores que afetam o balanço do nitrogênio em um determinado sistema, visando otimizar a produtividade, diminuir as perdas e reduzir os riscos de poluição, REICHARDT et alii (92).

2.2. Mecanismos de Perdas de Nitrogênio no Solo

Sob condições de campo é conhecido que a recuperação do N fertilizante pela cultura raramente é mais de 50% (41, 75, 76, 84). Parte do nitrogênio remanescente é recuperado pelas culturas subsequentes, parte provavelmente é perdido através da lixiviação, parte pode ser incorporado à matéria orgânica no solo, e o restante presumivelmente se perde na forma de gases através da

desnitrificação e volatilização de amônia.

2.2.1. Movimento do Nitrogênio no Perfil do Solo e Perdas por Lixiviação

Do nitrogênio total na superfície dos solos agrícolas, mais de 90% encontra-se em combinações orgânicas, JENKINSON (60). Enquanto permanece nesta forma, o nitrogênio está relativamente seguro das perdas, exceto por erosão, ALLISON (02), BRADY (12). Entretanto, este estoque de N-orgânico está sujeito ao processo da mineralização, sendo convertido em amônia (NH_3) e posteriormente, pelo processo da nitrificação, transformada em nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). Na forma de NO_3^- , o nitrogênio é normalmente pouco retido pelos colóides do solo, ficando livre na solução do solo e sujeito ao movimento da água no perfil, podendo perder-se por lixiviação.

A intensidade de perdas de N-NO_3^- por lixiviação é controlada por um grande número de variáveis que são bem compreendidas, pelo menos qualitativamente, ALLISON (02). Entre as mais importantes podem ser citadas: a) forma e quantidade de nitrogênio solúvel do solo ou adicionado como fertilizante; b) intensidade e duração da precipitação pluviométrica; c) taxa de infiltração e percolação da água que é afetada por características do solo, tais como: textura, estrutura e profundidade do perfil; d) capacidade de retenção de água do solo e seu conteúdo de umidade antes da ocorrência de chuvas; e) característica da cobertura

vegetal e seu desenvolvimento; f) taxa de absorção do nitrogênio pela cultura; g) evapotranspiração, e h) intensidade do movimento ascendente do nitrogênio durante períodos de estiagens.

O fertilizante nitrogenado aplicado ao solo é, também, envolvido nas várias reações do nitrogênio no solo, MENGEL & KIRKBY (73). Por exemplo, a uréia aplicada no solo é desdobrada em NH_4^+ e CO_2 pela enzima urease. O NH_4^+ resultante pode ser absorvido pelas plantas ou microorganismos, adsorvido ao solo ou oxidado para nitrato (NO_3^-). O nitrato, originado desta maneira, ou aplicado diretamente ao solo, pode ser lixiviado, desnitrificado ou absorvido pelas plantas.

A rapidez e a intensidade pela qual o amônio (NH_4^+) é convertido a nitrato (NO_3^-) tem três efeitos principais nas subseqüentes reações do nitrogênio do solo e fertilizante, HAUCK (56):

- a) o metabolismo do nitrogênio é afetado por que a taxa de absorção e assimilação de NO_3^- e NH_4^+ pelas plantas são diferentes;
- b) a nitrificação converte uma forma catiônica de nitrogênio (NH_4^+) relativamente imóvel para uma forma aniônica (NO_3^-) móvel e que é realmente lixiviada;
- e c) são produzidas formas oxidadas de nitrogênio as quais são susceptíveis a perdas através da volatilização por processos de redução microbiológica (desnitrificação).

Em solos tropicais pouco é conhecido a respeito das transformações do nitrogênio. O que acontece com o adubo nitrogenado no solo e por quanto tempo ele permanece em forma disponível à cultura, são algumas importantes indagações que não tem sido in

vestigadas, KIEHL et alii (61). Tem-se assumido, por exemplo, que nesses solos bem drenados, o processo de nitrificação é intenso, PERES & SUHET (89).

Uma alternativa para reduzir as perdas de $N-NO_3^-$ por lixiviação é manter o nitrogênio no solo como $N-NH_4^+$ por períodos mais prolongados. Recentemente tem sido testado o uso de inibidores da nitrificação (40, 80, 82). Entretanto, conforme demonstrado por OSINAME et alii (87), a rapidez com que os inibidores tornam-se inativos a altas temperaturas (30-40°C), em condições de umidade de 50-100% da capacidade de campo, pode limitar sua eficiência sob condições tropicais, em que as temperaturas do solo na camada superficial podem atingir valores acima de 40°C.

A extensão e a severidade da lixiviação dependem inteiramente da precipitação, infiltração da água e da demanda evaporativa da região. De acordo com ALLISON (02, 03), um método indireto, mas de grande valor prático de avaliar a probabilidade de perdas de nitrogênio do solo, por lixiviação, é anotar a quantidade de precipitação e estimar as perdas de umidade durante um dado período. Se durante um determinado período as perdas por evapotranspiração excede a precipitação poderá não haver lixiviação desde que a umidade inicial do solo não esteja acima da capacidade de campo. Se, por outro lado, a precipitação ou infiltração excede a evapotranspiração, a lixiviação poderá ou não ocorrer, dependendo da quantidade de água requerida para elevar o solo a capacidade de campo. O método usual é plotar num mesmo gráfico os dados mensais acumulativos da precipitação ou infiltração e

evapotranspiração.

A capacidade de retenção de água e a sua taxa de movimentação nos solos influenciam significativamente a lixiviação do nitrogênio. Estudando o movimento de $N-NO_3^-$ num Alfisol na Nigéria, WILD (112) encontrou que este íon descia a uma taxa de 0,5 mm/mm de chuva. Trabalhos conduzidos no Brasil por Suhet & Ritchey citados por SUHET et alii (100) em Latossolo, indicaram índices de lixiviação de nitrato através do perfil do solo de 1,0 a 1,5 mm/mm de chuva.

O movimento de nitrato (NO_3^-) em solos que apresentam diferenças texturais ao longo de seus perfis diferem grandemente. REHM & WIESE (91) estudaram a influência do método de aplicação de nitrogênio na produção de milho irrigado, em solos arenosos que apresentavam diferenças texturais em seus perfis. Para o solo "Bazile" não houve vantagem da aplicação parcelada de amônia - anidra em relação a toda aplicação antes do plantio, na produção de grãos de milho, o que não ocorreu com o solo "Thurman" onde aplicações parceladas deram melhores resultados. Os autores determinaram a movimentação de NO_3^- nos perfis dos dois solos até a profundidade de 150 cm. Para o solo "Basile", caracterizado por um acúmulo de material de textura fina (barro siltoso) à profundidade de 50 - 70cm, o movimento descendente do NO_3^- e, conseqüentemente a perda por lixiviação, foi restringida por esta camada, sendo uma importante característica para explicar as diferenças observadas no efeito do método de aplicação do nitrogênio, sobre a produção de milho, entre os solos.

Em Sete Lagoas-MG, FRANÇA et alii (43) determinaram a variação estacional de $N\text{-NO}_3^-$ e $N\text{-NH}_4^+$ nos perfis dos solos Aluvial e Latossolo Vermelho-Escuro (LEd), ambos cultivados com milho, e que haviam recebido 30, 60 e 240 kg N/ha, na forma de uréia. Devido à diversidade das características químicas, físicas e mineralógicas dos dois solos, o comportamento do nitrogênio foi diferente em vários aspectos. Enquanto a forma predominante de nitrogênio no solo Aluvial, no decorrer do período de amostragem, foi NH_4^+ , no Latossolo constatou-se a existência apenas de NO_3^- , indicando diferenças marcantes nos processos de transformação da uréia nesses solos. A dinâmica do NO_3^- no perfil do Latossolo acompanhou a movimentação da água, sendo que no período chuvoso observou-se movimentação de NO_3^- da camada de 20-40 cm para 40 - 60 cm. No solo Aluvial, a diferença na concentração das formas de nitrogênio nas várias profundidades e épocas de amostragens foi pequena, ficando restrita à camada de 0-10 cm, devido a predominância da forma amoniacal.

Perdas de NO_3^- por lixiviação são menores em solos cultivados do que em solos sem cobertura vegetal, devido a direta absorção do NO_3^- pela planta e porque a evapotranspiração reduz a quantidade de água no solo. LONG & HUCK (67) observaram que as raízes de milho reduziram efetivamente a lixiviação do $N\text{-NO}_3^-$ em um solo barro arenoso, em estudo simulado em condições de laboratório. Na dose de 250 kg N/ha, as raízes interceptaram e removeram essencialmente todo o nitrogênio antes deste atingir a 80 cm de profundidade.

No Brasil, os trabalhos sobre a dinâmica do nitrogênio no solo, foram conduzidos com o objetivo de quantificar as perdas de NO_3^- por lixiviação; sendo que alguns foram realizados em colunas de solo em laboratório, GUEDES (52) e KINJO et alii (62); e outros em condições de campo (31, 61, 96).

REICHARDT et alii (92) revisaram os trabalhos conduzidos no Brasil sobre o balanço de nitrogênio no sistema solo-planta utilizando a técnica do isótopo (^{15}N) e discutiram os diferentes componentes do balanço, com ênfase para as perdas de nitrogênio do solo e fertilizante por lixiviação. Verificaram que aproximadamente 10 a 20 kg N/ha são perdidos por lixiviação com doses de até 100 kg N/ha, mas somente 20% dessas quantidades foram derivadas do fertilizante, e que 4,5 g de nitrogênio do fertilizante foram perdidos por lixiviação por milímetro de chuva com dose de 90 kg N/ha. Os autores concluíram que perdas de nitrogênio por lixiviação não constituem problemas com doses normais de fertilizantes.

No Quadro 1 estão resumidos os dados de perdas de nitrogênio por lixiviação, encontrados por diversos autores e revisados por REICHARDT et alii (92), acrescidos dos resultados obtidos por SALCEDO & SAMPAIO (96). Estes dados são valores médios, o que certamente tem muitas limitações, dadas as dificuldades encontradas, como por exemplo, em definir a profundidade ou limite inferior do solo, uma vez que, em solos bem estruturados, e sem limitações de ordem química, as raízes podem penetrar e absorver

QUADRO 1 - Estimativas das perdas de nitrogênio por lixiviação em diferentes condições de solos, clima e culturas, de experimentos realizados no Brasil.

Solo ^{1/}	Cultura	Período (dias)	Dose de N (kg/ha)	N-Total Lixiviado (kg/ha)	N-Fertilizante Lixiviado (kg/ha)	Precipitação (mm)	Referências
TR	Feijão	120	120	6,7	-	661	(65)
TR	Feijão	365	100	15,0	1,4	1382	(72)
LE	Milho	130	80	9,2	0,4	717	(93)
TR	Milho	150	100	32,4	11,0	620	(06)
TR	Feijão	86	42	-	0,8	403	(106)
PV	Cana-de- açúcar	365	60 20+40	21,0 14,0	- -	1139	(96)

^{1/} TR = Terra Roxa estruturada; LE = Latossolo Vermelho-Escuro, fase arenosa; PV = Podzólico Vermelho Amarelo latossólico álico, textura arenosa.

nutrientes a grandes profundidades. HERRON et alii (58), estudando a movimentação e a absorção de $N-NO_3^-$ pelo milho, utilizando N^{15} , verificaram que as raízes dessa cultura extraíram consideráveis quantidades de $N-NO_3^-$ a várias profundidades no solo. A recuperação total do N na planta foi de: 45, 45, 51 e 61% das quantidades aplicadas às profundidades de 45, 75, 105 e 135 cm, respectivamente.

2.2.2. Desnitrificação

Muitas espécies de bactérias encontradas no solo são capazes de reduzir nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) para gases nitrogenados (NO , N_2O , N_2) os quais são liberados na atmosfera. Esta redução dissimilatória é conhecida como desnitrificação, MENGEL & KIRKBY (73).

A redução microbiológica de nitratos e nitritos é realizada por bactérias anaeróbicas facultativas. A maioria delas usam preferencialmente o oxigênio como aceptor de elétrons, mas, também, podem usar nitratos e nitritos como substitutos, BROADBENT & CLARK (15) e ALLISON (03).

COOPER & SMITH (24) e RYDEN et alii (94), verificaram que as reações de desnitrificação em solos segue a sequência: $NO_3^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$. Desde que a desnitrificação envolve a remoção microbiológica do O_2 do NO_3^- , ela ocorre em grande intensidade em solos sob condições de baixa pressão parcial de O_2 , a qual resulta, principalmente, do alto conteúdo de umidade, de composição da ma-

téria orgânica e respiração das raízes, ALEXANDER (01) e BROAD BENT & CLARK (15).

De acordo com ALLISON (03), a desnitrificação não é limitada a períodos de excessiva umidade no solo. Ela pode ocorrer em solos de textura fina e com conteúdo de umidade abaixo da capacidade de campo. Nestas condições, embora os macroporos possam estar bem aerados, os microporos ou o interior da estrutura da matéria orgânica podem apresentar-se deficientes em oxigênio, devido sua difusão não ser suficientemente rápida para repor o oxigênio que está sendo consumido pela microflora. BREMNER & SHAW (14), demonstraram a ocorrência de desnitrificação em solos bem drenados, sugerindo a presença neles de zonas anaeróbicas.

Perdas de nitrogênio por desnitrificação tem sido tradicionalmente avaliadas em estudos do balanço do ^{15}N no sistema solo-planta, obtidas indiretamente como a quantidade do N-fertilizante não recuperado pela planta e no solo. Assim, em condições de campo, perdas da ordem de 13 a 23% tem sido atribuídas ao processo de desnitrificação durante períodos de deficiência de oxigênio quando a superfície do solo foi umedecida pela chuva ou irrigação (84, 104, 112).

2.2.3. Volatilização de Amônia

Os fatores que levaram ao reconhecimento da importância da volatilização de amônia como mecanismo de perdas de nitrogênio do solo, de acordo com ALLISON (03), foram: a) aumento nas

doses de nitrogênio aplicada; b) o uso de amônia anidra e solução de amônia em preferência aos sais de amônio; e c) um acentuado aumento no uso da uréia, a qual é realmente hidrolizada pela enzima urease para amônia.

A preferência pela uréia como fonte de nitrogênio para as culturas, no Brasil, VITT et alii (107); DIAS FILHO & PEREIRA NETO (29); e em outros países, deve-se à inúmeras vantagens de caráter industrial, econômico e agrônômico que esta apresenta tais como: facilidade de obtenção, menores custos de produção, menores despesas com transporte e aplicação devido ao maior teor de N, viabilidade de aplicação na forma líquida e ao bom desempenho desse fertilizante em adubações via foliar.

Entretanto, existem informações que indicam ser a uréia menos eficiente do que outras fontes de fertilizantes nitrogenados no desenvolvimento e produção das culturas, particularmente quando aplicada na superfície do solo ou adicionado a pastagens de gramíneas, DEVINE & HOLMES (28); VOLK (108).

Esta menor eficiência da uréia tem sido atribuída, em parte, à perda parcial de N através da volatilização de amônia (NH_3). Este processo de perda tem sido bastante estudado ultimamente, devido à sua grande importância agrônômica e econômica. Embora muitos dos fatores associados com as perdas de N por volatilização de NH_3 tenham sido identificados, estimativas da magnitude dessas perdas variam grandemente entre estudos reportados na literatura (83, 101, 109). As perdas por volatilização de

NH_3 , da uréia aplicada a solos cultivados, podem atingir 50% do N aplicado e, no caso de pastagens, podem chegar a 80%, VOLK (108); ALLISON (03).

A uréia, em condições adequadas de umidade, hidrolisa-se rapidamente formando carbonato de amônio que é instável e que se desdobra em NH_3 - gasosa, CO_2 e água. A amônia formada pode ser retida pelo solo sob a forma de NH_4^+ , ou então ser liberada para a atmosfera, MORTLAND (77). A quantidade liberada depende de vários fatores como tipo de solo (textura, pH, conteúdo de CaCO_3 e atividade de urease), condições ambientais (temperatura, conteúdo de água do solo, precipitação e umidade relativa) e manejo do fertilizante e do solo (dose, época e modo de aplicação, regime de irrigação e sistema de cultivo (35, 37, 49, 53).

Embora os efeitos diretos desses fatores sejam bem compreendidos, as interações entre eles são bastante complexas. De acordo com resultados de pesquisas obtidos por BOUWMEESTER et alii (11), em condições de laboratório, a quantidade de N perdido por volatilização de NH_3 foi pouco afetada pelo conteúdo inicial de umidade do solo, mas principalmente pela precipitação. A aplicação simulada de 40 mm de chuva diminuiu as perdas de N em 30%, independente do conteúdo inicial de umidade do solo. As maiores perdas foram registradas quando as condições de umidade do solo foram mantidas por umidades do ar entre 80 e 95%, sem chuva. Dependendo da quantidade e da intensidade da chuva, as perdas de N pela volatilização de NH_3 podem aumentar ou reduzir. De um lado, a chuva pode aumentar as perdas de N porque ela adi-

ciona água à superfície do solo o que permite a dissolução e hidrólise da uréia. Por outro lado, a chuva tem o potencial para incorporar a uréia ou o N-amoniacal ao solo, reduzindo as perdas por volatilização e aumentando a adsorção. Esta última condição pode acontecer se a chuva é intensa ou relativamente longa. Condições de baixa precipitação que fornece umidade adequada para a hidrólise da uréia, mas é insuficiente para incorporá-la ao solo, resulta em grandes perdas de NH_3 , CRAIG & WOLLUM (25).

A taxa de hidrólise da uréia nos solos pode influenciar a intensidade de perdas de NH_3 . TOMAR et alii (103) verificaram que toda a uréia adicionada ao solo foi hidrolizada em 14 dias, entretanto, aos 4 dias após a aplicação, mais de 50% estava presente como uréia no solo. Verificaram ainda que as maiores perdas de NH_3 ocorreram durante as duas primeiras semanas após aplicação da uréia, declinando após este período. ERNST & MASSEY (35) observaram que a hidrólise da uréia praticamente completou-se em 10 dias e que as maiores perdas de NH_3 por volatilização ocorreram entre o 5º e 6º dias após a aplicação. HARGROVE & KISSEL (53) também observaram que quase toda a uréia havia sido transformada 10 dias após a aplicação, mas que em apenas um dia cerca de 30 a 57% da uréia, foram hidrolizadas.

Pesquisadores tem procurado desenvolver tecnologias que reduzam as perdas extensivas de NH_3 pela adição de materiais à uréia, os quais inibem a dissolução, hidrólise ou aumento no pH associado com a hidrólise. Revestimento com materiais que retar-

dam a dissolução da uréia tem sido eficientes em reduzir as perdas de N por volatilização de NH_3 , MATOCHA (71). Entretanto, a adição desses materiais eleva em demasia os custos dos fertilizantes, sendo estes recomendados somente para o uso em plantas ornamentais, PARR (88). Por outro lado, alguns trabalhos com fertilizantes nitrogenados de liberação controlada, como uréia revestida com enxofre e NH_4NO_3 revestido com calcário, mostraram que estas fontes não foram superiores as fontes convencionais, GROVE et alii (51) e FOX et alii (42). Um grande número de inibidores da urease tem sido testados em anos recentes, mas as doses de aplicação requerida para inibir a atividade da urease no solo torna o seu uso economicamente inviáveis, STUMPE et alii (99).

Dentre as alternativas propostas visando reduzir ou mesmo eliminar as perdas de N-uréia pela volatilização de NH_3 e que tem sido amplamente estudado, está a incorporação da uréia no solo. Quando a uréia é aplicada na superfície do solo, as perdas de NH_3 por volatilização são pronunciadas devido à pouca chance que a NH_3 tem de ser adsorvida ao solo sob a forma de NH_4^+ . FENN & MYAMOTO (38) verificaram que a uréia necessita ser incorporada a 5 cm de profundidade para eliminar as perdas de NH_3 .

Considerável redução nas perdas de NH_3 com o aumento na profundidade de aplicação da uréia foram verificadas por RAO & BATRA (90). A uréia aplicada na superfície do solo apresentou perdas de 60% do N-uréia aplicado, entretanto, quando incorporada ao solo a 7,5 cm de profundidade as perdas reduziram para menos de 10%.

HARGROVE & KISSEL (53) compararam as perdas por volatilização de NH_3 da uréia aplicada na superfície do solo em condições de campo e laboratório. As perdas de NH_3 medidas diretamente no campo foram pequenas (0 a 9% do N aplicado) em relação às obtidas no laboratório (13 a 31% do N aplicado), indicando que as perdas de N por volatilização de NH_3 sob condições de campo podem não ser tão severas como se tem enfatizado. As reações de hidrólise da uréia e as subsequentes perdas de NH_3 e outras reações do solo que afetam a eficiência da uréia devem ser mais estudadas sob condições de campo. A maioria das pesquisas que avaliam o potencial de perdas de N por volatilização de NH_3 dos fertilizantes nitrogenados, tem sido conduzidas em laboratório sob condições de temperatura e umidade constantes. Nas condições de campo, onde esses fatores são dinâmicos, as perdas de NH_3 podem ser consideravelmente diferentes daquelas verificadas no laboratório, HARGROVE & KISSEL (53).

No Brasil, apesar do crescente consumo da uréia, pouca atenção tem sido dada ao problema das perdas de N-uréia pela volatilização de NH_3 . ANJOS & TEDESCO (04) estudaram a volatilização de amônia da uréia e do sulfato de amônio em solos cultivados do Rio Grande do Sul. As perdas foram maiores no caso da uréia, variando de 12 a 30%, porém no caso do sulfato de amônio, as perdas variaram de 0,5 a 1,1%. Em solo sob pastagem, a volatilização de NH_3 da uréia correspondeu 14 a 26% do N aplicado, e, em solo descoberto variou entre 22 a 27%. RODRIGUES (95) conduziu experimento

em laboratório utilizando dois tipos de solos com a finalidade de avaliar as perdas de amônia por volatilização, decorrentes do emprego da uréia em diferentes doses e modos de aplicação. A aplicação da uréia à superfície resultou em perdas de 83 a 91%; a incorporação do adubo à camada 0-2 cm não diminui essas perdas, ou diminuiu-as no máximo em 15%, enquanto que a incorporação a 0-5cm diminuiu em até 64%, e a localização a 5 cm de profundidade em até 100%. O efeito da incorporação ou enterrio da uréia sobre a volatilização foi maior para as doses mais baixas, e mais evidente no solo Podzólico que no Latossolo, talvez devido à maior CTC do primeiro.

Mais recentemente CANTARELA & TABATABAI (19), avaliaram, em condições de laboratório, a extensão das perdas por volatilização de NH_3 em solos ácidos e alcalinos, de vários fertilizantes nitrogenados (uréia, sulfato de amônio, fosfato diamônio, formamida e oxamida), aplicados na superfície do solo descoberto, em sulco raso, misturado ao solo e sobre resíduo de material vegetal. Os resultados mostraram que as perdas de NH_3 provenientes da uréia, aplicada superficialmente em ambos os solos, foram elevadas, atingindo 39 a 54% do N adicionado. Para o sulfato de amônio aplicado superficialmente, as perdas nos solos ácidos foram desprezíveis, mas, nos solos alcalinos foram altas, atingindo 53% do N. Concluíram que a aplicação em sulco (3cm) de qualquer das fontes de N foi a maneira mais eficiente de prevenir as perdas por volatilização.

2.3. Balanço do Nitrogênio no Sistema Solo-Planta

Dois métodos são geralmente utilizados em pesquisas com balanço do nitrogênio no sistema solo-planta, LEGG & MEISINGER (64). O primeiro, envolve o balanço completo do nitrogênio e procura documentar convenientemente o total de ganhos e perdas, sem o uso do isótopo (^{15}N). No segundo, o fertilizante nitrogenado enriquecido com ^{15}N é introduzido no sistema e calcula-se o balanço do ^{15}N -fertilizante. Estes dois métodos diferenciam-se por enfatizarem diferentes propriedades do sistema.

O balanço do N-total baseia-se no ciclo do nitrogênio no sistema através de várias adições e perdas. De acordo com URQUIAGA (106) e REICHARDT et alii (92) o balanço do N-total no sistema solo-planta, consiste na contabilização das entradas (Ne) e saídas (Ns) do nutriente numa determinada camada do solo (L) (que deve incluir todo sistema radicular), num determinado intervalo de tempo ($T_2 - T_1$), isto é:

$$\Delta N = (\sum Ne - \sum Ns) = N_2 - N_1 \text{ ----- } |1|$$

onde ΔN é a mudança no nitrogênio armazenado (kg/ha) em uma determinada camada de solo L (cm) e N_1 , N_2 são as quantidades de N (kg/ha) armazenadas nos tempos T_1 e T_2 , respectivamente, em uma camada de solo L (cm).

As quantidades de nitrogênio que entram no sistema podem ser provenientes da matéria orgânica e/ou fertilizantes (Nf), fixação biológica (Nfb), por chuvas e/ou irrigação (Nch). As saí

das de nitrogênio podem se processar através da lixiviação (Nl), deflúvio superficial (Nd), volatilização (Nv) e colheita (Nc).

Portanto tem-se:

$$\Delta N = \underbrace{(Nf + Nfb + Nch)}_{Ne} - \underbrace{(Nl + Nd + Nv + Nc)}_{Ns} \quad \text{-----} \quad | 2 |$$

Quando se estuda o balanço do nitrogênio em um determinado sistema solo-planta pelo método do N-total (método da diferença) geralmente não se obtém recuperação satisfatória devido a inadequada medida de um ou mais componentes do balanço, incluindo: estimativa indireta do N removido nos grãos, erros nas amostragens de material de solo no início e final do experimento (pequeno número de amostras e/ou amostragens a pequenas profundidades), erros nas análises de N-orgânico ou para incluir nitrato (NO_3^-) na determinação do N-total, LEGG & MEISINGER (64).

Em experimentos conduzidos em Piracicaba - SP., em Terra Roxa Estruturada (Alfisol), com o objetivo de estudar a dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), LIBARDI & REICHARDT (65) e URQUIAGA (106), não detectaram grandes variações na quantidade de N-total armazenado no perfil do solo (0 - 120cm) durante o ciclo da cultura, tanto no solo original como no solo das parcelas que haviam recebido 40 e 120 kg N-fertilizante/ha. As mudanças contraditórias da variação da armazenagem de nitrogênio no solo, podem ser devidas a erros que ocorrem na estimativa da quantidade de N-total no solo, URQUIAGA (106).

Em um Latossolo Vermelho-Escuro, localizado no Centro de Pesquisas Agropecuária dos Cerrados, Planaltina, D.F., GROVE et alii (51) verificaram que o N-total do solo na camada de 0 -30 cm das parcelas que não haviam recebido fertilizante nitrogenado não alterou significativamente durante um período de seis cultivos sucessivos com a cultura do milho, embora 402 kg N/ha tenham sido removidos na matéria seca (palha + grãos). Esta quantidade removida correspondeu a aproximadamente 10% do N-total do solo, determinado no início do experimento. Resultados semelhantes foram verificados por FOX et alii (42) em quatro cultivos sucessivos com as culturas de milho e sorgo em Oxisols e Ultisols, em Porto Rico.

As análises para quantificar as mudanças no N-total do solo têm sido insatisfatórias devido as dificuldades de amostragens, e, também, porque os métodos químicos para determinação de N-total não são suficientemente adequados para medir pequenas perdas na presença de quantidades relativamente grandes de nitrogênio do solo, CARTER et alii (20).

Através do uso do isótopo (^{15}N), é possível medir com satisfatória precisão a quantidade de N-fertilizante recuperado pela cultura, o que permanece no solo, sendo as perdas estimadas indiretamente como fração do ^{15}N -fertilizante adicionado não recuperado na planta ou solo, BURESH et alii (16).

Este método de experimentação aumenta em muito a precisão com que pequenas quantidades de N-fertilizante podem ser de-

terminadas na presença de grandes quantidades de nitrogênio do solo, ALLISON (03). Elimina, também, alguma possibilidade de interferência como resultado da fixação não simbiótica de nitrogênio, adsorção de gases de nitrogênio do ar ou adições pelas chuvas. Por outro lado, o método não possibilita medir perdas totais por volatilização porque este não avalia perdas de nitrogênio do solo.

Entretanto, NÖMMIK (83) tem proposto que a volatilização de NH_3 pode ser avaliada com precisão sob condições de campo através da adição de uréia marcada com ^{15}N para microparcelas isoladas verticalmente, e subsequente recuperação do ^{15}N -uréia no sistema solo-planta. O método requer que perdas por lixiviação e/ou desnitrificação não ocorram durante o período experimental.

2.3.1. Uso do Isótopo (^{15}N) no Estudo do Balanço do Nitrogênio no Sistema Solo-planta

Diversos autores tem revisado e discutido as vantagens e desvantagens do uso do isótopo ^{15}N em estudos do balanço de nitrogênio (55, 56, 57, 64). A principal vantagem está no aumento da sensibilidade em traçar o destino do nitrogênio do fertilizante no sistema solo-planta. Entretanto, na prática, este aumento na sensibilidade pode ser eliminado por problemas de amostragens, CARTER et alii (20). As principais fontes de erros são frequentemente associadas com a estimação da massa de solo por unidade de volume (determinação incorreta da densidade aparente), produção de matéria seca, etc, e essas fontes frequentemente determinam a

precisão dos dados finais, LEGG & MEISINGER (64).

O uso do isótopo (^{15}N) pode, assim, aumentar a precisão nos trabalhos do balanço do nitrogênio se estimativas reais dos vários compartimentos do nitrogênio possam ser obtidos através de coleta de amostras representativas para análises, experimentos com adequado número de repetições e controle local, LEGG & MEISINGER (64).

A maior limitação do método do traçador (^{15}N) é o alto custo inicial do material experimental e equipamento envolvido. Entretanto, essas limitações tem sido diminuídas pelos recentes avanços nos processos de separação do isótopo, instrumentação e metodologia, HAUCK & BREMNER(57).

O elevado custo do isótopo (^{15}N) limita o seu uso em grande escala a nível de campo ou a alto nível de enriquecimento. Entretanto, é possível utilizá-lo em condições de campo, em pequenas parcelas experimentais, mesmo considerando a influência dos fatores do solo nas perdas de gases, movimento do nitrogênio e absorção pela planta do nitrogênio nativo do solo, se técnicas adequadas são disponíveis para o uso de fertilizantes com baixo nível de enriquecimento, CARTER et alii (20).

Um grande número de experimentos tem sido conduzidos utilizando-se da técnica do isótopo (^{15}N). Entretanto, de acordo com Hauck, citado por CAMPBELL & PAUL (17), são poucos os trabalhos que dão informações úteis ao cálculo do balanço do nitrogênio. Além disso, a maioria dos estudos do balanço do nitrogênio

tem sido conduzidos em casa-de-vegetação. Os resultados obtidos em tais estudos podem ser diferentes daqueles encontrados sob condições de campo. Por outro lado, poucos resultados de experimentos de campo, que incluem análises de solo, tem sido publicados, o que impossibilita quantificar perdas de nitrogênio por lixiviação, ALLISON (03).

Nos estudos do balanço do nitrogênio, as principais culturas testes tem sido: cevada, aveia, trigo e arroz (17, 30, 86, 104). Isto deve-se ao fato de que experimentos com essas culturas podem ser conduzidos em pequenas parcelas requerendo assim, menores quantidades de ^{15}N . Experimentos sobre o balanço do nitrogênio na cultura do milho, usando ^{15}N , não são comuns em condições de campo, visto que a necessidade de parcelas experimentais maiores elevam em demasia os custos do fertilizante marcado, LEGG & MEISINGER (64).

No Quadro 2, encontram-se resumidos os resultados de experimentos sobre o balanço do nitrogênio no sistema solo-planta, utilizando-se da técnica do isótopo ^{15}N , conduzidos em condições de campo com as culturas de milho (*Zea mays* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Estes, foram realizados em diferentes condições edafoclimáticas, abrangendo regiões de clima, temperado (10, 41, 63, 84) e tropical, MORAGHAN et alii (75;76) e solos classificados como Mollisol, BIGERIEGO et alii (10); Chernozem, FILIPOVIC (41); Vertisol, MORAGHAN et alii (76) e Alfisol, MORAGHAN et alii (75). A maioria desses experimentos relatam resultados os quais são, principalmente, de interesse local e relacionados a recuperação do N-

QUADRO 2 - Recuperação do ¹⁵N-fertilizante no sistema solo-planta e respectivas perdas em experimentos sobre o balanço do nitrogênio.

Cultura	Fontes ^{1/} Nitrogênio	Doses Nitrogênio (kg.ha)	% Recuperação do N-aplicado			Perdas %	Referên- cias
			Cultura	Solo	Balanço Total recuperado		
Milho	S. Amônio (6)	50	30	46	76	24	(84)
		150	36	40	76	24	
Milho	S. Amônio (10)	120	36	38 - 43	74 - 79	19 - 25	(41)
Milho	S. Amônio (-0,0099)	56	65 - 83	4 - 14	69 - 97	3 - 31	(10)
		112 - 168	58	17 - 34	75 - 92	8 - 25	
Milho	Nitrato Amônio (-0,012)	84 - 168	32 - 33	39 - 42	71 - 75	25 - 29	(63)
Sorgo	Uréia (5)	74 - P ^{2/}	56	38	94	6	(76)
		74 - S	30	42	72	28	
		74 - I	29	45	74	26	
Sorgo	Uréia (5)	40	47	47	94	6	(75)
		80	50	33	83	17	
		120	54	31	85	15	
		160	51	28	79	21	

1/ Número entre parênteses referem-se ao nível de enriquecimento usado, em átomos % de ¹⁵N em excesso. Número com sinal negativo indica empobrecido em ¹⁵N ou "depletion".

2/ Refere-se aos métodos de aplicação do nitrogênio: P= aplicação parcelada; S= aplicado na superfície após o plantio; I= incorporado ao solo a 10 cm antes do plantio.

fertilizante aplicado por uma única colheita, como afetado por várias características de solos e práticas de manejo, tais como: fontes, doses, métodos e épocas de aplicação do fertilizante. Os dados do Quadro 2 mostram que a recuperação do N-fertilizante pelas culturas variam de valores tão baixos como 30% e tão altos como 83%, entretanto, valores em torno 50% são os mais comumente observados. Outra característica importante desses resultados é que grandes quantidades (40%) do N-fertilizante, permanecem no solo como nitrogênio residual, sendo a maior proporção encontradas nas camadas superficiais (< 30cm), principalmente na forma orgânica, indicando assim a importância da imobilização do N-fertilizante na matéria orgânica do solo. Falta entretanto, informações sobre a capacidade de aproveitamento desse nitrogênio residual pelas culturas subsequentes.

Os resultados do balanço do nitrogênio apresentados no Quadro 2, indicam recuperação do N-fertilizante no sistema solo-planta, valores variando de 70 a 97%, o que está de acordo com os resultados de outros experimentos revisados por Kunder, citado por WESTERMAN et alii (111) e HAUCK (56), também envolvendo diferentes sistemas culturais e métodos experimentais. As perdas observadas nesses experimentos (Quadro 2), consideradas como a diferença entre o N-fertilizante aplicado e aquele recuperado na planta e solo, foram atribuídas, principalmente, aos processos de desnitrificação e/ou volatilização de amônia, indicando assim, limitada evidência de perdas por lixiviação, devido as pequenas quantidades de N-fertilizante encontradas nas camadas mais profundas

(100 - 200 cm) dos perfis dos solos.

No Brasil, as primeiras contribuições ao estudo do balanço do nitrogênio no sistema solo-planta, utilizando-se da técnica do isótopo (^{15}N), foram os trabalhos conduzidos em Piracicaba-SP, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA (65,72, 93). Outros experimentos, utilizando ^{15}N , foram também conduzidos (59, 79, 81). Entretanto, estes trabalhos referem-se à eficiência de utilização do N-fertilizante pelas culturas, não considerando o balanço do nitrogênio no sistema solo-planta.

REICHARDT et alii (93), estudaram a dinâmica do nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.) em Latossolo Vermelho-Amarelo fase arenosa, utilizando sulfato de amônio enriquecido em ^{15}N (1,201 átomos % em excesso). Dos 80 kgN/ha aplicados (1/3 no plantio e 2/3 em cobertura), 71 kg N/ha (89%) foram absorvidos pela cultura, sendo que apenas 0,4 kg N/ha perdido por lixiviação no perfil do solo (>120 cm). O restante (8,0 kg N/ha) deve ter permanecido no solo uma vez que as perdas por desnitrificação e volatilização foram desprezíveis.

Em um solo, Terra Roxa Estruturada, MEIRELLES et alii (72) estudaram dois caminhos seguidos pelo fertilizante nitrogenado aplicado a uma cultura de feijão: a fração perdida com a solução do solo por percolação à profundidade de 120 cm e aquela absorvida pela planta. Sulfato de amônio enriquecido em ^{15}N (3,657 átomos %) foi aplicado por ocasião do plantio, na dose de 100kgN/ha. Do N-fertilizante aplicado, 30 kgN/ha foram recuperados pela

cultura e 1,35 kgN/ha perdido por lixiviação no perfil do solo.

LIBARDI et alii (66) estudaram o balanço do ^{15}N aplicado como uréia, em Terra Roxa Estruturada (Alfisol), em três cultivos sucessivos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L, var. "carioca"). Os resultados mostraram que 31,2% do nitrogênio na primeira cultura foi proveniente da uréia aplicada (100 kgN/ha), o que representa uma eficiência de utilização do nitrogênio de 38,5%. A segunda cultura recuperou 6,2% do nitrogênio aplicado na primeira cultura e somente 1,4% do nitrogênio na terceira cultura foi derivado do fertilizante. No total, as três culturas recuperaram 44,3% do nitrogênio aplicado. Ao final do segundo e terceiro cultivos, o balanço indicou recuperação de 75,0 e 80,0 kgN/ha, respectivamente, mostrando que 20 a 25% do N aplicado perdeu-se do sistema. Os autores sugerem que perdas por volatilização e desnitrificação foram pequenas nas condições dos experimentos, admitindo portanto que cerca de 20 - 25 kg/ha de N do fertilizante foram lixiviados para camadas abaixo de 120 cm.

Trabalhando no mesmo solo, URQUIAGA (106), utilizando sulfato de amônio com alto nível de enriquecimento (56 átomos % ^{15}N em excesso), aplicado na dose de 42 kgN/ha (1/3 no plantio e 2/3 em cobertura), em uma cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L, var. carioca), obteve recuperação do N-fertilizante no sistema solo (0 - 135 cm) - planta, de 95%. Desse total, 71% (30 kg N/ha) foram utilizados pela cultura e 24% (10 kg N/ha) ficaram no solo como nitrogênio residual, concentrando-se na camada superficial (0-45cm).

2.4. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado

A avaliação da eficiência do uso de fertilizantes envolve um conjunto de estudos que inclui a necessidade de conduzir experimentos de campo ou casa de vegetação, cuidadosamente planejados, sob diversas condições edafoclimáticas. O objetivo principal da avaliação, em princípio, é estabelecer margens de eficiência com as práticas atuais de manejo e, em fase posterior, aumentar ao máximo a eficiência mediante o uso de práticas melhoradas.

O elevado custo dos fertilizantes, principalmente os nitrogenados, e a recente preocupação com a possível presença de nitrato na água do solo e dos rios, o que pode vir a ser um poluente, tem direcionado a atenção para a eficiência de recuperação do nitrogênio pelas culturas, WESTERMAN et alii (111). De acordo com HAUCK & BREMNER (57), o crescente interesse para maximizar a eficiência do uso do fertilizante nitrogenado na produção das culturas pode ser avaliado pelo aumento exponencial do uso do isótopo ^{15}N para estudar a absorção do nitrogênio aplicado.

Experimentos conduzidos para verificar a recuperação do nitrogênio pelas culturas usando o método do isótopo ^{15}N e o método indireto, revisados por ALLISON (03), indicaram que para uma simples colheita, sob condições ideais de campo, recuperação máxima variando de 50 a 70%, sendo entretanto, na maioria das vezes inferiores a esses valores.

Em experimentos conduzidos em Porto Rico, utilizando ^{15}N

veis de nitrogênio: 0; 34; 67 e 134 kg/ha, e épocas de aplicação: incorporado ao solo antes do plantio e em cobertura 3 a 5 semanas após, FOX et alii (42) encontraram valores de recuperação aparente do fertilizante pela cultura do milho (*Zea mays* L.) variando de 0 a 65%. Baixa recuperação geralmente esteve associada com a falta de resposta a nitrogênio e ou a ocorrência de altas precipitações após a aplicação do fertilizante antes do plantio. Eliminando os dados dos experimentos onde não houve resposta à adubação, em média 60% do nitrogênio aplicado foi recuperado quando se aplicou 67 kg N/ha, 3 a 5 semanas após o plantio. Entretanto, a recuperação diminuiu para 32% quando essa mesma quantidade foi aplicada a lãço e incorporada ao solo antes do plantio.

TOMAR & SOPER (104), usando uréia marcada com ^{15}N (19,2 átomos % ^{15}N) em dois métodos de aplicação, em experimento conduzido em lisímetro, com uma adubação de 100 kg N/ha, obteve recuperação do ^{15}N -fertilizante pela planta de cevada (*Hordeum vulgare* L.) variando de 23,0 a 43,0%, para a uréia aplicada na superfície do solo, e entre 42,0 a 53,0% quando incorporada ao solo em sulcos de 10 cm de profundidade, ao lado das plantas.

WESTERMAN et alii (111), comparando uréia e oxamida, ambas marcadas com ^{15}N , em experimentos de campo, utilizando sorghum sudan como planta teste, verificaram recuperação similar do ^{15}N -fertilizante para as duas fontes. No N adicionado, 51 e 52% foi recuperado pela cultura, respectivamente, para uréia e oxamida.

Em experimentos visando comparar fontes de nitrogênio:

sulfato de amônio, uréia granulada e solução com 30% N (mistura de uréia + nitrato de amônio na proporção de 1:1), nas doses de 0; 45; 90; 135 e 180 kg N/ha, aplicadas na superfície do solo para a cultura do milho em plantio direto, BANDEL et alii (08) verificaram que a recuperação aparente pelo método indireto foi de 50% para o nitrato de amônio e 29% em média para as demais fontes. Resultados semelhantes foram relatados por MILLER & MACKENZIE (74), comparando nitrato de amônio e uréia revestida com enxôfre, incluindo também, alguns adubos orgânicos.

No Brasil, existem poucas informações sobre a eficiência de utilização dos fertilizantes nitrogenados. Na sua quase totalidade, os trabalhos conduzidos se limitam à verificação dos efeitos da adubação sobre a produção, conforme revisado por FRANÇA et alii (44).

Trabalhos realizados sob a coordenação da AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA - IAEA (59), em vários países, inclusive no Brasil, sobre o manejo de nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.), utilizando-se ^{15}N , revelaram que a porcentagem de utilização do ^{15}N do fertilizante pelas plantas (grãos + palha) variou de valores muito baixos (20%) até valores altos (>70%), com média de 40% para todos os países.

Em solo Podzólico, textura barro-arenoso, NEPTUNE (79), utilizando 100 kg N/ha, na forma de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, obteve eficiência de utilização do fertilizante pela cultura do milho variando de 39,5 a 57,8%, sendo maior quando o nitrogênio foi aplicado aos

40 dias após a semeadura.

GROVE et alii (51), trabalhando com níveis de N na cultura do milho, em um Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado, verificaram que a recuperação aparente do fertilizante nitrogenado variou com a dose aplicada. Na dose de 60 kg N/ha, a recuperação pelas plantas foi de 60%. Entretanto, com a aplicação de 220 kg N/ha, a recuperação foi de apenas 35%. Resultados semelhantes foram encontrados por FRANÇA et alii (44), para as culturas de milho, sorgo e trigo cultivadas em solo Aluvial e Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado.

ULLOA et alii (105), estudando a utilização do nitrogênio por dois híbridos de milho, através do uso da uréia enriquecida com ^{15}N , verificaram que a eficiência de recuperação do fertilizante nitrogenado aumenta conforme avançam os estádios de desenvolvimento da cultura, tornando-se máxima (30%) na fase de maturação; 19,4% do N-fertilizante foi encontrado nos grãos e 10,6% na palhada. Resultado semelhante foi obtido por ARAUJO SILVA (06), que estudando os movimentos e perdas por lixiviação do N-fertilizante, encontrou uma eficiência de utilização de cerca de 30% aos 75 dias após a germinação do milho.

REICHARDT et alii (93), encontraram para a cultura do milho, eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado de 89,0%, com aplicação de sulfato de amônio - ^{15}N , na dose de 80 kg N/ha, num solo relativamente pobre em nitrogênio. Este alto valor possivelmente se deve ao fato de que houve uma distribuição

uniforme da precipitação pluvial durante o período que compreendeu o experimento, o que favoreceu a recuperação do nitrogênio pelas plantas.

2.5. Métodos para Determinar a Recuperação do Nitrogênio

A recuperação ou eficiência de utilização do nitrogênio pelas plantas pode ser calculada pelos seguintes métodos:

2.5.1. Método Direto ou Isotópico - ^{15}N

A quantidade do nitrogênio aplicado, que é absorvido pelas plantas, é calculada dos resultados do nitrogênio total e análises da relação isotópica ($^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$) do nitrogênio de amostras de plantas coletadas nas parcelas que receberam fertilizantes nitrogenados enriquecidos com ^{15}N .

Entre as fórmulas propostas para calcular a porcentagem de recuperação do nitrogênio do fertilizante pelas plantas, pode-se citar por exemplo a equação sugerida por HAUCK & BREMNER(57).

$$\% \text{ N-recuperado} = \frac{100 \cdot P(c-b)}{f(a-b)} \quad \text{-----} \quad |3|$$

onde P é o N-total (meq) na planta, f o N-total aplicado (meq), e a, b e c, são as concentrações de átomos % de ^{15}N no fertilizante, no solo ou plantas das parcelas não fertilizadas e plantas das parcelas que receberam ^{15}N , respectivamente.

2.5.2. Métodos Indiretos

2.5.2.1. Método da Diferença

O N absorvido pela planta é calculado como a diferença entre o N-total absorvido nas plantas das parcelas adubadas $(NT)_F$ e aquele absorvido pelas plantas das parcelas controle $(NT)_C$, dividido pela quantidade de nitrogênio aplicada $(N)_A$, que pode ser expresso pela equação:

$$\%N - \text{recuperado} = \frac{(NT)_F - (NT)_C}{(N)_A} \times 100 \quad | 4 |$$

2.5.2.2. Método da Regressão Linear

Quando vários níveis de N são usados, a recuperação pela cultura do N aplicado pode ser calculada pela regressão linear:

$$Y = a + bx \quad | 5 |$$

onde \underline{Y} é o N-total nas plantas, \underline{a} é a interseção que representa o N-total nas plantas da parcela testemunha e \underline{b} é o coeficiente de regressão ($b \times 100 =$ porcentagem de recuperação do nitrogênio aplicado), HAUCK & BREMNER (57).

2.6. Considerações Sobre os Métodos de Determinar a Recuperação do Nitrogênio

Algumas considerações sobre os métodos de determinar a

recuperação do nitrogênio em testes vegetativos são necessárias. Os métodos são bastante conhecidos, mas, deve-se mencionar que eles não determinam exatamente a mesma coisa.

Os métodos indiretos assumem que a mineralização, imobilização e outras transformações do nitrogênio são as mesmas tanto para o solo adubado ou não adubado. Embora esta pressuposição não seja válida, ela é usualmente feita durante a interpretação de dados obtidos de experimentos convencionais sem o uso de elementos traçadores (^{15}N), HAUCK & BREMNER (57).

A aplicação do fertilizante altera a quantidade de nitrogênio disponível, favorecendo a mineralização da matéria orgânica existente no solo, MALAVOLTA (69). O aumento do N disponível para as plantas, resultante da mineralização da matéria orgânica, é conhecido por alguns pesquisadores como "priming effect" (45, 85, 110). Outro aspecto a ser considerado, relaciona-se com o efeito do nitrogênio sobre o crescimento do sistema radicular das plantas. A adição de nitrogênio estimula a proliferação do sistema radicular para a formação de novas raízes ou alongamento das já existentes, possibilitando melhor aproveitamento do fertilizante, GASS et alii (48).

Os efeitos da adição de nitrogênio no solo normalmente levam a obter valores de recuperação do N do fertilizante pela cultura, calculados pelos métodos indiretos, superiores aos valores obtidos pelo método isotópico (^{15}N), FRIED et alii (46). Entretanto, de acordo com ALLISON (03) os métodos indiretos podem

resultar em valores mais altos ou mais baixos em relação ao método isotópico (^{15}N) e, em determinadas condições, esses métodos podem fornecer dados semelhantes de recuperação.

CARTER et alii (20), verificaram em condições de campo, com a cultura de capim sudão (*Sorghum sudanense*), pouca diferença entre a técnica do N-total (método da diferença) e a técnica do ^{15}N (método direto) nos valores de recuperação do N-fertilizante pela planta, atribuindo a isto, o baixo conteúdo de N do solo e as altas doses de fertilizante (336 e 672 kg N/ha) utilizadas.

Resultados semelhantes foram observados por OLSON (84) em experimentos com milho (*Zea mays* L), em um solo com alta capacidade de suprimento de nitrogênio (156 kg/ha) e com doses de 50 e 150 kg N/ha. Entretanto, comparando a recuperação do N-fertilizante pelos métodos, isotópico (^{15}N) e indireto (diferença), verificou-se que o método da diferença apresentou maiores variações nos resultados das porcentagens do nitrogênio absorvido do fertilizante, como mostrado pelos altos valores do desvio padrão.

Outro aspecto a ser considerado, é que a recuperação aparente do fertilizante calculada pelos métodos indiretos depende grandemente de boas estimativas do nitrogênio absorvido pela cultura no tratamento controle (0 kg N/ha), e que variações não explicada na produção desse tratamento resulta em estimativas inadequadas do nitrogênio absorvido, DOWDELL & WEBSTER (30). Consequentemente, os dados de recuperação aparente variam consideravelmente, fornecendo, às vezes, valores negativos, OLSON & SWALLOW

(86), os quais são de difícil interpretação e devem ser usados com extrema precaução.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização do Experimento

O experimento foi conduzido em condições de campo, em área experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS-EMBRAPA), localizado no município de Sete Lagoas, MG. (km 65 da Rodv. MG 424), situado à latitude de 19°28'S, longitude de 44°15'08"W Gr, altitude de 732 m, região fisiográfica da Zona Metalúrgica do estado de Minas Gerais.

3.2. Características Edafo-climáticas

Utilizou-se área de solo classificado como Latossolo Vermelho-Escuro Epidistrófico Endoálico A moderado textura muito argilosa relêvo suave ondulado, fase cerrado, de acordo com o sistema Brasileiro de Classificação.

As características físicas e químicas de um perfil do solo utilizado neste estudo e localizado em uma trincheira aberta próxima a área experimental são apresentadas nos Quadros 1A e 2A, respectivamente (Apêndice).

O clima da região enquadra-se no tipo AW, ou seja, clima de savana, caracterizado por apresentar temperatura do mês mais frio acima de 18°C , de acordo com a classificação de Köppen, AVELAR (07).

Dados climáticos coletados na Estação Meteorológica Principal de Sete Lagoas, localizada na área, no período de 1931 a 1980, AVELAR (07), mostram que a temperatura média anual é de $22,1^{\circ}\text{C}$, cuja amplitude de variação anual entre a temperatura média do mês mais quente e a do mês mais frio está em torno de 5°C . A precipitação média anual é da ordem de 1340 mm, com período de seca e de chuva bem definido, ocorrendo as maiores precipitações em dezembro (305,9 mm) e as menores no trimestre junho a agosto (6,3 mm). A evaporação apresenta valores maiores nos meses de agosto a setembro (124,5 e 131,5 mm) e menores em dezembro, fevereiro e abril (média de 69,4 mm). A umidade relativa é mínima nos meses de agosto e setembro (62%), alcançando valores mais elevados em dezembro, janeiro e fevereiro (77%). A insolação apresentou, de dezembro a março valores médios abaixo de 225 horas. O máximo obtido foi em agosto (287 horas) e o mínimo em dezembro (169 horas).

As variações de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) precipitação (mm), irrigação (mm) e da evapotranspiração de referência - ET_0 (mm), estimada pelo método de Penman, corrigido para a região de Sete Lagoas durante o desenvolvimento da cultura do milho são apresentados na Figura 1A (Apêndice).

3.3. Caracterização Química do Solo

Em vista da área ter sido corrigida e cultivada em anos anteriores, foram feitas amostragens de material de solo, visando sua caracterização química, assim como determinar as necessidades corretivas e/ou de adubação para implantação da cultura.

Para o procedimento de amostragem, a área experimental foi dividida em parcelas (8,0 x 7,0 m), retirando-se cinco amostras simples formando uma amostra composta, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. Determinou-se pH, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P, N-total e MO, EMBRAPA (34). Os resultados são apresentados no Quadro 3, onde verifica-se valores distintos da descrição do solo original (Quadro 2A), pelos motivos comentados anteriormente.

3.4. Calagem

Para uma melhor uniformização da área, foi feita aplicação de calcário, o qual apresentava as seguintes características químicas: CaO 28,86%; MgO 17,4% e PRNT = 91%. O calcário na dose de 2,2 t/ha, corrigido para PRNT = 100%, foi aplicado na superfície do solo e incorporado de 0-20 cm através da aração e gradagem em outubro de 1985.

3.5. Ensaio em Branco

A variação e direção do gradiente de fertilidade do solo pode ser estimada através dos ensaios em branco ou de uniformi

QUADRO 3 - Resultados das análises de algumas características químicas do solo em estudo.
Sete Lagoas - MG, 1987.

Características químicas	Profundidade (cm)				Interpretação ^{2/}
	0 - 20		20 - 40		
	Amplitude	Média ^{1/}	Amplitude	Média ^{1/}	
pH (água)	5,20 - 5,80	5,45 ± 0,030	5,20 - 5,70	5,40 ± 0,030	acidez média
Al ³⁺ (eq.mg/100cc)	0,00 - 0,45	0,15 ± 0,022	0,00 - 0,50	0,18 ± 0,026	baixo - médio
Ca ²⁺ (eq.mg/100cc)	1,97 - 3,80	2,82 ± 0,097	1,94 - 3,79	2,71 ± 0,096	médio
Mg ²⁺ (eq.mg/100cc)	0,39 - 0,95	0,61 ± 0,029	0,36 - 0,95	0,59 ± 0,029	médio
K ⁺ (ppm)	33,0 - 76,0	53,13 ± 2,34	27,0 - 65,0	53,0 ± 1,910	médio
P (ppm)	2,0 - 6,0	3,73 ± 0,20	1,0 - 5,0	3,13 ± 0,210	baixo
NH ₄ ⁺ (ppm) ^{3/}	- -	4,68	- -	4,74	-
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ (ppm) ^{3/}	- -	2,53	- -	2,58	-
N - total (%)	0,12 - 0,36	0,17 ± 0,032	0,12 - 0,15	0,13 ± 0,0018	médio-alto
M.O. (%)	2,80 - 4,03	3,40 ± 0,045	2,86 - 3,76	3,33 ± 0,043	médio-alto

^{1/} Dados médios de 30 repetições

^{2/} De acordo com a COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (23)

^{3/} Dados obtidos na época de semeadura do milho, pelo método descrito por BURESH et alii (16)

dade, que além de fornecerem estimativas do coeficiente de heterogeneidade do solo, possibilitam determinar o tamanho ótimo de parcelas e número de repetições.

Com estes objetivos, a área experimental foi semeada com milho (híbrido Cargill 111S), em junho de 1986, utilizando-se o espaçamento de 1m entre linhas e densidade de 5 sementes/m. Não foi realizada qualquer tipo de adubação. Durante o desenvolvimento vegetativo da cultura, toda área foi submetida a práticas culturais uniformes (irrigação, capinas e controle de pragas), de tal forma que as diferenças em produção pudessem ser atribuídas fundamentalmente a heterogeneidade do solo. Na colheita realizada em agosto de 1986 (plantas no estágio de florescimento masculino), a área foi dividida em parcelas de 5,0 x 1,0 m ($5m^2$), denominadas unidades básicas, as quais foram colhidas individualmente e identificadas por meio de um sistema de coordenadas de linhas e colunas.

Os dados de produção de matéria verde foram analisados segundo metodologia proposta por FEDERER (36), obtendo-se uma estimativa do coeficiente de heterogeneidade do solo (b), cujo valor foi 0,4344. Tal valor indica que o solo apresenta um grau médio de uniformidade dentro da área experimental. O coeficiente varia de zero (0) a um (1), onde o valor zero (0) corresponde a uma completa homogeneidade e o valor um (1) completa heterogeneidade do solo, FEDERER (36).

Para a determinação do tamanho ideal de parcela, utili-

zou-se metodologia proposta por HATHEWAY & WILLIAMS (54). Os resultados mostraram que para a cultura do milho, e na área estudada, o tamanho ideal da parcela para experimento com 10 (dez) tratamentos é de aproximadamente 18 m^2 de área útil, utilizando-se quatro repetições, o que permite detectar diferenças percentuais entre duas médias de tratamento da ordem de 10 a 11%, para um coeficiente de variação de 10%.

3.6. Delineamento Experimental e Tratamentos

O experimento foi realizado em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, constando de oito tratamentos básicos, envolvendo fontes de nitrogênio, doses e métodos de aplicação, como mostrado no Quadro 4.

3.7. Parcela Experimental

A parcela experimental constou de uma área de 56 m^2 ($8,0 \text{ m} \times 7,0 \text{ m}$), com 7 linhas de milho espaçadas em $1,0 \text{ m}$. Para os tratamentos que receberam $^{15} \text{N}$, foi demarcada, a $1,0 \text{ m}$ da extremidade, uma microparcela com as dimensões de $2,6 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ ($7,8 \text{ m}^2$), para aplicação da uréia que continha 45,88%N, enriquecida com 5,505 átomos % de $^{15} \text{N}$ em excesso, para estudo do balanço do N no sistema solo-planta, por ocasião do cultivo de milho (*Zea mays* L). As microparcelsas foram protegidas nas laterais por quadros de madeira de dimensões idênticas às mesmas, e altura de 15 cm , sendo cravados 5 cm no solo e tendo no interior uma lona plástica de 30 cm de

QUADRO 4 - Fontes, doses e métodos de aplicação de nitrogênio nos tratamentos utilizados.

Nº Trat.	Fonte N	Dose de N (kg/ha)		Método de Aplicação
		Plantio	Cobertura	
01	-	0	0	-
02	Uréia	10	0	-
03	Uréia	10	30	incorporada**
04	Uréia*	10	60	superfície
05	Uréia*	10	60	incorporada
06	S. Amônio	10	60	superfície
07	Uréia	10	120	incorporada
08	Uréia	10	240	incorporada

* Uréia enriquecida com 5,505 átomos % de ^{15}N em excesso

** Incorporada a aproximadamente 7,5 cm

largura, cravada 10 cm no solo. Estes quadros de madeira tem por finalidade evitar a perda do fertilizante nitrogenado por esco_rri_mento superficial com a água da chuva ou de irrigação.

Na área, ao redor da microparcela foi aplicado como fonte de nitrogênio, uréia comercial que continha 45% N, não enriquecida com ^{15}N .

A Figura 1 ilustra em detalhes a parcela experimental e a disposição da microparcela para aplicação da uréia enriquecida com ^{15}N .

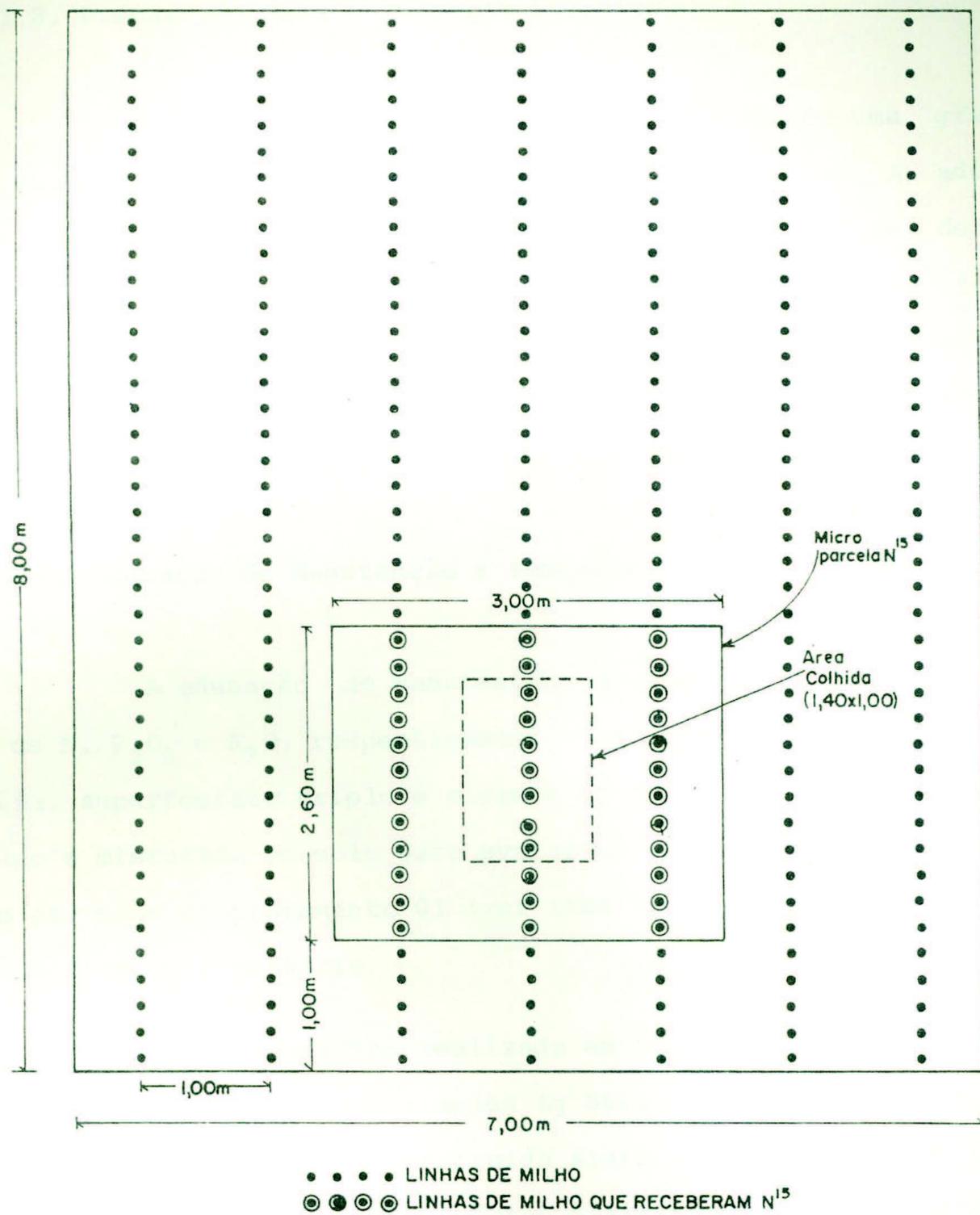


FIGURA 1 - Detalhes da parcela experimental mostrando a disposição da microparcela para aplicação da uréia enriquecida com N¹⁵.

3.8. Preparo do Solo e Adubação Corretiva

O preparo do solo foi realizado através de uma gradagem pesada, seguida por uma gradagem leve, niveladora. A adubação corretiva constou de uma mistura de PK + Zn, nas doses de 200 kg P_2O_5 /ha; 100 kg K_2O /ha e 9 kg Zn/ha, utilizando-se como fonte de adubos o superfosfato triplo, cloreto de potássio e sulfato de zinco, respectivamente. A aplicação foi a lanço e incorporou-se ao solo na profundidade de 10 cm por meio de uma enxada rotativa.

3.9. Adubação de Manutenção e Semeadura

A adubação de manutenção, na dose de 10 - 90 - 60 kg/ha de N, P_2O_5 e K_2O , respectivamente, utilizando como adubos a uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, foi aplicada no sulco e misturada ao solo para evitar contato com as sementes. Nas parcelas do tratamento 01 (ver item 3.6.) foram aplicados somente fósforo e potássio.

A semeadura foi realizada em 01.10.1986, utilizando-se sementes de milho híbrido simples Ag 8621, fornecidas pela Agroceres S.A., e tratadas com inseticida sistêmico, Semevim, na dosagem de 2,0 l/100 kg semente. Foram distribuídas manualmente 10 sementes/m linear de sulco, e coberta com uma fina camada de terra.

3.10. Aplicação de Herbicida

Visando o controle das plantas daninhas, após a semeadura, foi aplicado herbicida Primextra 500 CG, na dosagem de 8,0 l/ha, seguido por uma irrigação, com aplicação de uma lâmina de 13 mm de água. Devido a grande eficiência do herbicida no controle das plantas daninhas não foram necessárias capinas durante o ciclo da cultura.

3.11. Irrigação

Foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão, empregando-se aspersores ZAD-30 com dois bocais de 3,8 x 3,8 mm, no espaçamento de 12 m x 16 m, sendo duas linhas, com 12 aspersores cada uma, dispostas nas laterais da área experimental visando uma distribuição uniforme da água.

A necessidade de irrigação foi estimada através do balanço de água no solo, conforme exemplificado no Quadro 3A (Apêndice). A evapotranspiração real ou da cultura (ETr), foi obtida multiplicando-se o valor da evapotranspiração potencial ou de referência (ETo), pelo coeficiente de cultura (kc), obtido para as condições de Sete Lagoas, EMBRAPA (33). O valor de ETo foi estimado pelo método de Penman, corrigido para as condições de Sete Lagoas, EMBRAPA (33). O balanço de água no solo foi calculado diariamente, subtraindo o valor da ETr da água armazenada no solo (0 - 100 cm) e somando os dados de precipitação e/ou irrigação.

A água armazenada no solo foi estimada pela soma das lâminas de água (mm) nas camadas de 0-10; 10-25; 25-45; 45-70 e 70 - 100cm, no dia antecedente a sementeira, e serviu como ponto de partida para determinar a necessidade de irrigação.

A quantidade de água aplicada em cada irrigação foi avaliada através de coletores distribuídos na área experimental, e os dados de precipitação foram obtidos em pluviômetro localizado próximo ao experimento.

A umidade do solo nas parcelas que receberam 60kgN/ha, na forma de uréia incorporada, foi periodicamente avaliada pelo uso de blocos de resistência elétrica, instalados nas profundidades de 10; 25; 45; 70 e 100 cm, sendo a lâmina de água considerada como aquela em excesso do valor de tensão de 1,5 MPa (Figura 2A - Apêndice). Estas medições serviram também para conferir os dados do balanço de água no solo (Quadro 3A - Apêndice).

3.12. Desbaste

O desbaste foi realizado manualmente 21 dias após o plantio, deixando-se uma planta a cada 20 cm, ou duas quando ocorriam falhas, de maneira que permanecessem cinco plantas por metro linear visando uma densidade na colheita de 50.000 plantas/ha.

3.13. Adubação Nitrogenada em Cobertura

A adubação em cobertura foi realizada em 07.11.1986,

quando as plantas apresentavam-se com 7-8 folhas, correspondendo a 37 dias após a sementeira. As fontes, doses e métodos de aplicação de nitrogênio, foram aquelas apresentadas no Quadro 4.

Para aplicação da uréia incorporada foram abertos sulcos de aproximadamente 7,5 cm de profundidade, localizados a 15,0 cm das plantas, sendo o fertilizante distribuído uniformemente nos sulcos e coberto com terra. A aplicação na superfície foi feita lateralmente a 15 cm das plantas. Por ocasião da adubação de cobertura, o solo apresentava-se com a superfície seca e com um teor médio de umidade de 38% na profundidade de 10 cm.

3.14. Controle de Pragas

Visando o controle da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*), foram realizadas duas pulverizações com inseticida Lorsban, na dosagem de 0,7 l/ha, e uma aplicação de inseticida granulado, Dyfonate 10 G, no cartucho das plantas.

3.15. Colheita

A colheita foi realizada em 18.03.1987, com os grãos apresentando um teor médio de umidade de 12%. Foi considerada como área útil as três fileiras centrais, eliminando-se 1,0 m nas extremidades, perfazendo uma área útil de 18,0 m² (6 x 3m), conforme estimado pelo ensaio em branco realizado na área experimental (Ítem 3.5.).

3.15.1. Amostragem de Plantas

Dentro de cada microparcela (Figura 1) foram colhidas sete plantas, em 1,40 m linear da fileira central, para análise de ^{15}N . As plantas foram cortadas rente a superfície do solo, colocadas sobre uma lona plástica, e separadas nas seguintes partes: grãos, sabugo, folha + palha e colmo + pendão. A seguir, foram pesadas e colocadas em sacos de papel perfurados previamente identificados.

Na colheita das demais parcelas (18 m^2), após a contagem do número de plantas, as espigas foram colhidas e contadas, sendo as plantas cortadas rente a superfície do solo. A palhada de milho foi triturada em picadeira no próprio local, retirando-se amostras para determinação da matéria seca e análise de nitrogênio total. As espigas foram debulhadas, obtendo-se o peso de grãos e sabugo. Amostras foram retiradas para avaliação de matéria seca, nitrogênio total e umidade dos grãos.

3.15.2. Amostragem de Material de Solo

As amostras de material de solo para análises de ^{15}N - total, $^{15}\text{N}-(\text{NH}_4^+)$ e $^{15}\text{N}-(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$, foram coletadas no centro de cada microparcela em uma área de $100 \times 100\text{ cm}$, nas profundidades de 0-15; 15-30; 30-45 e 45-60 cm, como proposto por BURESH et alii (16).

Para evitar a contaminação das amostras pelo solo da

camada superficial, foi utilizado um quadro de metal com as dimensões de 100 x 100 x 35 cm, o qual foi cravado no solo até a profundidade de 30 cm à medida que a amostragem foi sendo executada (Figura 2).

Na amostragem, o quadro de metal foi colocado sobre a superfície da área, iniciando-se a escavação pela retirada das raízes principais da cultura, as quais foram separadas e colocadas em saco de papel. Continuando o processo de amostragem, a camada de 0-15 cm foi removida, sendo as raízes separadas por peneiramento e o solo colocado sobre uma lona plástica. Após a camada de solo ter sido removida o quadro de metal foi pressionado no solo até atingir os 15 cm.

O solo foi cuidadosamente misturado e espalhado sobre a lona, em uma fina camada, procedendo-se então à subamostragem, retirando-se no mínimo 25 pequenas amostras, obtendo-se aproximadamente 2 kg de solo que foram acondicionados em sacos plásticos. Ao mesmo tempo foram também coletadas amostras (500 g solo) para análise de $^{15}\text{N}-(\text{NH}_4)$ e $^{15}\text{N}-(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$, acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em Freezer à temperatura de -15°C .

Uma nova lona foi estendida sobre o material de solo previamente retirado, escavando-se a camada de solo de 15 - 30 cm, a qual foi misturada e subamostrada; como descrito anteriormente; procedendo-se da mesma maneira para as camadas de 30-45 e 45-60 cm. Após a retirada da camada de 15-30 cm, o quadro de metal foi pressionado no solo até atingir os 30 cm, ficando com 5 cm acima da

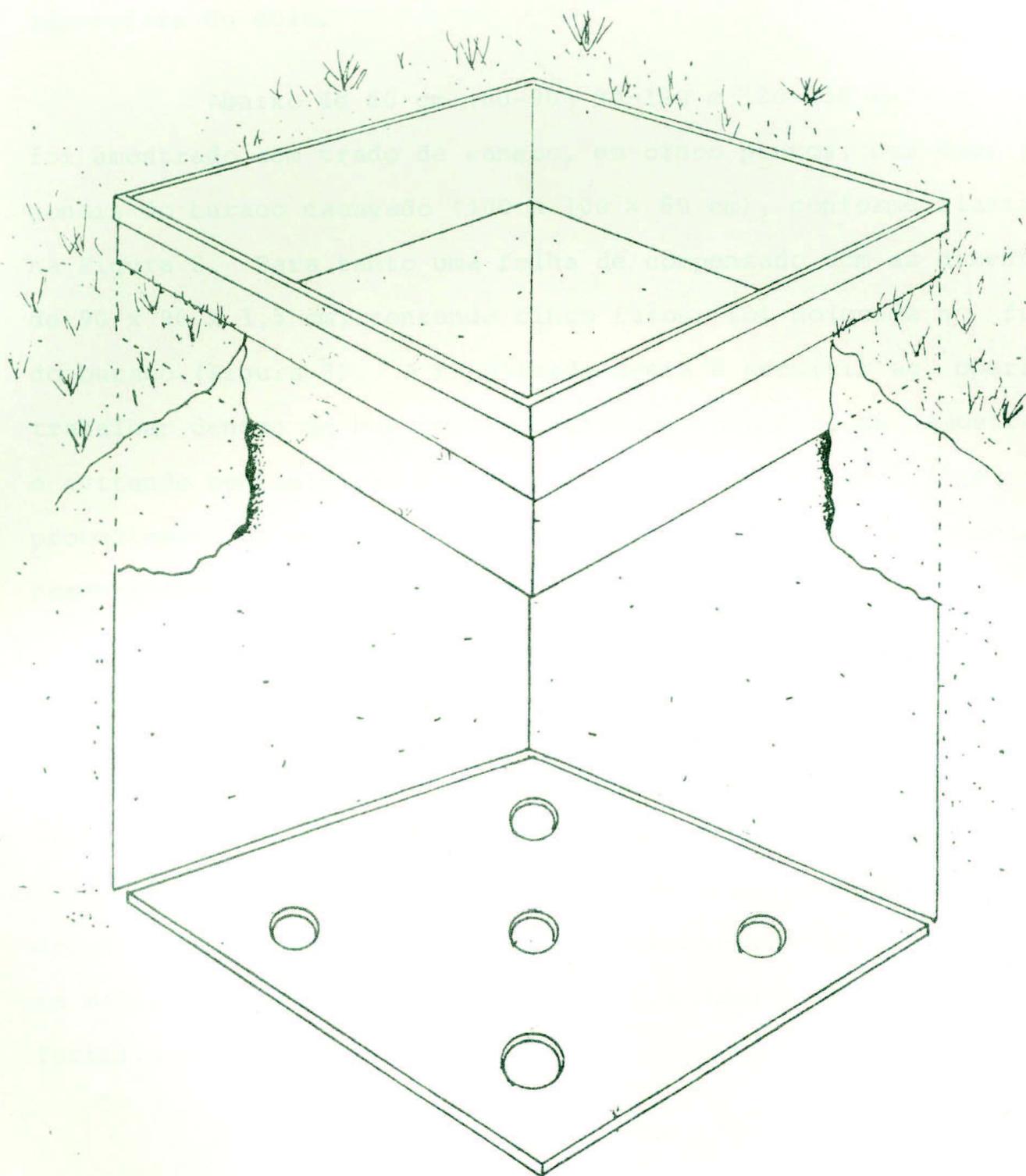


FIGURA 2 - Representação esquemática do quadro de metal e fôlha de compensado utilizados nas amostragens de material de solo nas microparcelas tratadas com ^{15}N .

superfície do solo.

Abaixo de 60 cm (60-90; 90-120 e 120-150 cm) o solo foi amostrado com trado de caneco, em cinco pontos, nas duas diagonais do buraco escavado (100 x 100 x 60 cm), conforme ilustrado na Figura 2. Para tanto uma folha de compensado com as dimensões de 90 x 90 x 1,5 cm, contendo cinco furos, foi colocada no fundo do buraco (Figura 2). A finalidade desta é permitir ao operador trabalhar dentro do buraco, facilitando o processo de amostragem e evitando contaminação das amostras com solo da superfície. O procedimento de mistura e subamostragem foi semelhante ao anteriormente descrito.

Amostras de material de solo para determinação da densidade aparente foram retiradas no centro de cada camada utilizando-se cilindros de Uhland e aneis volumétricos de 100,14 cm³. Na área escavada a amostragem foi realizada no perfil do solo após a remoção de cada camada. Os valores da densidade aparente (Quadro 4A - Apêndice), foram usados para converter volume de solo para massa de solo, para cálculos das quantidades de N-total e ¹⁵N-fertilizante.

Concluída a amostragem, o material de solo restante foi recolocado ao local de origem, iniciando-se pela profundidade de 120-150 cm e assim por diante para as demais camadas.

3.16. Preparo das Amostras

3.16.1. Planta

As raízes foram lavadas com água para remover o solo aderente, sobre uma peneira de malha fina para evitar perdas.

Todo material vegetal foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 60°C, até peso constante, realizando-se em seguida a pesagem da matéria seca da parte aérea e raízes. Separadamente, as partes das plantas (grãos, sabugo, colmo + pendão, folhas + palha e raízes) colhidas dos tratamentos da microparcela (¹⁵N), foram moídas em moinho tipo Willey, provido de peneira de aço inoxidável de 1 mm de malha, e em seguida, acondicionadas em frascos de vidro para análises posteriores.

Para os demais tratamentos, amostras da palhada de milho + sabugo, secos a 60°C, foram misturadas e passadas em desfibrador e novamente sub-amostradas. Estas sub-amostras, e as amostras de grãos, foram moídas separadamente em moinho tipo Willey provido de peneira de 1 mm de malha e acondicionadas em frascos de vidro para análises posteriores.

3.16.2. Solo

As amostras de material de solo coletadas nas microparcelas, para análise de ¹⁵N-total, foram colocadas em pequenas caixas de madeira e secas ao ar, à sombra. Posteriormente, foram moí

das finamente em almofaris de ferro fundido, e peneiradas em peneira de 0,5 mm de malha. A moagem da amostra é necessária para facilitar a digestão ácida.

A sub-amostragem foi realizada através de um separador de amostra, retirando-se uma quantidade de aproximadamente 200 g, que foram colocadas em sacos plásticos e enviadas ao laboratório para análises. As amostras remanescentes foram colocadas em sacos plásticos e armazenadas.

3.17. Análises de Nitrogênio

No laboratório, a análise de ^{15}N -total envolve as seguintes etapas, BURESH et alii (16) e STUMPE et alii (98):

a) Pré-digestão: é realizada antes da digestão para assegurar que todo o nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-), sejam reduzidos para amônio (NH_4^+). Esta pre-digestão é importante, visto que o N-fertilizante é encontrado nessas duas formas oxidadas nos solos.

b) Digestão ou ataque por ácido para solubilizar todas as formas de N no solo e converte-las para NH_4^+ .

c) Destilação: consiste na determinação da quantidade de nitrogênio na amostra. É o estágio final preparatório das amostras para análise pelo Espectrômetro de Massa.

3.17.1. Análises de N-total no Solo

Estas análises foram realizadas pelo método macro-

Kjeldahl, modificado para incluir nitrito e nitrato pelo uso do permanganato de potássio (KMnO_4) e ferro reduzido, com digestão do material de solo em solução digestora de ácido sulfúrico, e posterior destilação com hidróxido de sódio e titulação com ácido sulfúrico, de acordo com as metodologias descritas por BURESH et alii (16) e STUMPE et alii (98).

Realizou-se uma análise prévia para se conhecer a % N-total nas amostras, pois cada amostra deve conter em torno de 1,2 mg N/alíquota quando destilada. A quantidade de material de solo necessária foi estimada através da seguinte fórmula:

$$\text{QSR} = \frac{1,2 \text{ mg N} \times \text{volume total digestão}}{\text{volume a ser destilado}} \times \frac{100}{\% \text{ N-total}} \quad \text{-----} \quad | 6 |$$

onde: QSR é a quantidade de material de solo requerida, em gramas, sendo adicionada 1,0 g em excesso para assegurar quantidade suficiente de amostra para análise.

No processo de subamostragens, as amostras foram espalhadas uniformemente sobre uma folha de papel, ou plástico, e pequenas quantidades foram retiradas em toda área para dar sub-amostras representativas e nas quantidades necessárias, pesadas e transferidas para frascos de digestão com capacidade de 200 ml. Sub-amostras para determinação do teor de umidade, foram também retiradas, pesadas, secas a 105°C por 48 horas e novamente pesadas.

A pre-digestão consistiu do pre-tratamento das amostras com água destilada, permanganato de potássio, ferro reduzido e ácido sulfúrico diluído, aquecendo-se em seguida em bloco diges

tor de alumínio, a 100°C durante 1 hora.

A digestão foi usada para converter N- orgânico em $N-NH_4^+$, sendo realizada pelo tratamento das amostras com uma mistura de catalizadores e ácido sulfúrico concentrado, aquecendo em bloco digestor a 400°C durante 4 a 5 horas. A mistura catalisadora consiste de K_2SO_4 , $CuSO_4$ e Se, na proporção de 100:10:1 por peso.

No processo de destilação, uma alíquota contendo 1,2mg de N, de acordo com os cálculos anteriores, foi pipetada em frascos de destilação de 300 ml, adicionando-se quantidade suficiente de NaOH para tornar a amostra básica para liberar amônia (NH_3). A amônia destilada foi recebida em solução de ácido bórico-indicador e titulada com $H_2SO_4 - 0,012N$, cuja normalidade exata era diariamente conferida pela titulação de um padrão de TRIS (nome comercial THAM) com o ácido. Após a titulação, as amostras foram acidificadas com 2 gotas de $H_2SO_4 - 0,12N$ e levadas ao banho-maria para evaporar, até um volume aproximado de 2ml, transferidas para vidraria própria de análises no Espectrômetro de Massa, e secadas em estufa a 60°C. Posteriormente foram armazenadas em geladeira até as análises da relação isotópica.

Para se evitar a contaminação cruzada entre amostras de ^{15}N , o aparelho de destilação foi vaporizado durante 2 minutos antes de se proceder a análise da amostra seguinte, tendo-se também o cuidado de adotar uma sequência nas análises, iniciando-se pelas amostras com menor teor de N.

3.17.2. Análises de N-total na Planta

O nitrogênio total foi determinado pelo método macro-Kjeldahl, modificado por incluir nitrato pelo uso de ácido salicílico, de acordo com as metodologias descritas por BURESH et alii (16) e STUMPE et alii (98).

Para as sub-amostragens, as amostras de planta eram espalhadas em uma fina camada sobre uma folha de papel, ou plástico, retirando-se uma sub-amostra representativa de aproximadamente 1,0 grama, colocadas em pequenos vidros e secas em estufa com circulação forçada de ar, a 60°C, durante a noite. Em seguida as sub-amostras foram colocadas em dessecador, para esfriar, pesadas e transferidas para frascos de digestão de 200 ml.

Na pre-digestão, as amostras foram tratadas com a mistura ácido salicílico - ácido sulfúrico e tiosulfato de sódio, deixando-se em repouso durante a noite.

Para a digestão adicionou-se às amostras catalizador de planta (K_2SO_4 contendo 1% de selênio), aquecendo-as em seguida em bloco digestor a 400°C durante 4 horas. Após a digestão os tubos foram removidos do bloco digestor deixando-os esfriar.

A metodologia utilizada para destilação e preparo das amostras para leituras no Espectrômetro de Massa foi semelhante a descrita para amostras de material de solo (item 3.17.1).

O tamanho da alíquota destilada foi baseada na % N na

amostra. Para amostras com teor de N > 1,5%, 20-25 ml foram pipetados e colocados em frascos de destilação de 100 ml; amostras com 0,6 - 1,5% N, pipetou-se 50 ml e transferiu para frascos de destilação de 300 ml; e nas amostras com teor de N < 0,6%, 100 ml foram pipetados e colocados em frascos de destilação de 300 ml.

3.17.3. Análises de N-Inorgânico no Solo

A concentração de N-inorgânico (NH_4^+ e $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) nas amostras de material de solo foi determinada pelo método descrito por BURESH et alii (16).

As amostras foram retiradas do Freezer e descongeladas. Sub-amostras de aproximadamente 130 g de material de solo úmido foram transferidas para Erlenmeyer de 500 ml, contendo 300 ml de solução extratora de KCl 2M. Sub-amostras foram também retiradas para avaliação do teor de umidade do solo.

As sub-amostras foram agitadas, em agitador horizontal, durante 1 hora, deixando-as em seguida decantar. O sobrenadante foi filtrado usando papel de filtro Whatman 42, até obter quantidade suficiente de extrato para as análises, sendo as amostras armazenadas em refrigerador quando não analisadas dentro de um período de 24 horas.

Uma alíquota de 50 ml do extrato foi utilizada na destilação para avaliação de N-(NH_4^+) e N-($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$). O N- NH_4^+ foi destilado com óxido de magnésio, o qual eleva o pH da solução,

convertendo-o em gás NH_3 . Após a destilação do N-NH_4^+ , foram adicionadas às amostras "liga de Devarda" a qual reduz a ambos, N-NO_3^- e N-NO_2^- para N-NH_4^+ , que na presença do óxido de magnésio é convertido à N-NH_3 . A NH_3 liberada foi recebida em solução de ácido bórico-indicador e titulada com $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,012\text{N}$.

Dada a pequena quantidade de N-inorgânico nas amostras ($< 1,2 \text{ mg N/ml}$), insuficiente para leitura no Espectrômetro de Massa, BURESH et alii (16), foram adicionados em cada amostra, após a titulação, 10 ml de um padrão de sulfato de amônio contendo $0,12 \text{ mg N/ml}$, não enriquecido em ^{15}N . Os procedimentos seguintes visando o preparo das amostras para análises no Espectrômetro de Massa foram semelhantes aos descritos para ^{15}N -total no material de solo e planta.

3.17.4. Testes de Destilação

3.17.4.1. Eficiência da Destilação

A eficiência da destilação foi avaliada para cada grupo de 16 amostras, destilando-se em cada destilador 10 ml de um padrão de sulfato de amônio contendo $0,12 \text{ mg N/ml}$. No presente trabalho, a eficiência na destilação das amostras de material de solo, planta e extrato de solo, variou de $98,0$ a $101,9\%$, com média geral de $99,37 \pm 0,22\%$. De acordo com BURESH et alii (16), a eficiência da destilação é considerada satisfatória quando a recuperação do N do padrão for igual ou maior do que 98% , após a correção dos valores do teste em branco.

3.17.4.2. Ocorrência de Contaminação Cruzada Durante a Destilação

A contaminação cruzada constitui-se numa das principais fontes de erros nas análises de ^{15}N , principalmente quando o aparelho de destilação não é adequadamente limpo entre as destilações. Portanto, há necessidade de se evitar a contaminação porque ela leva a grandes erros nas análises de ^{15}N , particularmente se uma amostra com baixo conteúdo de ^{15}N é destilada imediatamente após uma amostra com alto enriquecimento em ^{15}N , BREMNER & EDWARDS (13).

A ocorrência de contaminação durante a etapa de destilação foi avaliada destilando-se com cada grupo de amostras um padrão de sulfato de amônio enriquecido com 1 átomo % de ^{15}N em excesso, seguido pela destilação de um padrão de sulfato de amônio com abundância natural de ^{15}N (0,3663 átomos %). Os resultados das análises da relação isotópica ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), são apresentados no Quadro 5. De acordo com BURESH et alii (16), se os destiladores são limpos adequadamente após a destilação de cada amostra, a porcentagem de ^{15}N nos padrões de sulfato de amônio enriquecido deve permanecer constante e com valores de aproximadamente 1,0%, e os padrões de sulfato de amônio não enriquecido devem ter uma porcentagem de ^{15}N em excesso próxima a zero.

QUADRO 5 - Átomos % de ^{15}N nos padrões de sulfato de amônio utilizados para verificar a ocorrência de contaminação cruzada durante a destilação das amostras de material de solo e planta. Sete Lagoas, MG. 1987.

Amostra Nº	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - Não Enriquecido		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - Enriquecido- ^{15}N	
	^{15}N -átomos %	^{15}N -Excesso % $\frac{1}{\text{—}}$	^{15}N -átomos %	^{15}N -Excesso % $\frac{1}{\text{—}}$
01	0,3670	0,0007	1,4310	1,0647
02	0,3674	0,0011	1,4212	1,0549
03	0,3650	-0,0013	1,4055	1,0392
04	0,3642	-0,0021	1,4061	1,0398
05	0,3644	-0,0019	1,4141	1,0478
06	0,3648	-0,0015	1,4067	1,0404
07	0,3662	-0,0001	1,3677	1,0014
08	0,3674	0,0011	1,4040	1,0377
09	0,3675	0,0012	1,3947	1,0284
10	0,3665	0,0002	1,4028	1,0365
11	0,3674	0,0011	1,3986	1,0323
12	0,3670	0,0007	1,3994	1,0331
13	0,3671	0,0008	1,4010	1,0347
14	0,3685	0,0022	1,4095	1,0432
15	0,3688	0,0025	1,4113	1,0450
16	0,3691	0,0028	1,4045	1,0382
17	0,3686	0,0023	1,4047	1,0384
18	0,3656	-0,0007	1,4197	1,0534
19	0,3681	0,0018	1,4073	1,0410
Média	0,3668±0,00045	0,0014	1,4058 ± 0,00263	1,0395
CV %	0,123		0,187	

1/ Após descontado o valor da abundância natural de 0,3663 átomos %.

3.17.5 Teste de Digestão

Uma quantidade conhecida de EDTA foi digerida com cada grupo de amostras para assegurar que o procedimento de digestão foi corretamente executado. No presente trabalho, a eficiência da digestão das amostras de material de solo e planta, avaliada pela recuperação do EDTA, variou de 97,0 a 99,64% com média geral de $98,20 \pm 0,37\%$. A eficiência da digestão é considerada adequada quando a recuperação do EDTA for no mínimo 97%, BURESH et alii (16).

3.17.6. Determinação da Relação Isotópica e Porcentagem de ^{15}N nas Amostras

Para as análises da composição isotópica ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) do nitrogênio contido nas amostras de material de solo, planta e extrato de solo, estas foram processadas de acordo com o método descrito por HAUCK & BREMNER (57), para converter amônio (NH_4^+) para gás de nitrogênio (N_2) pela oxidação com hipobromito de lítio (LiOBr), na completa ausência de ar. A determinação da composição isotópica do N_2 foi efetuada em Espectrômetro de Massa . VG Isogas Modelo 900, sendo as leituras das porcentagens de ^{15}N nas amostras, fornecidas diretamente por um computador acoplado ao aparelho. Cálculos sobre a composição isotópica de ^{15}N , em amostras de material de solo e planta, são fornecidos em detalhes por HAUCK & BREMNER (57) e HAUCK (55).

3.18. Cálculos

3.18.1. Porcentagem de N-Total no Solo e Planta

A porcentagem de N-total no material de solo, planta; ou partes da planta; foi calculado pela seguinte expressão:

$$\% N = \frac{(\text{Volume titulação} - \text{branco}) \times N_A \times 14,01 \times R \times 100}{\text{PSA} \times 1000} \quad \text{-----} \quad | 7 |$$

onde: N_A = normalidade do ácido sulfúrico usado na titulação.

R = relação do volume digerido para o volume destilado; e

PSA = peso seco, em gramas, da amostra analisada.

3.18.2. Quantidade de N-Total no Solo

A quantidade de nitrogênio total contida em cada camada de solo (QNTS), em kg/ha, foi calculada pela seguinte expressão:

$$\text{QNTS} = \frac{\% \text{ NTS} \times \text{M. Solo}}{100} \quad \text{-----} \quad | 8 |$$

onde: % NTS = porcentagem de N-total no solo;

M.Solo = massa de solo contida em cada camada do perfil, em kg/ha (volume de solo x densidade aparente), corrigida para peso de solo seco a 105°C.

3.18.3. Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante (NSPF)

A porcentagem de nitrogênio no solo proveniente do fertilizante (% NSPF) foi determinada para as diferentes camadas utilizando-se da seguinte expressão:

$$\% \text{ NSPF} = \frac{\text{Átomos } ^{15} \text{ N em excesso no solo}}{\text{Átomos } ^{15} \text{ N em excesso no fertilizante}} \times 100 \quad | 9 |$$

A concentração de $^{15} \text{N}$ era considerado em excesso no material de solo ou planta, se os valores obtidos das análises no Espectrômetro de Massa ocorressem acima da abundância natural (0,3663 átomos % $^{15} \text{N}$).

A quantidade de nitrogênio nas diversas camadas de solo, proveniente do fertilizante (QNSPF), foi calculada por:

$$\text{QNSPF} = \frac{\% \text{ NSPF} \times \text{QNTS}}{100} \quad | 10 |$$

3.18.4. Quantidade de N-Total na Planta

As quantidades de nitrogênio total extraídas pela planta, ou partes da planta (QNTP), foram calculadas pela seguinte expressão:

$$\text{QNTP} = \frac{\% \text{ NTP} \times \text{R.M.S.}}{100} \quad | 11 |$$

onde : % NTP = porcentagem de N-total na planta ou partes da planta

R.M.S. = rendimento de matéria seca, em kg/ha.

3.18.5. Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante

A porcentagem de nitrogênio na planta ou parte dela, proveniente do fertilizante (% NPPF), foi calculada pela seguinte equação:

$$\% \text{ NPPF} = \frac{\text{Átomos } ^{15} \text{ N em excesso na planta (ou partes)}}{\text{Átomos } ^{15} \text{ N em excesso no fertilizante}} \times 100 \text{---} |12|$$

A quantidade de nitrogênio na planta (ou partes), proveniente do fertilizante (QNPPF), foi calculada através da seguinte equação:

$$\text{QNPPF} = \frac{\% \text{ NPPF} \times \text{QNTTP}}{100} \text{-----} |13|$$

3.18.6. Porcentagem de Recuperação de ¹⁵N no Material de Solo e Planta

A recuperação do ¹⁵N-fertilizante expresso como a porcentagem do N-uréia aplicada, em amostras de material de solo e planta, foi calculada pela fórmula, BURESH et alii (16):

$$\% \text{ Recuperação } ^{15} \text{ N} = \frac{(V-B) \times N_A \times R \times (N_T - N_C) \times P_{STA} \times 100}{P_{SA} \times N_F \times P_F \times F_A} \quad \text{---| 14|}$$

onde: V = volume de ácido gasto na titulação da amostra (ml)

B = volume de ácido gasto na titulação do branco (ml)

N_A = normalidade do ácido sulfúrico

R = relação do volume digerido para o volume titulado

N_T = átomos % $^{15} \text{ N}$ em excesso no tratamento

N_C = átomos % $^{15} \text{ N}$ em excesso no controle

P_{STA} = peso seco total da amostra (g)

P_{SA} = peso seco da amostra analisada (g)

N_F = átomos % $^{15} \text{ N}$ em excesso no fertilizante

P_F = peso do fertilizante aplicado (g)

F_A = análise do fertilizante (meq N/g fertilizante)

3.18.7. Nitrogênio Inorgânico no Solo

A concentração de $\text{N}-(\text{NH}_4^+)$ e $\text{N}-(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$ em extratos de solos foi calculada da seguinte maneira:

$$\text{N-inorgânico (ppm)} = \frac{(V-B) \times N_A \times 14,01 \times R \times 1000}{PSA} \quad \text{-----| 15|}$$

onde: R = relação do volume do extrato para a alíquota destilada;

PSA = peso de solo seco, em gramas, da amostra analisada.

Antes de se calcular a recuperação do $^{15} \text{ N}$ - inorgânico no solo, há necessidade de se conhecer o enriquecimento exato nas

amostras. Dado que 10 ml de um padrão de sulfato de amônio contendo 1,2 mg N, com zero enriquecimento, foi adicionado às amostras, as concentrações de ^{15}N fornecidas pelas leituras no Espectrômetro de Massa foram grandemente diluídas. Assim, o enriquecimento das amostras (N_T) fornecidas pelo Espectrômetro de Massa depende do enriquecimento original das amostras (N_S), da quantidade de amostra (T_S), do enriquecimento do padrão (N_{SP}) e da quantidade de padrão adicionado (T_{SP}). A quantidade total de N (T_T) é a soma de T_S e T_{SP} , BURESH et alii (16), isto é:

$$T_T N_T = T_S N_S + T_{SP} N_{SP} \text{ ----- } | 16 |$$

Mas, se o enriquecimento do padrão é zero, o último termo da equação torna-se nulo, então tem-se:

$$T_T N_T = T_S N_S \therefore N_S = \frac{T_T \cdot N_T}{T_S} \text{ ----- } | 17 |$$

Desde que o atual enriquecimento (N_S) das amostras é conhecido, pode-se usar a equação | 14 | para se calcular a recuperação de ^{15}N na formas inorgânicas, $\text{N}-(\text{NH}_4^+)$ e $\text{N}-(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$, no solo.

3.18.8. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado

A eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado, foi calculada pelo método da diferença (Equação ---4), para as doses de 30; 60; 120 e 240 kg N/ha, da uréia incorporada no solo, e

para a dose de 60 kg N/ha da uréia e sulfato de amônio aplicados na superfície do solo. O cálculo da eficiência pelo método da regressão linear (Equação --- 5) resultou do nitrogênio absorvido pela planta (grãos + palhada), nas doses de 30, 60, 120 e 240 kg N/ha, da uréia incorporada no solo. A eficiência de utilização calculada pelo método direto ou isotópico (^{15}N), foi baseada na soma da recuperação do ^{15}N -fertilizante nas partes da planta (Equação --- 14), da uréia aplicada na superfície e incorporada no solo, na dose de 60 kg N/ha.

3.18.9. Balanço do ^{15}N -Fertilizante no Sistema Solo-Planta

No Cálculo do balanço do ^{15}N -fertilizante no sistema solo-planta, foi considerado a soma da porcentagem de recuperação do ^{15}N nas partes das plantas (grãos, sabugo, colmo + pendão e folha + palha) e, no solo, nas camadas de 0 - 15 (incluindo raízes); 15-30; 30-60 e 60-90 cm. O ^{15}N -fertilizante recuperado nas camadas abaixo de 90 cm foi considerado como perdido por lixiviação.

3.19. Análises Estatísticas

As análises de variância foram realizadas para as seguintes variáveis: número de plantas e espigas; peso de espigas; grãos corrigidos para 15,5% de umidade e palhada; peso seco a 60°C de grãos e palhada; relação grãos/palha; porcentagem de nitrogênio nos grãos e palhada; nitrogênio absorvido nos grãos e pa

lhada (kg/ha); e nitrogênio total na planta (kg/ha). Na comparação de médias, usou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Para expressar a resposta do milho à adubação nitrogenada, foi ajustada função de produção usando o método da regressão polinomial.

Para os tratamentos das microparcelas que receberam uréia enriquecida com ^{15}N , envolvendo métodos de aplicação (superfície e incorporada no solo), foram realizadas análises de variância considerando o delineamento em blocos casualizados, com partes da planta e profundidade do solo, dispostos em faixas. As seguintes variáveis foram analisadas:

Planta - porcentagem de nitrogênio total, átomos % ^{15}N , átomos % ^{15}N em excesso, rendimento em kg/ha, nitrogênio total na planta em kg/ha, nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (NPPF) em % e kg/ha, e porcentagem de recuperação de N-fertilizante.

Solo - nitrogênio total em % e kg/ha, átomos % ^{15}N , átomos % ^{15}N em excesso, nitrogênio no solo proveniente do fertilizante (NSPF) em % e kg/ha, porcentagem de recuperação do ^{15}N -fertilizante, nitrogênio inorgânico em ppm e kg/ha, e porcentagem de recuperação de ^{15}N -fertilizante nas formas inorgânicas.

A estimativa do erro na recuperação do N-fertilizante no sistema solo (0-90 cm) - planta foi calculado de acordo com Snedecor & Cochran (1967), citados por LEGG & MEISINGER (64), utilizando-se da seguinte equação:

$$V_{AR} (N_T) = V_{AR} (N_P) + V_{AR} (N_S) + 2COV (N_P \cdot N_S) \text{ ----- } | 18 |$$

onde:

N_T = nitrogênio total recuperado no sistema solo-planta

N_P = nitrogênio total recuperado na planta

N_S = nitrogênio total recuperado no solo

VAR = estimativa da variância

COV = estimativa do covariância

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Componentes da Produção e Resposta do Milho à Adubação Nitrogenada

Os dados referentes a produção de grãos, espigas e palhada de milho, assim como número de plantas e espigas em função dos diferentes tratamentos, encontram-se no Quadro 6. Pelas análises de variância (teste F), verifica-se que os tratamentos diferem estatisticamente ao nível de 1% de probabilidade ($P \leq 0,01$), exceto para as variáveis número de plantas e espigas, indicando que para o híbrido de milho utilizado o suprimento de nitrogênio não afetou o número de espigas por planta (prolificidade).

O solo da área experimental apresentava, por ocasião da semeadura do milho, 7,0 ppm (28 kg/ha) de nitrogênio mineral na camada de 0-40 cm (Quadro 3), sendo que 50% desta quantidade encontrava-se na camada superficial de 0-20 cm. Nestas condições, a aplicação de fertilizante nitrogenado para o Latossolo aumentou a produção de grãos, espigas e palhada de milho. Como mostrado no Quadro 6, independente da fonte de nitrogênio e métodos de aplicação, que serão discutidos posteriormente, a produção de grãos

QUADRO 6 - Influência de níveis, fontes e métodos de aplicação de nitrogênio nos componentes da produção de milho, cultivado em Latossolo Vermelho Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987

Fonte de Nitrogênio	Níveis de N ^{1/}		Método de ^{2/} Aplicação	Peso de Grãos 15,5% Umidade	Peso Espigas	Peso Palhada	Número Plantas	Número Espigas
	P	C						
	---KG/ha ---			----- kg/ha -----			-----x 1000/ha-----	
Test.	0	0	-	3943	4532	5178	50,14	49,03
Uréia	10	0	-	4937	5664	5835	49,86	48,90
Uréia	10	30	Incorporada	5242	6026	5951	49,72	49,44
Uréia	10	60	Superfície	6292	7184	6374	50,28	50,14
Uréia	10	60	Incorporada	6115	6972	6161	49,72	49,58
S. Anônio	10	60	Superfície	6665	7533	6761	49,72	49,44
Uréia	10	120	Incorporada	7110	8164	6692	50,70	50,30
Uréia	10	240	Incorporada	7093	8067	6770	50,00	49,58
Média				5925	6768	6215	50,02	49,55
S \bar{y}				243	283	210	1,15	1,14
Valor de F				**	**	**	NS	NS
DMS (Tukey-5%)				1154	1342	998	-	-
CV %				8,20	8,35	6,76	2,56	2,55

1/ P = dose de N aplicado no plantio. C = dose de N aplicado em cobertura aos 37 dias após o plantio

2/ Refere-se ao método de aplicação do N em cobertura, na superfície do solo e incorporado à 7,5 cm.

** Significativo ao nível $P \leq 0,01$ e NS = não significativo

S \bar{y} Indica o erro padrão de um particular valor médio (4 repetições)

aumentou de 3943 para 7110 kg/ha, com aumento na dose de nitrogênio de zero para 120 kg N/ha, correspondendo a um incremento de 80% no rendimento de grãos. MAGDOFF et alii (68) verificaram, em 33 locais do estado de Nova York, grandes probabilidades de respostas da cultura do milho a fertilização nitrogenada, quando a quantidade de $N-NO_3^-$ no solo na camada de 0-30 cm, foi menor do que 36 kg/ha.

A comparação entre médias (Teste Tukey - 5%) indicou que, de maneira geral, as diferenças são, entre as produções obtidas com doses médias e altas de nitrogênio em relação aos tratamentos testemunha e aquele que recebeu apenas 10 kg N/ha no plantio (Quadro 6). Entretanto, produções de milho obtidas com doses de 60, 120 e 240 kg N/ha não apresentam diferenças entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% (Quadro 6).

As funções médias de respostas do milho a adubação nitrogenada, calculadas pelas equações de regressão do efeito quadrático, são representadas graficamente na Figura 3, para produção de grãos e palhada (peso de campo) com coeficientes de determinação altamente significativo ($P \leq 0,01$) para produção de grãos e significativo ao nível de 5% ($P \leq 0,05$) para produção de palhada.

Através destas equações calculou-se as doses de nitrogênio que proporcionaram as máximas produções físicas. Os valores resultantes foram de 188 kg N/ha quando estimada da equação de produção de grãos e 219 kg N/ha quando estimada através da e-

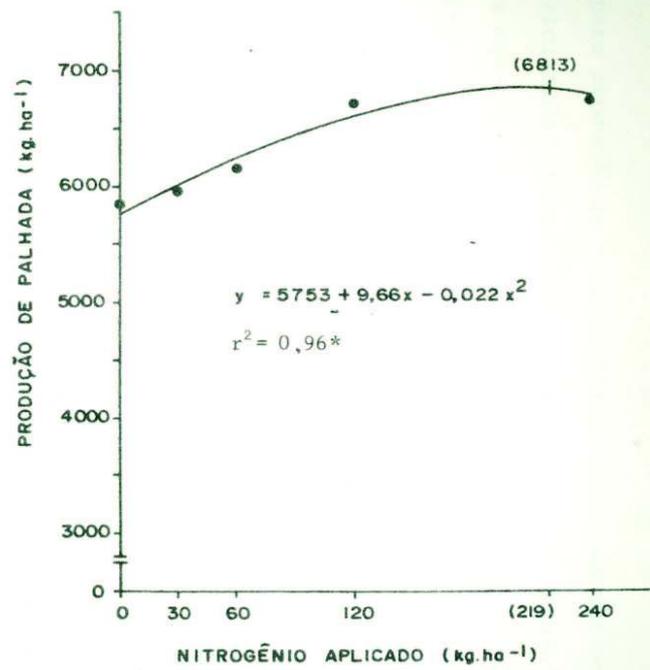
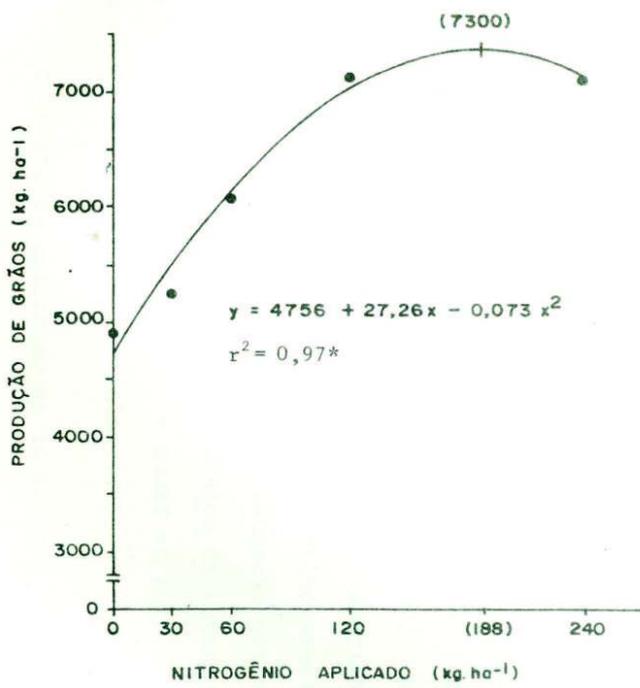


FIGURA 3 - Produção de milho em função da aplicação de doses de nitrogênio em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

quação para produção de palhada (Figura 3). As máximas produções foram calculadas substituindo essas doses de nitrogênio nas respectivas equações (Figura 3), obtendo-se 7300 kg/ha de grãos e 6813 kg/ha de palhada. Entretanto, a dose de nitrogênio necessária para atingir 90% da produção máxima de grãos (6570 kg/ha) está em torno de 80 kg N/ha.

Estes resultados são semelhantes aos relatados por GROVE (50), de trabalhos realizados em Ultisols e Oxisols da América Tropical, inclusive no Brasil, em que foram necessárias doses de 80 a 120 kg N/ha para se obter 95% da produção máxima, que no caso do milho foi da ordem de 5000 kg/ha. Em experimentos de longa duração conduzidos em Latossolo Vermelho-Escuro da região de Brasília, relatados por SUHET et alii (100), a dose de 60 kg N/ha foi em média necessária para atingir 80% da produção máxima de grãos de milho (5.200 kg/ha).

As produtividades médias de grãos dos tratamentos, testemunha e aquele com apenas 10 kg N/ha no plantio, foram respectivamente de 3943 e 4937 kg/ha (Quadro 6, Figura 3), evidenciando que esse solo possui, relativamente, uma alta capacidade de suprimento natural de nitrogênio. Produções de milho semelhantes às observadas neste trabalho, sem o uso da adubação nitrogenada, têm sido verificadas em experimentos realizados em Latossolo da região do cerrado, por GROVE et alii (51) e SUHET et alii (100); e em Oxisols de Porto Rico por FOX et alii (42).

O efeito da aplicação de 10 kg N/ha no plantio, eviden

ciado pelo aumento na produção de grãos de 25% (994 kg/ha), em relação ao tratamento testemunha (Quadro 6), poderia ser explicado pela pequena quantidade de N-inorgânico no solo na camada superficial (Quadro 3), lixiviação desse nitrogênio impossibilitando seu aproveitamento pelas plântulas, devido ao pequeno sistema radicular e/ou uma baixa taxa inicial de mineralização do N-orgânico. Esses aspectos, ficaram evidentes pela deficiência de nitrogênio apresentada pelas plântulas desenvolvendo nas parcelas que não receberam este nutriente por ocasião da sementeira.

4.2. Produção de Matéria Seca e Nitrogênio Absorvido

Os resultados médios de produção de matéria seca, porcentagem e nitrogênio absorvido pelo milho (kg/ha) e relação grão/palhada, em função dos diferentes tratamentos comparados pelo teste de Tukey (5%), estão apresentados no Quadro 7. O efeito dos tratamentos na produção de matéria seca, de grãos e parte aérea, como era esperado, foi similar ao observado para produção de grãos (15,5% umidade) e palhada (peso de campo), já discutidos anteriormente.

A Figura 4, representa graficamente os resultados de produção de matéria seca (grãos e palhada) e nitrogênio absorvido pelo milho em função das doses de nitrogênio aplicadas. Verifica-se uma relação linear altamente significativa ($r^2 = 0,99^{**}$) entre doses de nitrogênio aplicadas e quantidade absorvida na palhada e uma relação também altamente significativa, porém de forma quadrá

QUADRO 7- Influência de níveis, fontes e métodos de aplicações de nitrogênio na produção de matéria seca e nitrogênio absorvido pelo milho, cultivado em Latossolo Vermelho Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

Fonte de Nitrogênio	Níveis de N ^{1/}		Método de ^{2/} Aplicação	Matéria Seca		Nitrogênio		Nitrogênio Absorvido			Relação Grãos/Palhada
	P	C		Grãos	Palhada	Grãos	Palhada	Grãos	Palhada	Total	
	---kg/ha--			--kg/ha ----		----- % -----		----- kg/ha -----			
Test.	0	0	-	3375	4644	1,210	0,278	41,00	13,00	54,00	0,72
Uréia	10	0	-	4215	5280	1,275	0,267	54,26	14,07	68,31	0,79
Uréia	10	30	Incorporada	4599	5410	1,302	0,278	60,13	15,04	75,17	0,85
Uréia	10	60	Superfície	5390	5763	1,418	0,309	76,72	17,83	94,56	0,93
Uréia	10	60	Incorporada	5235	5580	1,387	0,284	72,89	15,87	88,75	0,94
S. Anônio	10	60	Superfície	5701	6099	1,453	0,298	82,84	18,15	101,00	0,94
Uréia	10	120	Incorporada	6083	6025	1,640	0,334	99,89	20,10	120,00	1,01
Uréia	10	240	Incorporada	6067	5912	1,783	0,448	108,17	26,55	134,72	1,02
Média				5083	5589	1,434	0,312	74,50	17,57	92,06	0,90
S \bar{y}				210	180	0,022	0,009	3,80	0,775	4,36	0,016
Valor de F				**	**	**	**	**	**	**	**
DMS (Tukey-5%)				955	853	0,106	0,041	18,03	3,68	20,72	0,078
CV %				8,24	6,42	3,14	5,08	10,20	8,82	9,48	3,61

1/ P= dose de N aplicada no plantio. C= dose de N aplicada em cobertura aos 37 dias após o plantio

2/ Refere-se ao método de aplicação do N em cobertura, na superfície do solo e incorporado à 7,5 cm.

** Significativo ao nível $P < 0,01$. S \bar{y} = Indica o erro padrão de um particular valor médio (4 repetições)

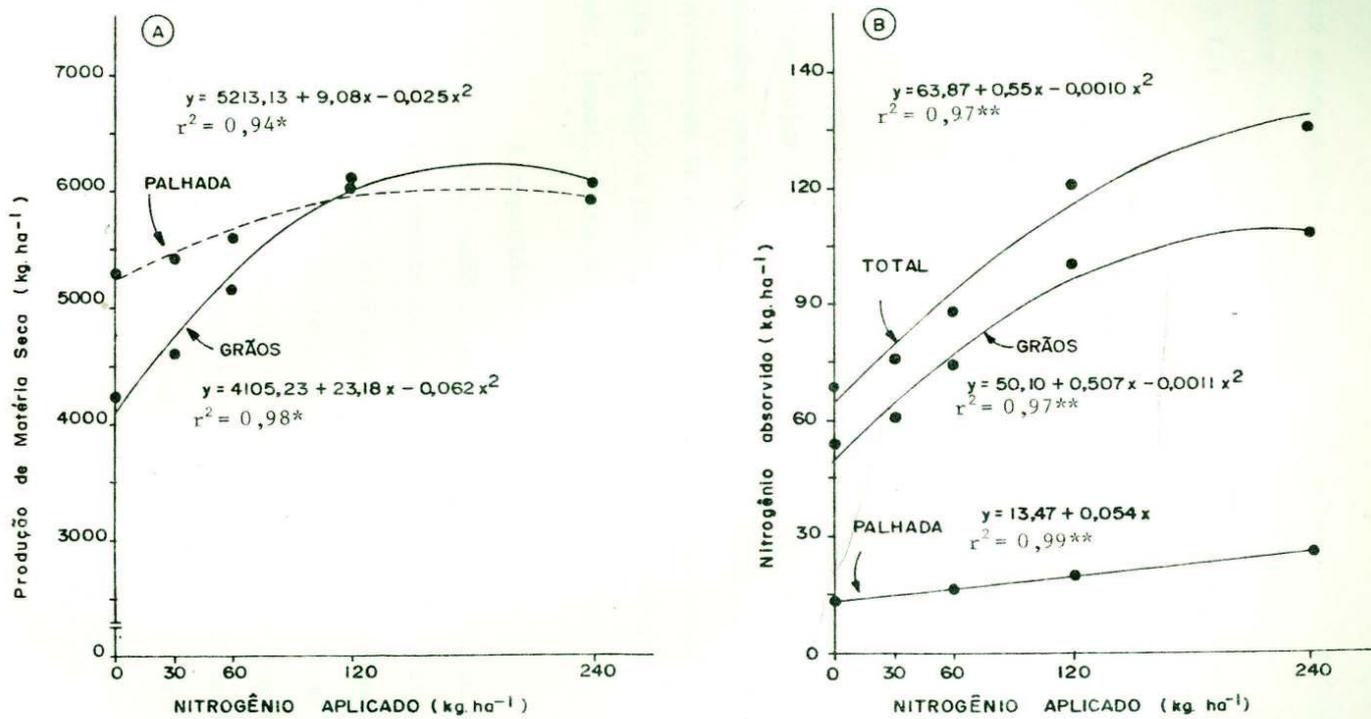


FIGURA 4 - Influência de níveis de nitrogênio na produção de matéria seca à 60°C (A) e na quantidade de nitrogênio absorvido pelo milho (B) cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

tica entre doses e nitrogênio nos grãos ($r^2 = 0,97^{**}$) e total na planta (grãos + palhada) ($r^2 = 0,97^{**}$), indicando que o nitrogênio foi um fator limitante da produção nesse experimento.

A porcentagem média de nitrogênio na matéria seca total (Quadro 7), variou de 1,5 para a testemunha a 2,0 com aplicação de 120 e 240 kg N/ha, correspondendo à produção máxima de grãos. Estes valores são superiores aos encontrados por GROVE et alii (51) para a cultura do milho cultivada em Latossolo Vermelho Escuro de Brasília DF, em que o conteúdo médio de nitrogênio na matéria seca total variou de 0,75% a 1,18%, correspondendo este último valor à máxima produção de grãos. A comparação destes resultados contradiz as afirmações de GROVE et alii (51), de que a porcentagem de nitrogênio na matéria seca total da planta de milho, para atingir a produção máxima desejada, não é afetada pela variedade, local, clima ou nível de produção desejado.

A capacidade desse solo em suprir nitrogênio à cultura foi de 54 kg/ha, como indicado pela quantidade de nitrogênio absorvido no tratamento testemunha (Quadro 7). Esta quantidade está bem próxima do valor estimado, considerando uma taxa média de mineralização de 2,0% do nitrogênio orgânico do solo na camada de 0 - 20 cm durante o ciclo da cultura do milho, encontrando-se em torno de 60 kg N/ha (1920 t de solo, densidade aparente = 0,96 g. cm^{-3} x 0,17% N-total, na camada de 0 - 20 cm). GROVE (50), em uma revisão sobre adubação nitrogenada em várias culturas, entre elas o milho, cultivadas em Ultisols e Oxisols em vários países, inclu

sive no Brasil, verificou que esses solos apresentavam uma capacidade de suprimento natural de nitrogênio da ordem de 60 a 80 kg N/ha.

As quantidades de nitrogênio extraídas pelas plantas (exceto raízes) variaram de 54 kg N/ha, para o tratamento testemunha, e 135 kg N/ha com aplicação da dose de 240 kg N/ha (Quadro 7). Por outro lado, verificou-se que embora a aplicação de 60 kg N/ha tenha proporcionado produções de milho da ordem de 6300 kg/ha, (Quadro 6), esta foi insuficiente para repor a quantidade de nitrogênio exportada nos grãos (Quadro 7), o que está de acordo com os resultados obtidos por NELSON & MACGREGOR (78).

Da quantidade total de nitrogênio extraído pela cultura, 80% em média (75 kg N/ha) encontra-se nos grãos (Quadro 7), sendo exportado na colheita, com apenas 20% (17,0 kg N/ha) na parte aérea das plantas para serem reincorporado ao solo. Isto equivale a uma relação média entre nitrogênio do grão/parte aérea total de 0,80, também definido como índice de colheita. Estes resultados possibilitam inferir que o híbrido de milho utilizado apresenta uma alta eficiência em translocar nitrogênio para os grãos, o que também pode ser explicado pela alta relação grão / palhada (média de 0,90), (Quadro 7). ULLOA et alii (105), utilizando dois híbridos de milho adubados com 100 kg N/ha obteve relação nitrogênio do grão/parte aérea total de 0,67 e 0,73, respectivamente para C111X e C511. Valores similares foram observados por GROVE et alii (51) com o híbrido C111 adubado com diferentes doses de ni-

trogênio.

4.3. Efeito de Fontes de Nitrogênio

Neste trabalho, o sulfato de amônio foi usado como uma fonte alternativa de nitrogênio para avaliar a eficiência relativa da uréia aplicada na superfície e incorporada no solo, na dose de 60 kg N/ha para ambas as fontes.

Os resultados de produção de grãos e nitrogênio absorvido pelo milho, apresentados nos Quadros 6 e 7, e representados graficamente na Figura 5, em função das fontes de nitrogênio, evidenciam uma certa superioridade do sulfato de amônio em relação a uréia. A produção de grãos e a quantidade de nitrogênio absorvido no tratamento com o uso de sulfato de amônio são, em média, 7,5% (460 kg/ha) e 9,8% (9,0 kg/ha), respectivamente, superiores aos obtidos com o uso da uréia, independente do método de aplicação. Entretanto, essas diferenças não são estatisticamente significativas pelo teste de Tukey a 5% (Quadros 6 e 7).

Pesquisas tem mostrado que muito pouco nitrogênio é perdido por volatilização de NH_3 do sulfato de amônio aplicado na superfície em solos ácidos ($\text{pH} < 6,0$), TERMAN & HUNT (102) e ANJOS & TEDESCO (04). As diferenças verificadas no nitrogênio absorvido entre os tratamentos com uréia e sulfato de amônio (Figura 5), que poderiam ser consideradas como uma medida das perdas N-uréia por volatilização aparente de NH_3 , nos indicam que nas condições desse experimento essas perdas, principalmente da uréia

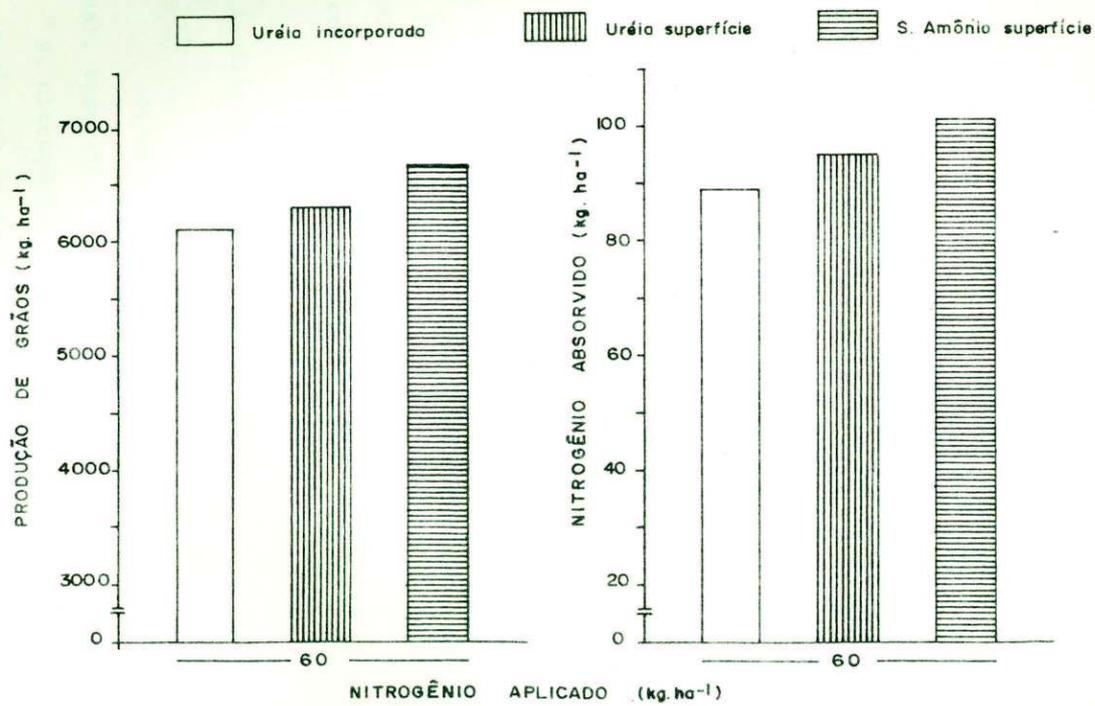


FIGURA 5 - Efeito de fontes e métodos de aplicação de nitrogênio na produção de grãos e na quantidade de nitrogênio absorvido pelo milho cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

aplicada na superfície do solo, se realmente ocorreram, foram pequenas. Desse modo, a eficiência relativa da uréia verificada nesse trabalho (Figura 5), discorda dos resultados sobre perdas de nitrogênio por volatilização de NH_3 da uréia aplicada na superfície do solo, conduzidos em condições de laboratório ou casa-de-vegetação, RODRIGUES (95) e CANTARELA & TABATABAI (19); e está de acordo com as afirmações de HARGROVE & KISSEL (53), que nas condições de campo as perdas de N-uréia por volatilização de NH_3 pode ser consideravelmente diferentes daquelas normalmente verificadas em condições de laboratório.

Os resultados de comparação entre fontes de nitrogênio encontrados neste experimento estão de acordo com aqueles obtidos de trabalhos realizados no Brasil (18, 22, 51, 70) e outros países de clima tropical, FOX et alii (42); SANCHES (97) e temperado, NELSON & MACGREGOR (78). Nestes trabalhos não se tem evidenciado diferenças nas produções das culturas entre as fontes mais comumente usadas, incluindo uréia e sulfato de amônio.

4.4. Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante

Os resultados médios de rendimento de matéria seca (kg/ha), teor (%) e quantidade (kg/ha) de nitrogênio total, átomos % de ^{15}N , nitrogênio proveniente do fertilizante, em % e kg/ha, e recuperação (%) do N-fertilizante nas diferentes partes da planta, em função do método de aplicação da uréia na dose de 60 kg N/ha, são apresentados no Quadro 8.

QUADRO 8 - Efeito do método de aplicação do ¹⁵N-uréia (60 kg N/ha) na produção de matéria seca, na quantidade de nitrogênio absorvido, átomos % de ¹⁵N, nitrogênio derivado do fertilizante e recuperação do nitrogênio pelo milho, cultivado em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

Método de Aplicação	Parte da Planta	Matéria Seca kg/ha	Nitrogênio		QNTP ^{1/} kg/ha	Átomos %		NPPF ^{2/} %	QNPPF ^{3/} kg/ha	Recupe- ração ^{4/} %
			Total %			¹⁵ N %	¹⁵ N-excesso %			
Uréia Superfície	Grãos	5802	1,430	83,00	2,1515	1,7852	32,43	26,30	43,83	
	Sabugo	1074	0,388	4,16	2,3946	2,0284	36,84	1,53	2,54	
	Folha + palha	3622	0,499	18,10	2,0571	1,6908	30,71	5,48	9,12	
	Colmo + pendão	2058	0,309	6,38	2,0970	1,7307	31,43	1,98	3,29	
	Raiz	618	0,569	3,50	1,4459	1,0796	19,61	0,68	1,13	
Uréia Incorpo- rada	Grãos	5180	1,388	72,21	2,1944	1,8281	33,20	24,00	39,82	
	Sabugo	927	0,405	3,70	2,5061	2,1398	38,87	1,44	2,40	
	Folha + palha	3150	0,478	15,30	2,0691	1,7028	30,93	4,64	7,73	
	Colmo + pendão	1851	0,321	6,00	2,0384	1,6721	32,04	1,87	3,12	
	Raiz	572	0,576	3,30	1,4655	1,0992	19,97	0,66	1,09	
Média		2485	0,636	21,57	2,0420	1,6757	30,60	6,85	11,41	
S _y		163	0,030	2,82	0,0627	0,0627	1,30	0,47	0,78	
Valor de F		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
CV %		13,08	9,48	26,00	6,15	7,50	8,40	13,60	13,61	

1/ QNTP = Quantidade de N-total na planta; 2/ NPPF = Nitrogênio na planta proveniente do fertilizante

3/ QNPPF = Quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante

4/ Recuperação em relação a dose de N-aplicada

S_y Indica o erro padrão de um particular valor médio. NS = Não significativo

Observa-se que o método de aplicação da uréia, na superfície ou incorporada no solo, não foi estatisticamente diferente (Teste F) para todos os parâmetros analisados.

Comparando as diferentes partes da planta, verifica-se que as porcentagens de nitrogênio provenientes do fertilizante, obtidas por meio da equação |12|, foram as mesmas para grãos, folha + palha e colmo + pendão, sendo, no entanto, mais alta no sabugo e, consideravelmente baixo nas raízes, com diferenças significativas pelo teste de Tukey - 5% na comparação entre médias (Quadro 9). Estes resultados mostram que é pequena a variação na composição isotópica do nitrogênio das partes da planta (grãos, folha + palha e colmo + pendão), com importante implicação no método de amostragem.

Apesar do sabugo apresentar enriquecimento em ^{15}N mais alto em relação as demais partes da planta, a sua pequena proporção em relação a planta toda, assim como baixa concentração em nitrogênio, e considerando que a concentração de ^{15}N na folha + palha e colmo + pendão foram semelhantes, não haveria necessidade de analisar separadamente estas partes resultando em economia de tempo e custos. A abundância de ^{15}N nas raízes deve ser determinada, principalmente se as amostras são retiradas na colheita. Resultados similares a estes foram observados para as seguintes culturas: milho, CHO et alii (21); trigo, CAMPBELL & PAUL (17); feijão, URQUIAGA (106), e arroz, AQUINO (05).

De acordo com CAMPBELL & PAUL (17), sendo a % NPPF se-

QUADRO 9 - Produção de matéria seca, nitrogênio absorvido, átomos % de ^{15}N , nitrogênio derivado do fertilizante e recuperação do N-urêia (60 kg N/ha), pelo milho cultivado em Latossolo Vermelho Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

Parte da Planta	Matéria Seca	Nitrogênio Total	QNT ^{1/}		Átomos % ^{15}N		NPPF ^{2/}		Recupe ^{4/} ração
			kg/ha	---	---	---	---	---	
Grãos	5491	1,409	77,64	2,1730	1,8070	32,82	25,10	41,83	
Saizugo	1000	0,396	3,93	2,4504	2,0841	37,86	1,48	2,47	
Folha + Palha	3385	0,489	16,68	2,0631	1,6968	30,82	5,06	8,43	
Colmo + Pendão	1954	0,315	6,20	2,0677	1,7014	31,74	1,93	3,21	
Raiz	595	0,572	3,40	1,4557	1,0894	19,79	0,67	1,11	
Média	2485	0,636	21,57	2,042	1,6757	30,61	6,85	11,41	
S \bar{y}	64,24	0,022	1,77	0,0183	0,0183	0,615	0,42	0,70	
Valor de F	**	**	**	**	**	**	**	**	
DMS (Tukey5%)	290	0,102	8,00	0,083	0,083	2,78	1,90	3,15	
CV %	7,31	10,00	23,00	2,54	3,10	5,70	17,30	17,30	

1/ QNT^{1/} = Quantidade de N-total na planta; 2/ NPPF = Nitrogênio na planta proveniente do fertilizante

3/ QNPPF = Quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante

4/ Recuperação em relação a dose de N-aplicado

S \bar{y} = Indica o erro padrão de um particular valor médio

** = Significativo ao nível de $P \leq 0,01$

melhantes para o grão e palhada, pode-se estimar o enriquecimento de ^{15}N para o grão medindo a abundância de ^{15}N na palhada e vice-versa.

A alta mobilidade e dinâmica dos compostos nitrogenados dentro da planta é a causa da pequena variação na composição isotópica do nitrogênio nas diferentes partes da planta, URQUIAGA (106) e AQUINO (05). O conteúdo de proteínas na planta, resultado de síntese e degradação contínua, dando como produto final da sua degradação os aminoácidos, são rapidamente redistribuídas, razão desta alta mobilidade, Hill (1980) citado por AQUINO (05).

A quantidade de nitrogênio do solo (QNPPS) absorvido pela planta no tratamento com uréia foi geralmente mais alto do que o absorvido no tratamento controle. Pelo Quadro 9, verifica-se que a quantidade de nitrogênio na planta proveniente do solo, obtido pela soma das quantidades de nitrogênio total (QNTP) em cada parte da planta e subtraindo-se a quantidade proveniente do fertilizante (QNPPF), ($\text{QNPPS} = \text{QNTP} - \text{QNPPF}$), foi de 71 kg N/ha. Como o nitrogênio absorvido pelas plantas de milho no tratamento controle (Quadro 7), foi de 54 kg N/ha, a aplicação de N-uréia aumentou em 17 kg N/ha (31,0%) a absorção do N no solo. Embora esta afirmação implique que a aplicação de uréia aumenta a mineralização líquida do N do solo, MALAVOLTA (69), é também possível que a aplicação de fertilizante nitrogenado estimula o desenvolvimento da raiz, CARTER et alii (20) e GASS et alii (48), aumentando o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

4.5. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado (EUFN)

No Quadro 10 são apresentados os resultados da eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN) pelo milho, submetido a doses, fontes e métodos de aplicação de nitrogênio e calculadas pelos métodos: indireto (diferença, equação |4|; e regressão linear, equação |5|) e direto ou isotópico (^{15}N) (equação |3|). A Figura 6 representa graficamente esses resultados.

A eficiência relativa aparente de utilização do N-fertilizante calculada pelo método da diferença, foi, em média, 68 % para a dose de 60 kg N/ha, independente da fonte e método de aplicação de nitrogênio, diminuindo para 55% com a dose de 120 kg N / ha, e decrescendo linearmente para 34% com aplicação de 240 kg N/ha (Quadro 10 e Figura 6A). A baixa recuperação de 34% do nitrogênio aplicado para a dose de 240 kg N/ha, enfatiza a importância de ajustar as aplicações de fertilizantes para aproximadamente a quantidade requerida pela cultura.

A eficiência relativa aparente de utilização do N-fertilizante de 55 e 68% (média de fontes e métodos de aplicação) para as doses de 120 e 60 kg N/ha, respectivamente, obtidas neste trabalho (Quadro 10), são semelhantes às encontradas em outros experimentos realizados no Brasil (44, 51, 79) e por FOX et alii (42) em Pôrto Rico, para a cultura do milho e com doses similares de nitrogênio. Estão também de acordo com resultados de experimentos

QUADRO 10 - Efeito de fontes, doses e métodos de aplicação na recuperação (%) do nitrogênio do fertilizante pelo milho, calculada pelos métodos indiretos (diferença e regressão linear) e direto ou isotópico (^{15}N). Sete Lagoas, MG. 1987.

Fonte de Nitrogênio	Níveis de Nitrogênio	Método de Aplicação	Métodos Indiretos		Método Direto- ^{15}N
			Diferença	Regressão linear	
			----- % -----		
Uréia	30	Incorporada	70,78	77,67	-
Uréia ^{1/}	60	Superfície	67,71	-	58,78
Uréia ^{2/}	60	Incorporada	58,03	43,33	53,07
S. Amônio	60	Superfície	78,43	-	-
Uréia	120	Incorporada	55,12	25,83	-
Uréia	240	Incorporada	33,70	17,08	-
Média			61,00	41,00	56,00
\bar{S}_y			7,44		2,00
Valor de F			*		NS
DMS (Tukey-5%)			34,22		-
CV %			24,54		7,13

* Significativo ao nível $P \leq 0,05$. NS = Não significativo.

\bar{S}_y = Indica o erro padrão de um particular valor médio

1/ e 2/ Uréia enriquecida com 5,505 átomos % em excesso.

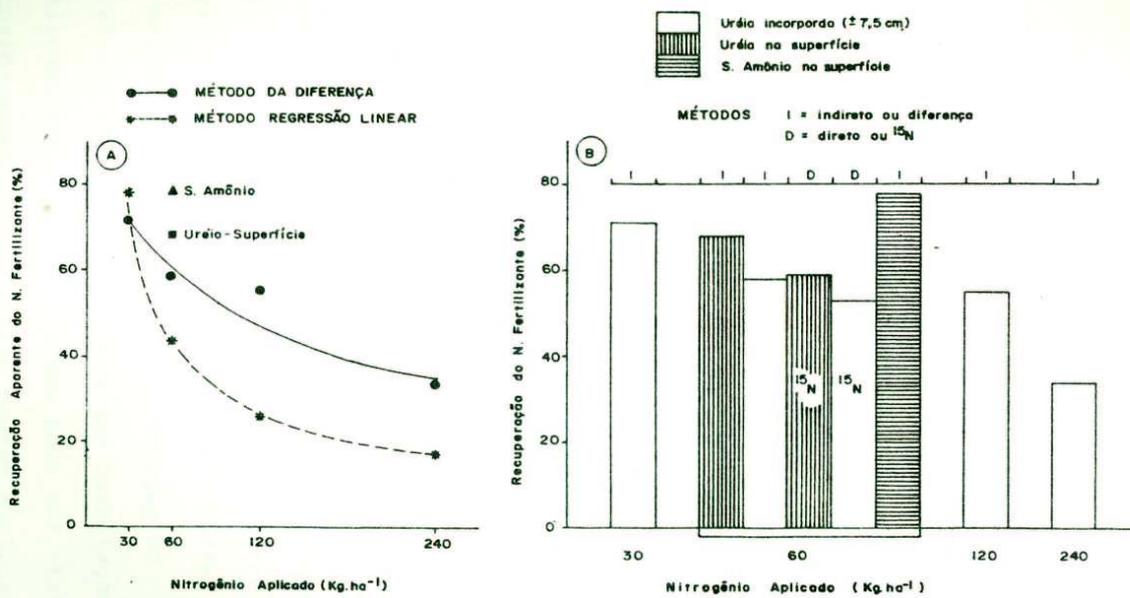


FIGURA 6 - Influência de níveis, fontes e métodos de aplicação na recuperação do N-fertilizante pelo milho, calculadas pelos métodos da diferença e regressão linear (A) e pelos métodos da diferença e direto ¹⁵N (B).

conduzidos para verificar a recuperação do N pelas culturas, revisados por ALLISON (03), os quais indicaram para uma simples colheita valores entre 50 a 70%.

A comparação entre os valores de eficiência relativa calculados pelos métodos da diferença e regressão linear, graficamente apresentados na Figura 6A, mostra que este último método fornece porcentagens de recuperação mais baixas, principalmente com doses maiores de nitrogênio.

No cálculo da eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado pelo método da regressão linear (equação | 5 |), o coeficiente de regressão (b) representa a porcentagem média de recuperação do nitrogênio pela cultura nas diferentes doses de fertilizante aplicado. Outro aspecto a ser considerado é o modelo de ajuste, pela equação de regressão, dos dados de nitrogênio absorvido pela planta (grão + palha) em relação ao nitrogênio aplicado. De acordo com WESTERMAN & KURTZ (110), quando o método da regressão é usado para calcular a recuperação do N-fertilizante, a relação linear é assumida por proporcionar a melhor relação de resposta. Neste experimento, embora a equação de regressão linear dos dados de N-absorvido ($y = 71,18 + 0,2913x$) tenha fornecido uma correlação altamente significativa ($r = 0,96^{**}$), a curva de resposta é melhor representada por uma equação do tipo quadrática ($y = 63,87 + 0,55x - 0,001 x^2$) com uma correlação também altamente significativa ($r = 0,98^{**}$), como pode ser visto na Figura 4B. Estas considerações provavelmente possam explicar os valores mais

baixos de recuperação aparente do N-fertilizante calculados pelo método da regressão linear em relação ao método da diferença (Figura 6A).

A recuperação do N-fertilizante calculadas pelos métodos isotópico (^{15}N) e da diferença (indireto) para a dose de 60 kg N/ha, independente do método de aplicação da uréia, foram, respectivamente, 56 e 63% (Quadro 10, Figura 6B), indicando que o método da diferença superestimou a recuperação em apenas 7%. Em oito experimentos revisados por HAUCK (56) os valores de recuperação obtidos com o método da diferença variou de 3 a 7% a mais (p.ex. 60% vs 67%) do que aqueles obtidos com o método isotópico (^{15}N). Entretanto, em experimento envolvendo doses de nitrogênio e métodos de aplicação, MORAGHAN et alii (75) encontraram que o método indireto forneceu valores de recuperação de 12 a 28% a mais do que o método isotópico (^{15}N).

De acordo com HAUCK & BREMNER (57), as diferenças nesses valores são menores quando: a) a quantidade de nitrogênio mineralizado durante o período experimental é pequena; b) a quantidade total de nitrogênio do solo removido pela cultura é pequena, e/ou c) quando a determinação dos valores de recuperação são efetuadas na colheita (as diferenças geralmente são maiores durante os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura ou em experimentos com colheitas sucessivas).

Á pequena diferença verificada neste experimento entre os valores de recuperação do N-fertilizante entre os métodos (Qua

dro 10, Figura 6B) deve-se, provavelmente, à alta precisão experimental obtida, aliada a uma adequada estimativa do nitrogênio absorvido no tratamento controle, que segundo DOWDELL et alii (30) tem grande influência no cálculo da recuperação do N-fertilizante quando estimada pelo método da diferença. Entretanto, confirma as observações de OLSON & SWALLOW (86), nas quais os dados de recuperação aparente apresentam maiores variações como mostrado pelos altos valores do desvio padrão e coeficiente de variação, quando comparados aos obtidos para os dados calculados pelo método isotópico (^{15}N) (Quadro 10).

4.6. Nitrogênio no Solo Proveniente do Fertilizante (NSPF)

4.6.1. Nitrogênio Total

A distribuição do N-total proveniente do fertilizante à várias profundidades no perfil do solo é mostrado nos Quadros 11 e 12.

O método de aplicação do N-uréia não afetou significativamente (Teste F) a retenção do nitrogênio do fertilizante no solo, como pode ser observado pelo Quadro 11 em que as concentrações de átomos % de ^{15}N , teor (%) e quantidade (kg/ha), assim como a porcentagem de recuperação do nitrogênio do fertilizante apresentam resultados semelhantes. A porcentagem de recuperação do nitrogênio do fertilizante na camada de 0 - 90 cm foi em média de 23 para ambos os métodos de aplicação da uréia, na superfície

QUADRO 11 - Distribuição do nitrogênio total, átomos % ¹⁵N e nitrogênio total proveniente do fertilizante no perfil do solo após a colheita do milho, em função dos métodos de aplicação da uréia na dose de 60 kg N/ha. Sete Lagoas, MG. 1987.

Método de Aplicação	Profundidade	Nitrogênio total	Nitrogênio total	Átomos % ¹⁵ N	Átomos % ¹⁵ N excessos	NSPF ^{2/}	QNSPF ^{3/}	Recuperação
	--cm--	kg.ha ⁻¹	-----%-----	--%-----	-- %-----	--%---	kg.ha ⁻¹	-----%-----
Uréia Superfície	0- 15 ^{1/}	1768	0,154	0,3936	0,0273	0,4950	9,36	15,61
	15- 30	1250	0,113	0,3733	0,0070	0,1272	1,59	2,65
	30- 45	933	0,092	0,3731	0,0068	0,1226	1,14	1,84
	45- 60	830	0,082	0,3714	0,0051	0,0917	0,76	1,27
	60- 90	1570	0,071	0,3702	0,0039	0,0704	1,11	1,86
	90-120	1447	0,063	0,3702	0,0039	0,0708	1,03	1,72
	120-150	1343	0,057	0,3712	0,0048	0,0881	1,18	1,98
Uréia Incorporada	0- 15	1748	0,153	0,3932	0,0270	0,4886	9,20	15,30
	15- 30	1308	0,118	0,3730	0,0067	0,1208	1,57	2,62
	30- 45	981	0,094	0,3722	0,0059	0,1067	1,04	1,77
	45- 60	809	0,080	0,3715	0,0052	0,0940	0,76	1,27
	60- 90	1579	0,071	0,3710	0,0045	0,0822	1,30	2,11
	90-120	1538	0,065	0,3713	0,0050	0,0904	1,40	2,34
	120-150	1346	0,057	0,3704	0,0041	0,0740	0,99	1,67
Média		1318	0,091	0,3746	0,00835	0,1516	2,32	3,86
S _y		42,33	0,0024	0,00062	0,000623	0,0113	0,19	0,33
Valor de F		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV %		6,43	5,40	0,33	14,93	14,94	16,70	17,03

1/ Inclui recuperação do ¹⁵N-fertilizante nas raízes+solo 2/ NSPF= Nitrogênio no solo proveniente do fertilizante. 3/ QNSPF = Quantidade de nitrogênio no solo proveniente do fertilizante
S_y= Indica o erro padrão de um particular valor médio NS = Não significativo

QUADRO 12 - Nitrogênio total, átomos % ¹⁵N e nitrogênio total proveniente do fertilizante no perfil do solo após a colheita do milho. Sete Lagoas, MG. 1987.
(Dados médios dos métodos de aplicação da uréia, na dose de 60 kg N/ha).

Profundidade (cm)	Nitrogênio total kg.ha ⁻¹	Nitrogênio total --- % ---	Átomos % ¹⁵ N -- % --	Átomos % ¹⁵ N excesso ---%---	NSPF ^{2/} --%--	QNSPF ^{3/} kg.ha ⁻¹	Recuperação ---%---
0- 15 ^{1/}	1758	0,153	0,3934	0,0271	0,4920	9,28	15,45
15- 30	1279	0,116	0,3731	0,0068	0,1240	1,58	2,64
30- 45	957	0,093	0,3726	0,0063	0,1150	1,09	1,80
45- 60	819	0,081	0,3714	0,0051	0,0930	0,76	1,27
60- 90	1574	0,071	0,3705	0,0042	0,0763	1,20	1,98
90-120	1492	0,064	0,3707	0,0044	0,0806	1,21	2,03
120-150	1344	0,057	0,3708	0,0045	0,0811	1,09	1,83
Média	1318	0,091	0,3746	0,0083	0,1517	2,32	3,86
Sy	37	0,0016	0,00043	0,00043	0,0078	0,13	0,21
Valor de F	**	**	**	**	**	**	**
DMS (Tukey5%)	173	0,0075	0,0020	0,0020	0,036	0,60	0,98
CV %	8,00	5,00	0,33	14,60	14,60	15,50	15,34

1/ Inclui recuperação do ¹⁵N-fertilizante nas raízes+solo 2/ NSPF = nitrogênio no solo proveniente do fertilizante 3/ QNSPF = Quantidade de nitrogênio no solo proveniente do fertilizante
Sy = Indica o erro padrão de um particular valor médio
** = Significativo ao nível P < 0,01

e incorporada no solo (Quadro 11). Resultados semelhantes foram encontrados por MORAGHAN et alii (76) em que as quantidades de nitrogênio do fertilizante recuperado no solo não foram diferentes para a uréia aplicada na superfície ou incorporada a 10 cm no solo.

A maioria do N-fertilizante que permaneceu no solo, após a colheita do milho, localizou-se na camada superficial de 0 - 15 cm (Quadro 12). Por exemplo, a quantidade de N-fertilizante residual na camada superficial de 0 - 15 cm, expressa como a porcentagem do total recuperado no perfil do solo (0 - 90 cm), atinge à 67%. Este resultado, associado as pequenas quantidades (< 2 kg N/ha), recuperadas nas camadas abaixo de 15 cm, nos indicam que o nitrogênio fornecido como fertilizante teve uma baixa mobilidade no solo (Quadro 12).

Experimentos de campo utilizando-se da técnica do ¹⁵N tem mostrado que as quantidades de nitrogênio residual encontradas no solo, embora variem consideravelmente, LEGG & MEISINGER (64), concentram-se nas camadas superficiais, como mostram os trabalhos de (63, 75, 76, 84, 106).

Os fatores que contribuíram para os resultados encontrados nesse experimento, provavelmente incluem: uso de dose moderada de nitrogênio, época de aplicação, características do solo, tais como alto teor de argila e matéria orgânica, cultura altamente extrativa, chuvas e irrigações bem distribuídas ao longo do ciclo da cultura, como pode ser verificado pelos dados apresentados

na Figura 1A (Apêndice).

4.6.2. Nitrogênio Inorgânico

Os dados médios de distribuição do N inorgânico (N-NH_4^+ e $\text{N-NO}_3^- + \text{NO}_2^-$), proveniente do fertilizante no perfil do solo, são mostrados no Quadro 13. A maior proporção do nitrogênio residual do fertilizante, foi imobilizado na matéria orgânica do solo, com somente 11 a 28% nas formas inorgânicas. As quantidades como NH_4^+ variaram de 3 a 13%, com 6 a 19% do N-fertilizante nas formas de $\text{N-(NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$, sendo que as maiores concentrações localizam-se nas camadas de solo abaixo de 60 cm, indicando movimentação do N-fertilizante tanto na forma de N-NH_4^+ como $\text{N-(NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$, embora em pequenas quantidades (Quadro 13).

A maior quantidade residual do N-fertilizante na camada superficial (Quadro 12), foi imobilizado na matéria orgânica do solo, como mostrado pelas baixas concentrações de nitrogênio inorgânico (Quadro 13). Isto provavelmente é uma das causas da pequena movimentação do N-fertilizante nesse solo, o que também pode ter influenciado o seu aproveitamento pela cultura. Observa-se um acúmulo de nitrogênio inorgânico (85 kg N/ha) abaixo de 90 cm. A quase totalidade desse nitrogênio (99%) é proveniente da mineralização da matéria orgânica do perfil do solo.

4.7. Balanço do Nitrogênio Proveniente do Fertilizante no Sistema Solo-Planta

A recuperação do N-uréia aplicada na superfície e in-

QUADRO 13 - Recuperação do nitrogênio do fertilizante nas formas inorgânicas à várias profundidades no perfil do solo após a colheita do milho. Sete Lagoas, MG. 1987. (Dados médios dos métodos de aplicação da uréia no solo, na dose de 60kg N/ha).

Profundidade	Nitrogênio inorgânico				Recuperação ¹⁵ N-fertilizante			Recuperação ¹⁵ N-fertilizante		
	N-NH ₄ ⁺	N-(NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻)	Total		N-NH ₄ ⁺	N-(NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻)	Total	N-NH ₄ ⁺	N-(NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻)	Total
--cm--	ppm		kg.ha ⁻¹		%			kg.ha ⁻¹		
0- 15	1,78	5,63	7,40	8,54	6,54	11,51	18,05	0,610	1,078	1,687
15- 30	0,73	7,61	8,40	9,25	3,30	9,20	12,50	0,054	0,145	0,199
30- 45	0,71	6,62	7,32	7,54	3,55	8,50	12,04	0,039	0,093	0,131
45- 60	1,54	2,32	3,75	3,84	4,35	6,36	10,71	0,039	0,050	0,089
60- 90	2,42	2,02	4,45	9,94	13,04	13,00	26,04	0,154	0,146	0,300
90-120	1,24	11,40	12,65	29,87	9,47	18,22	27,70	0,114	0,222	0,336
120-150	1,22	21,78	23,00	54,67	8,75	19,05	27,05	0,096	0,209	0,305
Média	1,38	8,20	9,56	17,66	7,00	12,25	19,14	0,158	0,277	0,435
Sy	0,28	0,91	1,00	2,18	0,50	0,47	0,95	0,026	0,045	0,070
Valor de F	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
DMS (Tukey5%)	1,33	4,27	4,65	10,20	2,30	2,20	4,44	0,117	0,215	0,330
CV %	58,0	32,0	29,0	35,0	20,0	11,0	14,0	44,0	47,0	46,0

Sy = Indica o erro padrão de um particular valor médio
 ** = Significativo ao nível P ≤ 0,01

corporada no solo à 7,5 cm, foi determinada através das análises de ^{15}N em amostras de material de solo e planta.

No Quadro 14 é apresentado o balanço da quantidade (kg/ha) e teor (%) de nitrogênio aplicado como fertilizante ao sistema solo-planta em estudo, após o cultivo do milho (*Zea mays*, L.). A Figura 7 ilustra graficamente estes resultados.

A estimativa do erro para o nitrogênio total recuperado no sistema solo-planta foi calculado pela equação |18|, utilizando-se as repetições dos dados originais do teor (%) e quantidade (kg/ha) do N-fertilizante recuperado no solo (0 - 90 cm) e planta. Para os dados expressos em porcentagem obteve-se:

$\text{VAR} (\text{Np}) = 15,76$ (CV de 7,13%); $\text{VAR} (\text{NS}) = 4,26$ (CV de 9,0%) para profundidade de 0 - 90 cm incluindo raízes, e a $\text{COV} (\text{NpNs})$ é 5,65 ($r = 0,69$), obtendo-se com este dado a $\text{VAR} (\text{NT}) = 31,31$. Cálculos semelhantes foram feitos para os dados expressos em kg/ha, obtendo-se: $\text{VAR} (\text{Np}) = 6,61$ (CV de 7,7%) $\text{VAR} (\text{NS}) = 0,97$ (CV de 7,0%) e a $\text{COV} (\text{NpNs})$ é 1,42 ($r = 0,56$), tendo-se assim a $\text{VAR} (\text{NT}) = 10,42$.

Os resultados do balanço do nitrogênio apresentado no Quadro 14, indicam que 24 e 26 kg N/ha (40 e 44%) foram removidos nos grãos, com apenas 8 e 9 kg N/ha (13 e 15%) na matéria seca da parte aérea e 14 kg N/ha (23%) permaneceu no solo como N-residual. Pôde-se assim, contabilizar 46 e 49 kg N/ha (77 e 82%) do total de nitrogênio fornecido ao sistema solo-planta em estudo,

QUADRO 14 - Balanço do nitrogênio, proveniente da uréia (60 kg N/ha), no sistema solo-planta da cultura do milho em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado - Sete Lagoas, MG. 1987.

Destino do N-fertilizante	Nitrogênio do fertilizante recuperado				Média	
	Uréia aplicada na superfície		Uréia incorporada			
	kg.ha ⁻¹	--%--	kg.ha ⁻¹	--%--	kg.ha ⁻¹	--%--
Removido nos grãos	26,30	43,83	24,00	39,82	25,15	44,33
Removido no sabugo	1,53	2,54	1,44	2,40	1,48	2,47
Removido na Folha-Palha	5,48	9,12	4,64	7,73	5,06	8,43
Removido no Colmo+Pendão	1,98	3,29	1,87	3,12	1,93	3,20
Total removido na planta	35,29	58,78	31,95	53,07	33,62	56,00
Retido no solo (0-90cm)	13,96	23,23	13,87	23,07	13,91	23,15
Total recuperado (Planta + Solo)	49,25	82,01	45,82	76,77	47,53	79,40
Perdas lixiviação	2,21	3,70	2,39	4,01	2,30	3,85
Estimativa do êrro	3,23	5,60	3,23	5,60	3,23	5,60
Déficit	5,81	8,70	8,56	14,40	7,00	11,55

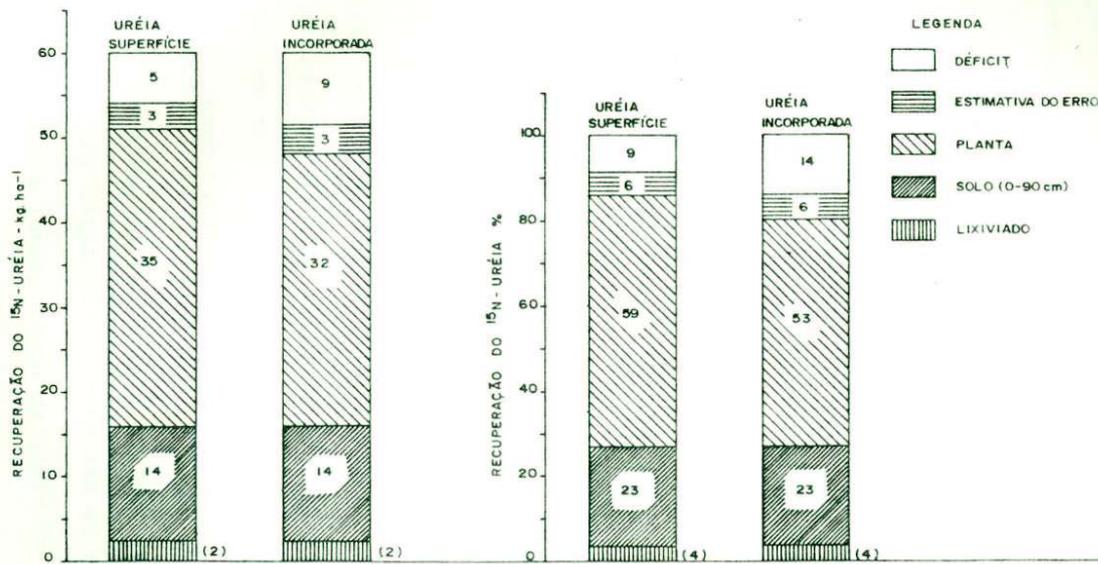


FIGURA 7 - Balanço do nitrogênio, proveniente da uréia (60kgN/ha), no sistema solo-planta da cultura do milho em Latossolo Vermelho Escuro fase cerrada. Sete Lagoas, MG, 1987.

após o cultivo do milho. De acordo com ALLISON (03) a quantidade de N-aplicado recuperado pelas culturas mais o N-residual no solo em experimentos de campo, frequentemente variam de 70 a 90%.

O total do N-fertilizante recuperado no sistema solo-planta não foi significativamente (Teste F) afetado pelo método de aplicação da uréia. A recuperação do N-fertilizante foi respectivamente 49 (82%) e 46 kg/ha (77%) para a uréia aplicada na superfície e incorporada no solo (Quadro 14, Figura 7). Resultados semelhantes foram observados por MORAGHAN et alii (76) em que a aplicação da uréia na superfície e incorporada no solo (10 cm), resultou em recuperação do ¹⁵N-fertilizante e eficiência agronômica, similares para os dois métodos de aplicação.

Pelo fato de ser a uréia um fertilizante que apresenta um alto potencial de perdas de nitrogênio por volatilização de amônia, principalmente quando aplicada na superfície do solo, o que tem sido amplamente comprovado em estudos realizados em condições de laboratório e casa-de-vegetação (19, 38, 39, 95), a sua incorporação no solo tem sido recomendada como uma alternativa para reduzir ou mesmo eliminar estas perdas.

Entretanto, os resultados obtidos neste trabalho e aqueles relatados por DALAL (27) e MORAGHAN et alii (76), que em condições de campo, a incorporação da uréia no solo, não tem refletido numa maior eficiência agronômica, indica que para uma determinada situação, as condições de umidade do solo e a ocorrência de precipitação ou irrigação nos dias seguintes a aplicação

da uréia, são provavelmente os fatores determinantes da quantidade de amônia que pode ser volatilizada.

No presente trabalho, em que a recuperação do N-fertilizante pelo milho (*Zea mays* L.) não foi afetado pelo método de aplicação da uréia (Quadro 14), poderia ser explicada pelas condições de umidade do solo na época de aplicação do fertilizante e a ocorrência de precipitação e irrigação nos dias subsequentes. Por esta ocasião, o solo apresentava-se com a superfície seca e com um teor de umidade, avaliado pelo bloco de gesso, de 33% à profundidade de 10 cm.

De acordo FERGUSON & KISSEL (39), se a uréia é aplicada sobre a superfície seca do solo não é provável que ocorra perdas significativas de N por volatilização de NH_3 . Mesmo que a superfície do solo esteja inicialmente úmida ou se o conteúdo de água aumenta à noite devida a baixa demanda evaporativa, as condições para volatilização de NH_3 pode ser limitada se a superfície do solo seca rapidamente durante o dia ao ponto de inibir a hidrólise da uréia.

Por outro lado, uma irrigação de 28 mm aplicada quatro dias após a adubação nitrogenada de cobertura, juntamente com precipitações de 52 mm que ocorreram no sexto e sétimo dias após (Figura 1A - Apêndice), favoreceram a incorporação da uréia ou o N-amoniaco ao solo reduzindo as perdas por volatilização e aumentando a adsorção. BOUWMEESTER et alii (11) verificaram que uma precipitação de 24 mm foi suficiente para proteger o N-uréia das

perdas por volatilização de NH_3 , o mesmo não ocorreu com precipitação da ordem de 8 mm. A quantidade de precipitação necessária para lixiviar a uréia a uma dada profundidade do solo, suficiente para eliminar as perdas por volatilização de NH_3 é dependente de diversos fatores, podendo citar entre eles: o conteúdo inicial de umidade do solo, capacidade tampão e capacidade de troca de cátions, FERGUSON & KISSEL (39).

Os dados do balanço do nitrogênio apresentados no Quadro 14 e representados graficamente na Figura 7, mostram que após a correção do erro, em média 12,4 e 18,4% do N-fertilizante foi perdido do sistema, respectivamente para a uréia aplicada na superfície e incorporada no solo. Desse total não recuperado no sistema solo-planta, encontrou-se neste experimento que apenas 4,0% (2,0 kg N/ha) do N-fertilizante aplicado, foi perdido por lixiviação no perfil do solo, abaixo da camada de 90 cm, considerada como secção de controle. Outros experimentos realizados no Brasil, utilizando-se da técnica do ^{15}N e revisados por REICHARDT et alii (92) mostraram que com o uso de doses normais de fertilizantes (< 100 kg N/ha) as perdas de nitrogênio por lixiviação não constituíram-se no principal mecanismo em afetar a eficiência de utilização do N-fertilizante pelas culturas.

Assim, a idéia generalizada de que em condições tropicais, em que geralmente se associam altas precipitações e solos com elevada permeabilidade, a eficiência de utilização dos fertilizantes nitrogenados pelas culturas é baixa, devido ao alto po-

tencial de perdas, principalmente por lixiviação, não se aplica a tôdas as condições de solos, clima e culturas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, após serem analisados, permitiram as seguintes conclusões:

1- Houve pronunciada resposta na produção à aplicação de nitrogênio com um incremento de 80% no rendimento de grãos da dose zero para 120 kg N/ha (3943 para 7110 kg/ha respectivamente).

2- A máxima produção física de grãos (7300 kg/ha) foi obtida com a dose de 188 kg N/ha. Entretanto, a dose de nitrogênio necessária para atingir 90% da produção máxima (6570 kg/ha) está em torno de 80 kg N/ha.

3- A capacidade do solo em suprir nitrogênio à cultura foi de 54 kg N/ha, suficiente para produzir 3943 kg/ha de grãos.

4- Do total de nitrogênio extraído pela cultura, encontrava-se nos grãos, em média, 80% (75 kg N/ha) sendo exportado na colheita, e apenas 20% (17 kg N/ha) na matéria seca da parte aérea.

5- As fontes de nitrogênio empregadas (sulfato de amô-

nio e uréia) não diferiram em seus efeitos na produção de grãos e nitrogênio absorvido.

6- As porcentagens de nitrogênio proveniente do fertilizante foram semelhantes nos grãos, folha + palha e colmo + pendão, em função da pequena variação na composição isotópica do nitrogênio nestas partes da planta.

7- A eficiência relativa aparente de utilização do N-fertilizante diminuiu gradativamente com o aumento na dose de nitrogênio aplicada.

8- A recuperação do N-fertilizante calculada pelos métodos isotópicos (^{15}N) e da diferença foram semelhantes (56 e 63% respectivamente) na dose de 60 kg N/ha. O método da regressão linear forneceu valores mais baixos em relação ao método da diferença.

9- O nitrogênio proveniente do fertilizante que permaneceu no solo na camada de 0 - 90 cm, após o cultivo do milho, foi de 14 kg N/ha, sendo que 67% localizou-se na camada superficial de 0 - 15 cm.

10- A maior proporção do nitrogênio residual do fertilizante que permaneceu no solo foi imobilizado na matéria orgânica com somente 11 a 28% nas formas inorgânicas.

11- O método de aplicação da uréia, na superfície e incorporada no solo (7,5 cm), não afetou a eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado.

12- O balanço do nitrogênio no sistema solo-planta indicou que da dose de 60 kg N/ha aplicada na forma de uréia, 56% foi absorvido pela planta (34 kg N/ha), 23% permaneceu no solo na camada de 0 - 90 cm (14 kg N/ha) e 15% perdido do sistema (9 kg N/ha). A perda por lixiviação correspondeu a 4% (2 kg N/ha) do total do N aplicado, sendo o restante atribuído a outros processos não identificados neste trabalho.

6. RESUMO

Experimento de campo, foi conduzido em Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado, no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (EMBRAPA), Sete Lagoas, MG, com a finalidade de estabelecer o balanço do nitrogênio no sistema solo-planta da cultura do milho (*Zea mays* L.) através da técnica do ^{15}N .

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados com quatro repetições e oito tratamentos, envolvendo fontes de nitrogênio (uréia e sulfato de amônio), doses (0; 10; 40; 70; 130 e 250 kgN/ha, sendo 10 kg no plantio e o restante em cobertura) e métodos de aplicação (na superfície e incorporado no solo). A uréia, contendo 5,505 átomos % de ^{15}N em excesso, foi aplicada na dose de 60 kgN/ha, na superfície e incorporada a 7,5cm no solo. O sulfato de amônio, na dose de 60 kgN/ha, foi aplicado na superfície do solo. Para as doses de 30; 120 e 240 kgN/ha, utilizou-se uréia, incorporada no solo.

Na colheita, amostras de material de planta (grãos, sabugo, folha + palha, colmo + pendão e raízes) e solo (0 - 15; 15-30; 30 - 45; 45 - 60; 60 - 90; 90 - 120 e 120 - 150 cm), foram

analisadas para nitrogênio total e átomos % de ^{15}N , sendo também determinado o nitrogênio no solo proveniente do fertilizante, nas formas inorgânicas.

Com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- a) houve pronunciada resposta na produção à aplicação de nitrogênio com um incremento de 80% no rendimento de grãos da dose zero para 120 kgN/ha (3943 para 7110 kg/ha respectivamente);
- b) a dose de nitrogênio necessária para atingir 90% da produção máxima (6570 kg/ha) está em torno de 80 kgN/ha;
- c) a capacidade do solo em suprir nitrogênio à cultura foi de 54 kgN/ha, suficiente para produzir 3943 kg/ha de grãos;
- d) do nitrogênio extraído pela cultura, encontrava-se nos grãos, em média, 80% (75 kgN/ha), sendo exportado na colheita, e apenas 20% (17 kgN/ha) na matéria seca da parte aérea;
- e) as fontes de nitrogênio empregadas (sulfato de amônio e uréia) não diferiram em seus efeitos na produção de grãos e nitrogênio absorvido;
- f) as porcentagens de nitrogênio provenientes do fertilizante foram semelhantes nos grãos, folha+palha e colmo+pendão, em função da pequena variação na composição isotópica do nitrogênio nestas partes da planta;
- g) a eficiência relativa aparente de utilização do N-fertilizante diminui gradativamente com o aumento na dose de nitrogênio aplicada;
- h) a recuperação do N-fertilizante calculada pelos métodos isotópico (^{15}N) e da diferença foram semelhantes (56 e 63% respectiva-

mente) na dose de 60 kgN/ha;

i) o nitrogênio proveniente do fertilizante que permaneceu no solo na camada de 0-90 cm, após o cultivo do milho, foi de 14 kgN/ha, sendo que 67% localizou-se na camada superficial de 0-15 cm, sendo imobilizado na matéria orgânica.

j) o método de aplicação da uréia, na superfície e incorporada no solo (7,5 cm) não afetou a eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado. Outra conclusão importante é que o balanço do nitrogênio no sistema solo-planta indicou que da dose de 60kgN/ha aplicada na forma de uréia, 56% foi absorvido pela planta (34kgN/ha), 23% permaneceu no solo na camada de 0-90 cm (14 kgN/ha) e 15% perdido do sistema (9 kgN/ha). A perda por lixiviação correspondeu a 4% (2 kgN/ha) do total do N aplicado, sendo o restante atribuído a outros processos não identificados neste trabalho.

NITROGEN (¹⁵ N) BALANCE IN CORN (*Zea Mays*, L.) CULTIVATED IN DARK-
RED LATOSOL CERRADO (savanna like vegetation) PHASE

7- SUMMARY

A field experiment was conducted on a Dark Red Latosol (Oxisol), at the Centro Nacional de Milho e Sorgo (EMBRAPA), Sete Lagoas, Minas Gerais State, with the objective of evaluating the nitrogen balance in the soil-plant system with corn (*Zea mays* L.) using ¹⁵ N tracer method.

The experimental design was in randomized blocks, with 8 treatments, being these constituted by 2 nitrogen sources (urea and ammonium sulfate) used in different rates combined with 2 different methods of application (applied on soil surface and banded 7,5 cm depth). The urea, containing 5.505% excess ¹⁵ N was applied at a rate of 60 kg N/ha, in both surface and banded in the soil at 7,5 cm depth. The ammonium sulfate, in the rate of 60 kg N/ha, was applied on soil surface. Urea was applied banded in the soil 7,5 cm depth in the rates of 30, 120 and 240 kg N/ha.

At the harvest time, plants samples (grain, cob, leaves plus husk, stems plus tassel, and root) and soil (0 - 15; 15 - 30; 30 - 45; 45 - 60; 60 - 90; 90 - 120 and 120 - 150 cm) were analyzed for total nitrogen and ¹⁵ N atoms %, as well as the soil nitro

gen supplied by N-fertilizer in the inorganic forms.

Based on the results obtained it was possible conclude that:

a) Nitrogen presented a great effect on grain production, with increment of 80% in relation to the treatment without nitrogen (from 3943 kg/ha without nitrogen to 7110 kg/ha for the rate of 120 kg N/ha).

b) the rate of nitrogen necessary to obtain 90% of the maximum yield (6570 kg/ha) was about 80 kg N/ha).

c) the ability of the soil to supply nitrogen for the crop was 54 kg N/ha and was sufficient to produce 3943 kg/ha.

d) 80% (75 kg N/ha) of the total N utilized by the crop was accumulated by the grains and the other 20% (17 kg N/ha) was in the dry matter of aerial part.

e) the nitrogen sources (ammonium sulfate and urea) presented no differences in relation to grain production and nitrogen absorbed.

f) the percentages of the nitrogen provided by the N-fertilizer were similar in the grains, leaves plus husk and stems plus tassel, as a function of a small variation in the isotopic composition of the nitrogen in these parts of the corn plants.

g) the efficiency of N-fertilizer decreased with an increment in the amount of N applied.

h) the N-fertilizer recovery evaluated by the ^{15}N tracer method and by the difference method was similar (56 and 63% respectively) when 60 kg N/ha was applied.

i) the amount of N supplied by the fertilizer and retained by the soil in the depth of 0 - 90 cm, after cropping; was 14 kg N/ha, with 67% immobilized in organic form in the 0 - 15 cm depth.

j) the N-fertilizer efficiency was not affected when urea was applied on soil surface or banded in the soil at 7,5 cm depth. Other important conclusion is that the N balance in the soil-plant system indicated that at the rate of 60 kg N/ha, when N was supplied by urea, 56% (34 kgN/ha) was in the plant, 23% (14 kg N/ha) remained in the soil in the depth of 0 - 90 cm, and 15% (9 kg N/ha) lost from the system. The lost by leaching was only 4% (2 kg N/ha) of the total N applied. Other processes not evaluated in this study also contributed to the nitrogen lost.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ALEXANDER, M. Introducion to soil microbiology. New York , J. Willey, 1961. 472p.
02. ALLISON, F.E. Evaluation of incoming and outogoin processes that affect soil nitrogen. In: BARTHOLOMEW, W.V. & CLARK, F.E., eds. Soil nitrogen. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.573-615.
03. _____. The fate of nitrogen applied to soils. Advances in Agronomy, New York, 18:219-58, 1966.
04. ANJOS, J.T. & TEDESCO, M.J. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. Científica, Jabotical, 4(1):49-55, abr. 1976.
05. AQUINO, A.R.L. de. Níveis e modos de aplicação de uréia ¹⁵N no arroz (*Oryza sativa* L.) submetido a veranicos. Piracibaca, ESALQ, 1984. 134p. (Tese Doutorado).

06. ARAUJO SILVA, J.C. de. Movimento e perdas por lixiviação de nitrogênio $\text{CO}(\text{}^{15}\text{NH}_2)_2$ - em um Alfisol cultivado com milho (*Zea mays* L.). Piracicaba, ESALQ, 1982. 68p. (Tese MS).
07. AVELAR, B.C. Dados gerais do CNPMS. In: EMBRAPA-CNPMS. Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1980 - 1984. Sete Lagoas, 1986. p.13-4.
08. BANDEL, V.A.; DZIENIA, S. & STANFORD, G. Comparison of N-fertilizer for no-till corn. Agronomy Journal, Washington, 72(2):337-41, Mar./Apr. 1980.
09. BARTHOLOMEW, W.V. El nitrogen y la matéria orgânica de los suelos. In: DROSDOFF, M. et alii, eds. Suelos de las regiones tropicales húmedas. Buenos Aires. Ed. Marymar, 1975. p.85-107.
10. BIGERIEGO, M.; HAUCK, R.D. & OLSON, R.A. Uptake, translocation and utilization of ^{15}N -depleted fertilizer in irrigated corn. Soil Science Society of America Journal, Madison, 43(03):528-33, May/June 1979.
11. BOUWMEESTER, R.J.B.; VLEK, P.L.G. & STUMPE, J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. Soil Science Society of America Journal, Madison, 49(2):376-81, Mar./Apr. 1985.
12. BRADY, N.C. Aspectos econômicos do enxofre e do nitrogênio dos solos. In _____. Natureza e propriedades dos solos. 6.ed. Rio de Janeiro, 1983. p.439-75.

13. BREMNER, J.M. & EDWARDS, A.P. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. I. Apparatus and procedure for distillation and determination of ammonium. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 29(5):504-7, Sept./Oct. 1965.
14. _____ & SHAW, K. Denitrificação in soil. II: Factors affecting denitrifications. Journal Agriculture Science, 51:40-52, 1958.
15. BROADBENT, F.E. & CLARK, F. Denitrification. In: BARTHOLOMEW, W.V. & CLARK, F.E., eds. Soil nitrogen. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Pt.10, p.347-58.
16. BURESH, R.J.; AUSTIN, E.R. & CRASWELL, E.T. Analytical methods in ¹⁵N research. Fertilizer Research, The Hague, 3:37-62, 1982.
17. CAMPBELL, C.A. & PAUL, E.A. Effects of fertilizer N and soil moisture on mineralization, N recovery and A-values, under spring wheat grown in small lysimeters. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 58(1):39-5, Feb. 1978.
18. CAMPOS, A.X. & TEDESCO, M.J. Eficiência da uréia e do sulfato de amônio na cultura do milho (*Zea mays* L.). Agronomia Sulriograndense, Porto Alegre, 15(1):119-25, mar. 1979.

19. CANTARELLA, H. & TABATABAI, M.A. Volatilização de amônia de alguns fertilizantes nitrogenados aplicados a solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 20, Belém, 1985. Resumos... Belém, SBCS. 1985. p.90.
20. CARTER, J.N.; BENNET, O.L. & PEARSON, R.W. Recovery of fertilizer nitrogen under field conditions using nitrogen - 15. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 31(1):50-6, Jan./Feb. 1967.
21. CHO, M.C.; HAUNOLD, E.; ENGELBERT, E. & FRIED, M. ¹⁵N field experiment with maize within the framework of an international program. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 8, Bucharest, 1964. Transactions comptes-rendus berichte... Bucharest, 1964. p.87-96.
22. COELHO, A.M. & SILVA, B.G. da. Fontes de nitrogênio na consorciação milho verde e feijão. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 15, Maceió, 1984. Anais... Brasília, EMBRAPA/EPEAL, 1986. p.323-30.
23. COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais; 3a. aproximação. Belo Horizonte, EPAMIG, 1978. 80p.
24. COOPER, G.S. & SMITH, R.L. Sequence of products formed during denitrification in some diverse western soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 27(6):659-62, Nov./Dec. 1963.

25. CRAIG, J.R. & WOLLUM, A.G. Amonia volatilization and soil nitrogen changes after urea and ammonium nitrate fertilization of pinus taeda L. II. Soil Science Society of America Journal, Madison, 46(2):409-14, Mar./Apr. 1982.
26. DALAL, R.C. Comparative efficiency of soluble and controlled release sulphur coated urea nitrogen for corn in tropics. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 38(6):970-4, Nov./Dec. 1974.
27. _____. The use of urea and sulfur-coated uréia for corn production in a tropical soil. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 39(5):1004-5, Sept./Oct. 1975.
28. DEVINE, J.R. & HOLMES, M.R.J. Field experiments comparing ammonium nitrate, ammonium sulphate and ureia applied repetitively to grass land. Journal Agricultural Science, 60:297-304, 1963.
29. DIAS FILHO, F.A. & PEREIRA NETO, J.C.S. Adequação da produção Brasileira de fertilizantes nitrogenados. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16, Ilhéus, 1984. Anais... Ilhéus, 1985. p.275-81.
30. DOWDELL, R.J. & WEBSTER, C.P. A lysimeter study of the fate of fertilizer nitrogen in spring barley crops grow on a shallow soil overlying chalk: denitrification losses and the nitrogen balance. Journal of Soil Science, Edinburgh, 35(2):183-90, June 1984.

31. EIRA, P.A.; ALMEIDA, D.L. & ALVAIDO, R. Movimentação do ion nitrato em solos da série Itaguai, nas condições naturais de campo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 3: 267-73, 1968.
32. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. Relatório técnico anual 1978-1979. Planaltina, 1980. 170p.
33. _____. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Relatório técnico anual 1979-1980. Sete Lagoas, 1981. 207p.
34. _____. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. n.p.
35. ERNST, J.W. & MASSEY, H.F. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 24: 87-90, 1960.
36. FEDERER, W.T. Experimental design. New York, Mac Millan, 1955. 544p.
37. FENN, L.B. & KISSEL, D.E. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils: I. General Theory. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 37(6):855-9, Nov./Dec. 1973.

38. FENN, L.B. & MIYAMOTO, S. Ammonia loss and associated reactions of urea in calcareous soils. Soil Science of America Journal, Madison, 45(3):537-40, May/June 1981.
39. FERGUSON, R.B. & KISSEL, D.E. Effects of soil drying on ammonia volatilization from surface-applied urea. Soil Science Society of America Journal, 50(2):485-90, Mar./Abr. 1986.
40. FERNANDES, M.S. & ROSSIELLO, R.O.P. Uso de NH_4^+ e de um inibidor de nitrificação na adubação nitrogenada do milho (*Zea mays*, L.). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 3(2):77-81, maio/ago. 1979.
41. FILIPOVIC, R. Fertilizer nitrogen residues: useful conservation and pollutant potential under maize. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Soil nitrogen as fertilizer or pollutant. Vienna, 1980. p.47-60.
42. FOX, R.H.; TALLEYRAND, H. & BOULDIN, D.R. Nitrogen fertilization of corn and sorghum in Oxisols e Ultisols in Puerto Rico. Agronomy Journal, Madison, 66(3):534-40, May/June 1974.
43. FRANÇA, G.E.; BAHIA FILHO, A.F.C.; PARENTONI, S.N. & ANDRADE, G.I.X. Dinâmica de nitrogênio em dois tipos de solos. In: EMBRAPA-CNPMS. Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1980-1984. Sete Lagoas, EMBRAPA-CNPMS, 1986. p.50-1.

44. FRANÇA, G.E.; BAHIA FILHO, A.F.C.; VASCONCELOS, C.A. & SANTOS, H.L. dos. Adubação nitrogenada em Minas Gerais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16, Ilhéus, 1984. Anais... Ilhéus, CEPLAC, 1985. p.107-20.
45. FRIED, M. & BROESHART, H. Priming effect of nitrogen fertilizer on soil nitrogen. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 38(5):858, Sept./Oct. 1974.
46. _____; SOPER, R.J. & BROESHART, H. ¹⁵N-labeled single treatment fertility experiment. Agronomy Journal, Madison, 67(2):393-6, Mar./Apr. 1975.
47. GAMBOA, J.; PAREZ, G. & BLASCO, M. Um modelo para describir los procesos de retención y lixiviación en los suelos. Turrialba, Turrialba, 21(3):312-16, jul./set. 1971.
48. GASS, W.B.; PETERSON, G.A.; HAUCK, R.D. & OLSON, R.A. Recovery of residual nitrogen by corn (*Zea mays* L.) from various soil depths as measured by ¹⁵N tracer techniques. Soils Science Society of America Proceedings, Madison, 35(2):290-4, Mar./Apr. 1971.
49. GASSER, J.K.R. Some factors affecting losses of ammonia from urea and ammonium sulphate applied to soils. Journal Soil Science, Oxford, 15(2):258-72, Sept. 1964.

50. GROVE, L.T. Nitrogen fertility in oxisols and ultisols of the humid tropics. New York, Cornell University, 1979. 27p. (Cornel International Agricultural Bulletin, 36).
51. _____; RITCHEY, K.D. & NADERMAN, JR., G.C. Nitrogen fertilization of maize on oxisol of the cerrado of Brazil. Agronomy Journal, Madison, 27(2):261-5, Mar./Apr. 1980.
52. GUEDES, G.A.A. de. Contribuição ao estudo do movimento de íons nitrato e amônio em colunas de material de solos do Triângulo Mineiro e de Pirapora. Viçosa, UFV, 1974. 39p. (Tese MS).
53. HARGROVE, W.L. & KISSEL, D.E. Ammonia volatilization from surface applications of urea in the field and laboratory. Soil Science Society of America Journal, Madison, 43(2):359-63, Mar./Apr. 1979.
54. HATHEWAY, W.H. & WILLIAMS, E.J. Efficient estimations of the relationship between plot size and variability of crops yields. Biometrics, Raleigh, 14:207-22, 1958.
55. HAUCH, R.D. Nitrogen - isotope - ratio analysis. In STEVENSON, F.J., ed. Méthods of soil analysis; chemical and microbiological properties. Madison, America Society of Agronomy, 1982. Pt.2, p.735-79.

56. HAUCH, R.D. Quantitative estimates of nitrogen-cycle process-concepts e review. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nitrogen-15 in soil-plant studies. Vienna, 1971. p.65-80.
57. _____ & BREMNER, J.M. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. Advances in Agronomy, New York, 28: 219-66, 1976.
58. HERRON, G.M.; TERMAN, G.L.; DREIER, A.F. & OLSON, R.A. Residual nitrate nitrogen in fertilized deep loess-derived soils. Agronomy Journal, Madison, 60(5):477-82, Sept./Oct. 1968.
59. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Fertilizer management practices for maize: results of experiments with rádio-isótopos. Viena, 1970. 78p. (Technical Reporter, 121).
60. JENKINSON, D.S. Chemical test for potentially available nitrogen in soil. Journal of the Science of Food and Agriculture, Belgrave, 19:160-8, Mar. 1968.
61. KIEHL, J.C.; ESPIRONELO, A. & OLIVEIRA, H. Comportamento do nitrogênio no solo aplicado a cana-de-açúcar em duas épocas. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, 5(1): 32-7, jan./abr. 1981.
62. KINJO, T.; KIEHL, J.C. & PRATT, P.F. Movimento do nitrato em colunas de terra de um latossolo. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, 2(2):106-9, maio/ago. 1978.

63. KITUR, B.K.; SMITH, M.S.; BLEVINS, R.L. & FRYE, W.W. Fate of ¹⁵N-depleted ammonium nitrate applied to no-tillage and conventional tillage corn. Agronomy Journal, Madison, 76 (2):240-2, Mar./Apr. 1984.
64. LEGG, J.O. & MEISINGER, J.J. Soil nitrogen budget. In: STEVENSON, F.J., ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p.503-57.
65. LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Destino da uréia aplicada a um solo tropical. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, 2(1):40-4, jan./abr. 1978.
66. _____; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. & CERVELLINI, A. "The fate of ureia applied to tropical bean (*Phaseolus vulgaris*, L) crops". In: WORKSHOP ON NITROGEN CYCLING IN ECOSYSTEMS OF LATIN AMERICA AND CARIBBEAN, Cali, 1981. Workshop... Cali, 1981. p.55-63.
67. LONG, F.L. & HUCK, M.G. Nitrate movement under corn and fallow conditions. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44(4):787-92, July/Aug. 1980.
68. MAGDOFF, F.R.; ROSS, D. & AMADON, J. A soil test for nitrogen availability to corn. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48(6):1301-4, Nov./Dec. 1984.

69. MALAVOLTA, E. Matéria orgânica. In: _____. Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo. São Paulo, Ceres, 1976. p.177-256.
70. _____; & GARGANTINI, H. Nutrição mineral e adubação do milho. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE POTASSA. Cultura e adubação do milho. São Paulo, 1966. cap. 13, p.381-428.
71. MATOCHA, J.E. Ammonia volatilization and nitrogen utilization from sulfur-coated urea and conventional nitrogen fertilizers. Soil Science Society of America Journal, Madison, 40(4):597-601, July/Aug. 1976.
72. MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, 4(2):83-8, maio/ago. 1980.
73. MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Nitrogen. In: _____. Principles of plant nutrition. 3.ed. Bern, International Potash Institute, 1982. p.335-59.
74. MILLER, P.L. & MACKENZIE, A.F. Effects of manures, ammonium nitrate & S-coated urea on yield and uptake of N by corn and on subsequent inorganic N levels in soils in southern Quebec. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 58(2): 153-8, May 1978.

75. MORAGHAN, J.T.; REGO, T.J. & BURESH, R.J. Labeled nitrogen fertilizer research with urea in the semi-arid tropics. III. Field studies on alfisol. Plant and Soil, The Hague, 82(2):193-203, 1984.
76. _____; _____; _____; VLEK, P.L.G.; BURFORD, J.R. SINGH, S. & SAHRAWAT, K.L. Labeled nitrogen fertilizer research with urea in the semi-arid tropics. II. Field studies on a vertisol. Plant and Soil, The Hague, 80(1):21-3, 1984.
77. MORTLAND, M.M. Reactions of ammonia in soils. Advances in Agronomy, New York, 10:325-48, 1958.
78. NELSON, W.W. & MACGREGOR, J.M. Twelve years of continuous corn fertilization with ammonium nitrate or urea nitrogen. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 37(4):583-6, July/Aug. 1973.
79. NEPTUNE, A.M.L. Efeito de diferentes épocas e modos de aplicação do nitrogênio na produção do milho, na quantidade de proteína, na eficiência do fertilizante e na diagnose foliar utilizando sulfato de amônio - ¹⁵N. Anais da ESALQ, Piracicaba, 34(1):515-39, 1977.
80. _____; CRUZ, A.P. & MURAOKA, T. Lixiviação de nitrato de colunas de solo tratado com sulfato de amônio (NH₄)₂SO₄ e N-Serve 24E (nitrapirina). Anais da ESALQ, Piracicaba, 37:991-1008, 1980.

81. NEPTUNE, A.M.L. & MURAOKA, T. Aplicação de uréia - ^{15}N em feijoeiro cultivar carioca. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, 2(1):51-5, jan./abr. 1978.
82. _____; SAITO, S.M.T. Efeito do inibidor de nitrificação "AM" em alguns solos do Estado de São Paulo. Anais da ESAIQ, Piracicaba, 33:705-19, 1976.
83. NÖMMIK, H. Assessment of volatilization loss of ammonia from surface-applied urea on forest soil by N^{15} recovery. Plant and Soil, The Hague, 38:589-603, 1973.
84. OLSON, R.A. Fate of tagged nitrogen fertilizer applied to irrigated corn. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44(3):514-7, May/June 1980.
85. _____. Isotopes studies on soil fertilizer nitrogen. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes and radiation in research on soil-plant relationships. Viena, 1979. p.3-32.
86. _____ & SWALLOW, C.W. Fate of labeled nitrogen fertilizer applied to winter wheat for five years. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48(3):583-6, May/June 1984.
87. OSINAME, O.; VAN GIJN, H. & VLEK, P.L.G. Effect of nitrifications inhibitors on the fate and efficiency of nitrogenous fertilizers under simulated humid tropical conditions. Tropical Agriculture, Trinidad, 60(3):211-7, 1983.

88. PARR, J.F. Biochemical considerations for increasing the efficiency of nitrogen fertilizers. Soils and Fertilizers, Farnham Royal, 30:207-13, 1967.
89. PERES, J.R.R. & SUHET, A.R. Adubação nitrogenada no planalto central. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16, Ilhéus, 1984. Anais... Ilhéus, CEPLAC, 1985. p.220-42.
90. RAO, D.L.N. & BATRA, L. Amonia volatilization from applied nitrogen in alkali soils. Plant and Soil, The Hague, 70: 219-28, 1981.
91. REHM, G.W. & WIESE, R.A. Affect of method of nitrogen application on corn (*Zea mays* L.) grown on irrigated sandy soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 39 (6):1217-20, Nov./Dec. 1975.
92. REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. & URQUIAGA, S.C. Fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Agrochemicals: fate in food and the enviroment. Viena, 1982. p.277-90.
93. _____; _____; VITORIA, R.L. & VIEGAS, G.P. Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, 3(1):17-20, jan./abr. 1979.

94. RYDEN, J.C.; LUND, L.J. & FOCHT, D.D. Direct infield measurement of nitrous oxide flux from soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 42(5):731-7, Sept./Oct. 1978.
95. RODRIGUES, M.B. Volatilização, distribuição e nitrificação da amônia proveniente de uréia aplicada em amostras de solo. Piracicaba, ESALQ, 1983. 84p. (Tese MS).
96. SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica de nutrientes em cama-de-açúcar. II. Deslocamento vertical e horizontal de NO_3^- -N e NH_4^+ -N no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 19(9):1103-8, set. 1984.
97. SANCHEZ, P.A., ed. Nitrogen fertilization. In: _____. A review of soils research in tropical Latin America. Releigh, 1973. p.90-125. (Tech.Bull., 119).
98. STUMPE, J.M.; CRISTIANSO, C.B. & BURESH, R.J. An aluminum block digestion procedure for determination of total N in soils containing ^{15}N . Communications in Science Plant Analysis, New York, 16:1-14. 1985.
99. _____; VLEK, P.L.G. & LINDSAY, W.L. Ammonia volatilization from urea and urea phosphates in calcareous soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48(4): 921-7, July/Aug. 1984.

100. SUHET, A.R.; PERES, J.R.R. & VARGAS, M.A.T. Nitrogênio In: GOEDERT, W.J., ed. Solos dos cerrados; tecnologias e estratégias de manejo. Brasília, EMBRAPA-CPAC, 1986. p.167-202.
101. TERMAN, G.L. Volatilization losses of nitrogen as ammonia from surface-applied fertilizers, organic amendments crop residues. Advances in Agronomy, New York, 31:189-223, 1979.
102. _____ & HUNT, C.M. Volatilization losses of nitrogen from surface-applied fertilizers, as measured by crop response. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 28 (5):667-72, Sept./Oct. 1964.
103. TOMAR, J.S.; KIRBY, P.C. & MACKENZIE, A.F. Field evaluation of the effects of a urease inhibitor and crop residues on urea hydrolysis, ammonia volatilization and yield of corn. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 65(4): 777-87, Nov. 1985.
104. _____ & SOPER, R.J. Fate of tagged urea N in the field with different methods of N and organic matter placement. Agronomy Journal, Washington, 73(6):991-5, Madison, Nov./Dec. 1981.
105. ULLOA, A.M.C.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Utilização do nitrogênio por dois híbridos de milho. Campinas, Fundação Cargill, 1982. 66p.

106. URQUIAGA, S.C. Dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta na cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L), cultivar carioca. Piracicaba, ESALQ, 1982. 118p. (Tese Doutorado).
107. VITTI, G.C.; MALAVOLTA, E. & COUTINHO, E.L.M. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados e portadores de enxofre. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA. Brasília, Agosto 1984. Anais... EMBRAPA, Brasília, 1984. p.205-53.
108. VOLK, G.M. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils. Agronomy Journal, Madison, 51(11):746-9, Nov. 1959.
109. WATKINS, S.H.; STAND, R.F.; DEBELL, D.S. & ESCH JR., J. Factors influencing ammonia losses from urea applied to northwestern forest soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 36(2):354-7, Mar./Apr. 1972.
110. WESTERMAN, R.L. & KURTZ, L.T. Priming effect of ¹⁵N-labelled fertilizers on soil nitrogen in field experiments. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 37(5): 725-7, Sept./Oct. 1973.
111. _____; _____ & HAUCK, R.D. Recovery of ¹⁵N-labeled fertilizers in field experiments. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 36(1):82-6, Jan./Feb. 1972.

112. WILD, A. Nitrate leaching under bare fallow at a site in Northern Nigéria. Journal of Soil Science, Oxford, 23: 315-24, Sept. 1972.

APÉNDICE

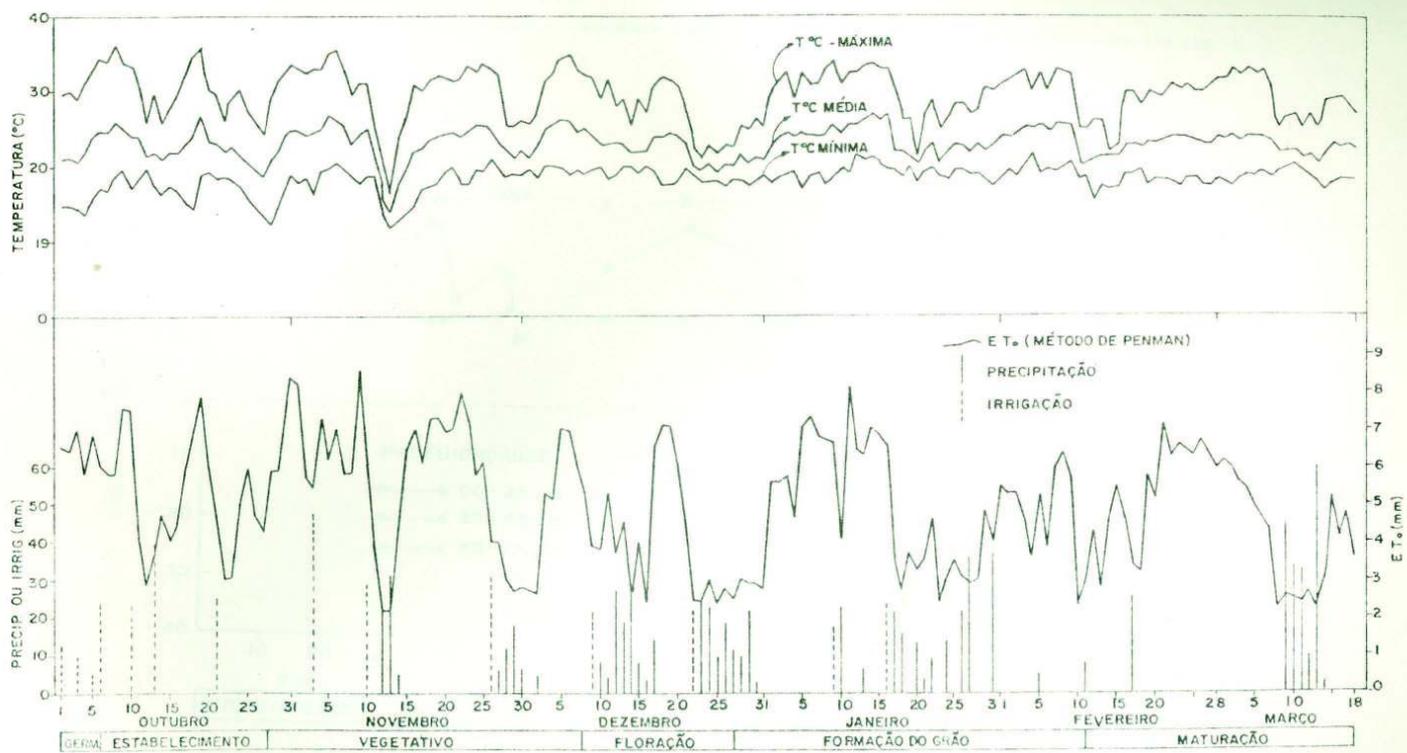


FIGURA 1A - Variação da temperatura, precipitação, irrigação e da evapotranspiração de referência, estimada pelo método de Penman (ET₀), durante o desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays*, L). Sete Lagoas- MG. 1986/87.

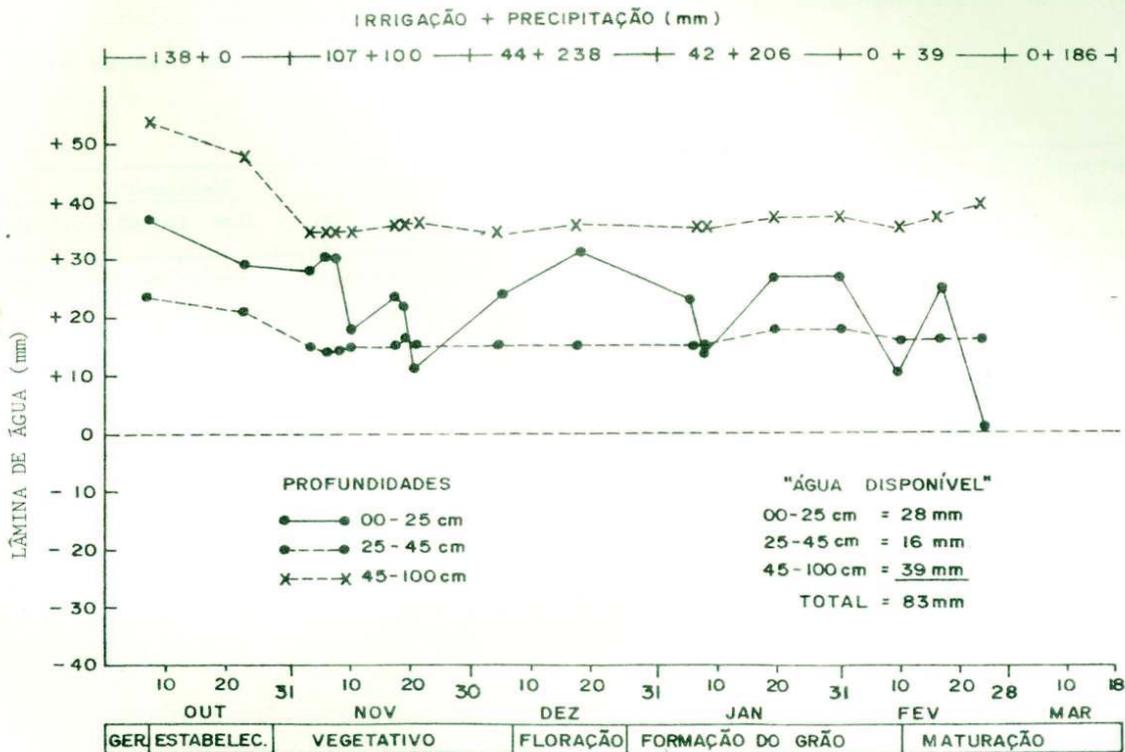


FIGURA 2A- Lâmina de água (> 1,5 MPa), em diferentes profundidades do solo, nas parcelas tratadas com 60 kg N-Urêia/ha (incorporada), durante o desenvolvimento da cultura do milho, 1986/87.

QUADRO 1A - Características físicas do perfil de um Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

Horizonte	Profundidade cm	Densidade		Granulometria					Classe Textural	Cond. Elétrica mmhos/cm	Retenção d'água (Bar)			Equiv. Unid. %
		Global	Real	ag	af	s	r	m			0,1	0,3	15,0	
		g/cm ³		%										
Aep	0- 13	0,91	2,63	5	3	31	61	4	muito argilosa	0,02	37,3	32,6	24,7	32
AB	13- 28	1,01	2,40	5	3	32	60	3	"	0,34	36,4	32,3	25,2	32
Ba1	28- 45	1,01	2,48	5	3	26	66	1	"	0,31	33,6	31,3	25,6	31
Bw1	45- 85	0,94	2,42	5	3	16	76	4	"	0,06	33,7	30,5	26,1	31
Bw2	85-145	0,92	2,43	5	3	19	73	0	"	0,03	33,8	30,7	26,0	30
Bw3	145-200	0,87	2,46	4	3	19	74	0	"	0,10	33,1	30,2	26,0	32

ag = areia grossa, af = areia fina, s = silte, r = argila, m = argila dispersa em água

QUADRO 2A - Características químicas de um perfil de um Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado. Sete Lagoas, MG. 1987.

Horizonte	Profundidade cm	pH		Complexo Sorção							Sat. Bases		Sat. Al. m	Ataque pelo H_2SO_4					P		C	N	Rel. C/N
		Água	KCl/N	H^+	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	S	T	V			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Bray ₁			
		eq.mg/100 g							%		%					ppm		%					
Acp	0-13	4,8	4,4	11,98	0,73	1,70	0,23	0,38	2,31	15,02	15	24	24,87	30,77	10,59	0,70	0,23	13,6	8,1	2,56	0,24	11	
AB	13-28	4,5	4,4	11,82	0,81	1,84	0,28	0,10	2,22	14,85	15	27	24,07	29,90	11,26	0,66	0,22	11,6	5,5	2,18	0,16	14	
BAl	28-45	4,1	4,3	9,62	1,06	0,51	0,12	0,06	0,69	11,37	6	61	25,08	31,70	11,71	0,72	0,18	4,6	3,0	1,57	0,13	12	
BW1	45-85	4,4	4,3	10,21	0,89	0,26	0,05	0,03	0,34	11,41	3	72	25,92	32,25	11,06	0,71	0,17	2,3	2,7	1,33	0,09	15	
BW2	85-145	4,2	4,4	6,39	0,61	0,15	0,02	0,03	0,20	7,20	3	75	25,76	32,44	11,59	0,87	0,15	1,9	2,4	0,88	0,06	15	
BW3	145-200	4,2	4,5	9,49	0,50	0,18	0,02	0,02	0,22	10,21	2	69	25,13	32,54	12,08	0,77	0,15	1,9	2,4	0,75	0,06	13	

QUADRO 3A - Exemplo de cálculo do balanço de água no solo para estimar a necessidade de irrigação.

Local: Sete Lagoas-MG Tipo de Solo: LEd Água Disponível Total: 11,47%V 0-10 cm
11,81%V 10-25 cm
8,03%V 25-45 cm
7,15%V 45-70 cm
7,10%V 70-100 cm
A.C.C. (100 cm): 330mm A.P.M. (100cm): 246mm
Meses: Out.-Fev. Cultura: Milho Seção de Controle: 100cm
Irigar Quando o Balanço for : 306mm - fase inicial e períodos críticos
288mm - outros períodos

Data	DAP (dias)	ET _O (mm/dia)	KC	ET _r cultura (mm/dia)	Precipit. (mm)	Irig. (mm)	Balanço (mm)	Observações
30/09	0	-	-	-	-	-	316,00	água armazenada
01/10	0	6,53	0,46	3,00	0,00	13,00	326,00	
02/10	1	6,44	"	2,96	0,00	0,00	323,00	
03/10	2	7,04	"	3,23	0,00	8,94	329,00	
04/10	3	5,86	"	2,70	0,00	0,00	326,00	
05/10	4	6,86	"	3,16	0,00	4,46	327,00	
06/10	5	6,21	"	2,66	0,00	23,00	347,00	
07/11	37	5,87	1,05	6,17	0,00	0,00	330,00	adubação nitro
08/11	38	5,81	"	6,10	0,00	0,00	324,00	genada em cober
09/11	39	8,58	"	9,00	0,00	0,00	315,00	tura
10/11	40	6,22	"	6,53	0,00	28,00	336,00	
11/11	41	3,87	"	4,45	0,00	0,00	332,00	
05/12	65	6,98	1,15	8,00	0,00	0,00	328,00	florescimento
06/12	66	6,88	"	7,91	0,00	0,00	320,00	
07/12	67	6,00	"	6,90	0,00	0,00	313,00	
08/12	68	5,31	"	6,10	1,40	0,00	308,00	
09/12	69	3,94	"	4,53	0,00	22,00	326,00	
10/01	101	4,16	0,73	3,04	22,70	0,00	330,00	
11/01	102	8,15	0,53	4,32	0,00	0,00	325,00	
12/01	103	6,46	"	3,42	0,30	0,00	322,00	
13/01	104	6,26	"	3,32	6,40	0,00	319,00	
14/01	105	7,04	"	3,73	0,00	0,00	315,00	
							310,00	
08/02	130	6,37	0,35	2,23	0,00	0,00	308,00	
09/02	131	5,72	"	2,00	0,00	0,00	306,00	

ACC (100 cm) = Lâmina de água armazenada no volume de controle, na capacidade de campo (0,01 MPa)

APM (100 cm) = Lâmina de água armazenada no volume de controle, no ponto de murcha (1,5 MPa)

QUADRO 4A - Valores de densidade aparente, em g.cm^{-3} , avaliados nas camadas de solo amostradas para determinação da concentração de ^{15}N .

Prof. Solo (cm)	Repetições								Média
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
0- 15	1,077	0,912	0,926	1,006	1,026	1,000	0,955	0,925	0,978 ± 0,0206
15- 30	0,972	0,970	0,972	1,053	0,967	1,038	0,986	0,971	0,991 ± 0,0121
30- 45	0,877	0,903	0,895	0,943	0,924	0,970	0,922	0,942	0,922 ± 0,0106
45- 60	0,893	0,971	0,858	0,893	0,894	0,950	0,880	0,903	0,905 ± 0,0131
60- 90	1,031	0,993	0,943	0,994	0,976	0,961	0,986	1,062	0,993 ± 0,0134
90-120	1,067	1,058	1,027	0,999	1,041	1,058	1,036	1,157	1,055 ± 0,0164
120-150	1,080	1,077	1,032	1,084	1,015	1,096	1,078	1,122	1,073 ± 0,0121