



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**MOVIMENTO DE ÍONS EM SOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO
LAVOURA-PECUÁRIA NA REGIÃO DE CERRADOS**

MARIA INÊS LOPES DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

**BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**MOVIMENTO DE ÍONS EM SOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-
PECUÁRIA NA REGIÃO DE CERRADOS**

MARIA INÊS LOPES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: WENCESLAU J. GOEDERT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

PUBLICAÇÃO: 249/2007

**BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**MOVIMENTO DE ÍONS EM SOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-
PECUÁRIA NA REGIÃO DE CERRADOS**

MARIA INÊS LOPES DE OLIVEIRA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À FACULDADE DE AGRONOMIA E
MEDICINA VETERINÁRIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DE DISCIPLINAS GESTÃO DE SOLO E
ÁGUA.**

APROVADA POR:

**WENCESLAU J. GOEDERT, Professor Associado (Orientador)
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. E-mail: goedert@unb.br**

**SEBASTIÃO ALBERTO DE OLIVEIRA, Professor Associado (Examinador interno)
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. E-mail: oliveira@unb.br**

**THIERRY BECQUER, Pesquisador (Examinador externo)
Institut de Recherche pour le Développement (IRD), França. CPF 730.027.121-91, E-mail:
becquer@cpac.embrapa.br**

BRASÍLIA/DF, 28 de fevereiro de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Maria Inês Lopes

Movimento de íons em solo sob sistema de integração lavoura-pecuária na região de cerrados. / Maria Inês Lopes de Oliveira; orientação de Wenceslau J. Goedert – Brasília, 2007.

69 p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2007.

1. Íons na solução do solo. 2. Sistemas de manejo. 3. Integração Lavoura-pecuária. I GOEDERT, W. J. II. PhD

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, M. I. L. de. **Movimento de íons em solo sob sistema de integração lavoura-pecuária na região de cerrados**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2006, Nº p 70. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Maria Inês Lopes de Oliveira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Movimento de íons em solo sob sistema integração lavoura-pecuária na região de cerrados.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Maria Inês Lopes de Oliveira

CPF: 03991601693

CEP: 38690-000, R: monte alegre 25, Vale da Amanhecer, Formoso-MG - Brasil

E-mail: minesoliveira@yahoo.com.br

AGRACECIMENTOS

A todos os colegas e amigos da Embrapa Cerrados, pelo apoio no dia-a-dia, na condução do experimento e pela amizade.

Aos colegas de curso e da graduação, pelo companheirismo e as alegrias e tristezas vividas juntos.

Aos colegas, Jean, Hugo, Jacson e Juliana pelo apoio braçal nas instalações do experimento e coletas de dados no campo e análises laboratorial.

Aos queridos mestres pelos ensinamentos.

Aos professores OLIVEIRA e SEBASTIÃO pela paciência e dedicação.

Ao professor Wenceslau, pela dedicação e por aceitar o convite para orientador, pelo trabalho maravilhoso prestado e por tudo que me ensinou.

Aos colegas do IRD Thierry BECQUER, pela ajuda todos os dias, a paciência e os ensinamentos e Michel BROSSARD que de alguma forma contribuiu para que este trabalho fosse realizado.

Aos meus pais que mesmo longe nunca deixaram de me apoiar.

ÍNDICE

Capítulos/Sub-capítulos	Página
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Região dos Cerrados	4
2.2. Evolução da Pecuária nos Cerrados	4
2.3. Processos de Degradação de Pastagens	5
2.4. Sistemas de Cultivo	7
2.4.1. Sistema de Preparo Convencional (SPC)	7
2.4.2. Sistema de Plantio Direto (SPD)	8
2.4.3. Integração lavoura-pecuária (ILP)	9
2.5. Processos de perda de nutrientes	10
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

CAPÍTULO I

Concentração de íons na solução de um latossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária

RESUMO	19
ABSTRACT	20
INTRODUÇÃO	21
MATERIAL E MÉTODOS	22
Caracterização da área experimental	22
Caracterização climática	22
Solos	23
Descrição do experimento e das parcelas experimentais	23
Procedimentos de amostragem e análise	25

RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
Concentração do íon nitrato na solução do solo	26
Concentração do íon potássio, magnésio e cálcio na solução do solo	29
Concentração dos Íons Cloro, Sulfato e Fosfato na Solução do Solo	34
CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

CAPÍTULO II

Simulação do fluxo vertical de íons em latossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária

RESUMO	41
ABSTRACT	42
INTRODUÇÃO	43
MATERIAL E MÉTODOS	44
Caracterização da área experimental	44
Caracterização climática	45
Solos	45
Descrição do experimento e das parcelas experimentais	45
Descrição das variáveis de entrada e saída do modelo SARRA	47
Aquisição dos dados necessários para o modelo	50
Dados climáticos	50
Caracterização hidrodinâmica	50
Cultura	52
Profundidade radicular efetiva (Z, mm)	52
Duração do ciclo fenológico	52
Estimativa do fluxo vertical de íons (drenagem x concentração)	53

RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
Estimação da drenagem	53
Sensibilidade do modelo quanto aos parâmetros de entrada	56
Potencial de perdas por lixiviação	58
CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
Anexos	67

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Representação esquemática das seqüências planejadas para o experimento, incluindo o sistema integração lavoura/pastagem.	23
Tabela 2. Caracterização dos sistemas de cultivo avaliados.	24
Tabela 3. Concentrações de íons cloreto, sulfato e fosfato em solução de solo, de amostras coletadas na profundidade 20 e 150 cm, em seis datas, no ano 2004/2005, em solos sob sete sistemas de cultivo (nd – não determinado por falta de solução do solo).	35
Tabela 4. Concentrações de íons cloreto, sulfato e fosfato em solução de solo, de amostras coletadas na profundidade 20 e 150 cm, em seis datas, no ano 2005/2006, em solos sob sete sistemas de cultivo (nd – não determinado por falta de solução do solo).	36
Tabela 5. Representação esquemática das seqüências planejadas para o experimento, incluindo o sistema integração lavoura/pastagem.	46
Tabela 6. Caracterização dos sistemas de cultivo selecionados e avaliados.	47
Tabela 7. Valores de chuva limite (L,mm) e escoamento superficial (R, %) para os sistemas de plantio convencional (SPC) e plantio direto (SPD).	50
Tabela 8. Valores da capacidade de armazenamento de água dos solos das parcelas experimentais.	52
Tabela 9. Coeficientes culturais de pastagem (<i>Brachiaria</i>), soja e sorgo.	52
Tabela 10. Duração do ciclo fenológico para as culturas.	53
Tabela 12. Drenagem total nos períodos do estudo no ano agrícola 2004/2005 e 2005/2006, nos sistemas de cultivo lavoura contínua (L-SPC-AC), (L-SPC-AM), (L-SPDC-AC), (L-SPD-AM), pastagem contínua (P) e integração lavoura/pecuária (PL-ILP-AC), (LP-ILP-AC).	55

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação esquemática do processo de degradação de pastagens em suas diferentes etapas no tempo. Fonte: Macedo (2001).	6
Figura 2. Concentrações do anion nitrato em solução de solo, de amostras coletadas nas profundidades de 20 e 150 cm, em seis datas, no ano 2004/20005 e 2005/2006, em solos sob sete sistemas de cultivo.	28
Figura 3. Concentrações dos cátions potássio, magnésio e cálcio em solução de solo de amostras coletadas nas profundidades 20 e 150 cm, em seis datas, no ano 2004/2005, em solos sob sete sistemas de cultivo.	30
Figura 4. Concentrações dos cátions potássio, magnésio e cálcio, em solução de solo, de amostras coletadas nas profundidades 20 e 150 cm, no ano 2005/20006, em solo sob sete sistemas de cultivo.	32
Figura 5. Processos de entrada e saída de água em um volume do solo (sistema solo-planta-atmosfera) durante um intervalo de tempo (Δt) para modelagem dos dados no (SARRA). Onde, precipitação (Pr), evapotranspiração (Etp), escoamento superficial (R), reserva útil de água (Ru), comprimento de raiz (Z), (Kc) e drenagem (Dr).	49
Figura 6. Drenagem cumulativa nos sistemas de cultivo lavoura contínua (L-SPD-AC), pastagem contínua (P) e integração lavoura-pecuária (PL-ILP-AC), no período de 2004/2005.	55
Figura 7. Análise de sensibilidade do modelo quanto ao parâmetro Kc relacionado às culturas de <i>Brachiaria brizantha</i> e soja em 2004/2005 e sorgo em 2005/2006.	57
Figura 8. Lixiviação acumulativa de nitrato nos sistemas de cultivo lavoura contínua (L-SPC-AC), integração lavoura-pecuária (LP-ILP-AC) e (PL-ILP-AC) e pastagem contínua (P) no período de 2004/2005.	58
Figura 9. Estimativa da drenagem e da quantidade dos íons nitrato, potássio, magnésio e cálcio lixiviados no solo sob sete sistemas de cultivo: lavoura contínua (L-SPC-AC e AM) e (L-SPD-AC e AM), integração lavoura/pecuária (LP-ILP-AC) e (PL-ILP-AC) e pastagem contínua (P), no período de 2004/2005 e 2005/2006.	60

MOVIMENTO DE ÍONS EM SOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NA REGIÃO DE CERRADOS

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as concentrações e o fluxo vertical de íons na solução de solo, em parcelas experimentais submetidas aos seguintes sistemas de cultivo: lavoura contínua, pastagem contínua e integração lavoura-pecuária. O experimento foi iniciado em 1991, mas a coleta de amostras da solução do solo foi realizada em 2005 e 2006. Para tanto, cápsulas porosas foram instaladas, nas profundidades de 20 e 150 cm e as soluções foram extraídas em seis datas, para cada ano. Foram determinadas, em laboratório, as concentrações dos seguintes íons nas soluções coletadas: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Mg^{2+} , e Ca^{2+} . Para estimar o fluxo dos íons no perfil do solo foi adotado o Sistema de Análise Regional de Risco Agroclimático (SAARA-Br). Em termos gerais, a movimentação de ânions no solo, considerando as duas profundidades, apresentou concentrações na seguinte ordem de grandeza: $\text{NO}_3^- \gg \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$. Já a movimentação de cátions, apresentou concentrações na seguinte ordem: $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$. Em termos comparativos entre os sistemas de cultivo, a concentração dos íons na solução do solo, nas duas profundidades, mostrou a seguinte seqüência: lavoura contínua > integração lavoura-pecuária > pastagem contínua. As concentrações dos íons na solução de solo, na profundidade de 150 cm, sob pastagem contínua e integração lavoura-pecuária foram sempre baixas. Em termos de potencial de perdas por lixiviação, a maior preocupação se refere ao íon nitrato, em sistemas de lavoura contínua sob preparo convencional.

Palavras-chave: solução do solo, lixiviação, sistemas de cultivo, pastagem, cerrado.

SOIL SOLUTION ION MOVEMENT IN PLOTS UNDER CROP-PASTURE ROTATIONS

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the soil solution ion concentrations and vertical flux in experimental plots under the following systems: continuous crop, continuous pasture and crop-pasture rotations. The experiment was started in 1991, but the soil solution was collected during the years of 2005 and 2006. Porous capsules were installed in two soil depths, 20 and 150 cm, and samples of solution were extracted in six dates for each year. The concentration of the following ions was measured: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} . In order to estimate the vertical flux of ions in the soil profile it was adopted the SAARA Model (System of Regional Analysis of Agroclimatic Risks) In general terms, the pattern of anions movement was: $\text{NO}_3^- \gg \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$, and of cations was: $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$. When cropping systems were compared, the general pattern of ion movement was: continuous cropping > crop-pasture rotations > continuous pasture. Considering leaching potential, the main concern is with nitrate ion in soil under continuous cropping.

Key words: soil solution, leaching, crop rotation, pasture, cerrado.

1. INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, a Região dos Cerrados abrange uma área de aproximadamente 200 milhões de hectares, o que corresponde a 24% do território nacional (Adámoli et al., 1986). Nos últimos 30 anos, ocorreu um grande desenvolvimento da ocupação agrícola e atualmente aproximadamente 60 milhões de hectares, de solos que antes eram considerados improdutivos, são cultivados.

O que vem sendo observado é a degradação de grande parte dos solos brasileiros e isso se deve à falta de práticas de manejo sustentável. Segundo Salati & Lemos (1999), a possibilidade de manutenção da sustentabilidade dos ecossistemas produtivos dentro de uma escala de tempo de décadas, principalmente os relacionados com a produção agrícola, dependerá não somente dos avanços tecnológicos mas também de mudanças de estruturas sociais

A degradação de pastagens por exemplo é um processo evolutivo de perda de vigor e produtividade forrageira, sem possibilidade de recuperação natural, que afeta a produção e o desempenho animal e culmina com a degradação do solo e dos recursos naturais em função de manejos inadequados (Macedo et al., 2000)

A continuidade do uso intensivo, juntamente com o manejo inadequado dos solos, além da compactação, erosão eólica e hídrica, poderá causar um decréscimo da matéria orgânica diminuindo assim a disponibilidade dos nutrientes. A pesquisa em relação direta com os produtores desenvolveu sistemas de cultivo mais duráveis para a região baseados no plantio direto com plantas de cobertura, seja leguminosas ou vegetação espontânea.

O sistema plantio direto (SPD), se comparado ao plantio convencional, diminui a velocidade de degradação da matéria orgânica do solo (MOS), devido ao menor revolvimento do solo e à manutenção de resíduos vegetais na superfície. Hernani et al. (1999) observaram, no sistema plantio direto, o aumento do estoque de carbono orgânico, nas camadas superficiais do solo, e, conseqüentemente, aumento nos teores das frações orgânicas, o que sugere uma maior estabilidade do sistema plantio direto.

A MOS interage com a fase mineral, interferindo, assim, na dinâmica de nutrientes no sistema solo-planta, exercendo um papel importante na manutenção da fertilidade do solo e na melhoria das propriedades físicas e biológicas (Mendonza et al., 2000; Silva et al., 2000).

No sistema SPD, uma planta de cobertura é intercalada antes ou depois do ciclo da cultura principal. A cobertura, pelo acúmulo de matéria orgânica, permite proteger a superfície do solo, minimizando assim os efeitos da erosão. No entanto, nestas condições, a degradação da estrutura do solo é ainda importante. A integração lavoura-pecuária em sistemas de rotação de culturas tem como objetivo minimizar esses problemas.

No sistema de integração lavoura-pecuária, as duas atividades tendem a se beneficiarem. Estudos mostram que é possível com a exploração sustentável da biodiversidade, conseguir um aumento da produção agropecuária dos cerrados (Ayarza et al., 1999). A integração lavoura-pecuária além de permitir a recuperação das áreas de pastagens degradadas, promove uma melhoria significativa destes solos, além de um incremento na produtividade (Spain et al., 1996). Este sistema melhora as condições biológicas do solo e ainda dá um incremento na receita bruta em até cinco vezes (Roos, 1999).

Com as modificações do solo induzidas por este sistema pode ocorrer um aumento da atividade microbiana, principalmente aquela associada à mineralização da matéria orgânica, o que irá favorecer o aumento dos teores dos elementos solúveis, principalmente o nitrogênio, na solução do solo. O aumento da biodiversidade da macrofauna do solo e a melhoria das estruturas favorecerão a dinâmica da água no solo.

Mas, por outro lado, o melhor crescimento das raízes relacionado com a melhor estrutura do solo, assim como a presença de uma planta de cobertura fora do ciclo da cultura principal (planta de cobertura ou pastagem), tem também um papel muito importante na utilização dos recursos hídricos, na reciclagem e mobilização de nutrientes minerais lixiviados ou pouco solúveis em camadas mais profundas do solo, além de diminuir as perdas por lixiviação. Por conseguinte, um crescimento da disponibilidade dos nutrientes sem aumento das perdas pela lixiviação é esperado nestes sistemas. A reciclagem de nutrientes é uma característica importante, pois a quantidade de resíduos culturais sobre a superfície do solo pode afetar a produção das culturas seguintes (Jessop & Stewart, 1983).

O solo não é um sistema isolado, este faz parte de um conjunto de maior abrangência, tal como o sistema solo-planta-atmosfera. O entendimento do funcionamento destes sistemas dinâmicos pode ser facilitado pela organização de modelos (Hanks & Ritchie, 1991). Classicamente, modelo pode ser conceituado como um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procuram explicar ou prever, dentro de

uma teoria científica, as propriedades e o funcionamento do referido sistema. Este conceito se enquadra perfeitamente para o sistema solo-planta-atmosfera, no qual se aplica a maioria das tecnologias geradas em fertilidade do solo e nutrição de plantas.

A tendência da pesquisa tem sido o enfoque reducionista, isolando e analisando as partes do sistema. Neste sentido, grandes avanços podem ser destacados, tais como: mineralização de restos vegetais, ciclo de nutrientes, movimentação de íons, curvas de resposta, interações entre nutrientes no solo e na planta. Porém, ter organização de modelos que descrevam adequadamente o sistema solo-planta-atmosfera, visando prever a produtividade vegetal com o menor número possível de variáveis de entrada, e que possam ser facilmente medidas, viabilizando a utilização desses modelos para a tomada de decisão, este ainda é um grande desafio. Tais modelos seriam de grande utilidade para monitorar a qualidade do solo e orientar o manejo sustentável do solo.

A modelagem do ciclo dos nutrientes nos solos pode permitir entender melhor a movimentação dos íons no solo. São vários os modelos utilizados (Addiscott & Wagenet, 1985), porém poucos são simples de usar e necessitam de um pequeno conjunto de dados ou variáveis de entrada. Em várias regiões brasileiras, são restritas as informações disponíveis, inviabilizando o emprego de modelos de simulação mais precisos, porém mais complexos como o STICS (Brisson et al., 1998 e 2003).

Neste trabalho será utilizado o modelo SARRA (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques), desenvolvido pelo CIRAD-CA (Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour Développement), em Montpellier, França (CIRAD, 1995). É um modelo funcional de avaliação dos fluxos de água que já foi validado em trabalhos no Brasil (Farias et al., 2001; Silva & Assad, 2001).

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o movimento de água e de íons em solução, no perfil do solo (duas profundidades), em função de sistemas de cultivo, envolvendo: lavoura contínua, pastagem contínua e integração lavoura-pecuária. Complementarmente, o movimento de água e íons foi avaliado em solo sob lavoura contínua, com preparo convencional e plantio direto.

A hipótese geral é de que no sistema de integração lavoura-pecuária, há uma maior disponibilidade dos nutrientes na zona radicular das plantas e uma diminuição das perdas por lixiviação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Região dos Cerrados

O cerrado brasileiro localiza-se basicamente no planalto central. O cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, superado em área apenas pela Amazônia, ocupa 24% do território nacional, sendo considerado como a última fronteira agrícola do planeta, (Adámoli et al., 1986). O cerrado é formado por 50 % de latossolos que, embora de baixa fertilidade, estes solos são de potencial para utilização, seja com cultura anuais, pastagens, reflorestamento ou perenes (Ramalho Filho & Beek, 1994). São solos profundos, permeáveis e de fácil mecanização.

Segundo Goedert (1980) os solos de cerrado são, de modo geral, de textura argilosa, bem estruturados e com alta estabilidade de agregados. São solos altamente intemperizados, com baixa capacidade de troca de cátions e altamente dependente da matéria orgânica .

Em condições naturais, estes solos apresentam alta acidez, baixo pH e presença de elementos químicos como o alumínio, cuja toxidez prejudica o desenvolvimento das raízes das plantas, sendo a baixa fertilidade um fator limitante à agricultura. Porém aplicações adequadas de corretivos e fertilizantes aliadas à época propícia para plantio, usando cultivares que sejam adaptadas as condições locais, obtêm-se boas produções. Esses solos apresentam, também, baixo conteúdo dos nutrientes necessários para a nutrição das plantas (Lopes & Cox, 1977; Sanchez & Logan, 1992, Sousa & Lobato, 2004).

É possível amenizar as limitações devidas à baixa CTC e a baixa capacidade de água disponível nos solos, com o aumento da matéria orgânica nos solos, que pode ser através de rotações de culturas, principalmente com a inclusão das braquiárias nos sistemas de produção e/ou rotação de cultivos.

Segundo Bortolini et al. (2000) os resíduos de gramíneas, em virtude de sua baixa taxa de decomposição, determinam melhor proteção do solo. Oliveira (2001) também observou maior produção de matéria seca e persistência da palhada de braquiária, obtida em consórcio com milho, seguidos do sorgo, braquiária solteira, plantas daninhas, arroz e soja, avaliadas por ocasião da floração do feijoeiro.

2.2 . Evolução da Pecuária nos Cerrados

O cerrado, já tem há muito tempo a pecuária como sua atividade principal. A partir da década de 1960, a região Centro-Oeste foi a que apresentou maior crescimento no setor da pecuária, quando teve o período de maior investimento na agropecuária, que pode ser explicado pela ocupação das vastas áreas de campos e cerrado, além de sua localização no centro do país, o que facilita a ligação com as outras regiões, principalmente com a região Sudeste onde se encontram os maiores mercados nacionais. Nesse contexto, a região Centro-Oeste, a partir da década de 1960, apresentou um crescimento na produção acima da média nacional.

No entanto, a pecuária brasileira permaneceu com caráter extensivo, com os animais se alimentando diretamente das pastagens e o aumento do efetivo se dando pelo fato de aumentarem as áreas de criação. Porém, o avanço se deu unicamente com a expansão das áreas de pastagens e a criação manteve-se irregularmente distribuída pela região, além de fortemente concentrada nas grandes propriedades.

Apesar de sempre ter predominado o sistema extensivo na criação de bovinos no Centro-Oeste, nos últimos anos notam-se melhorias no sistema criatório. Mas o que realmente contribuiu para a expansão dessa atividade foi a introdução das pastagens plantadas, com destaque para as espécies do gênero *Brachiária*, que nos primeiros anos da década de 70 foram introduzidas com boa adaptação à região dos cerrados, o que resultou num desenvolvimento quantitativo e qualitativo na pecuária para os padrões de conhecimento tecnológico da época (Kluthcouski et al., 2003).

Atualmente, os estados com maior representatividade de solos dos cerrados detêm um grande percentual de bovinos. Já no ano de 2000, o Centro-Oeste abrigava 33% do rebanho nacional (Kluthcouski et al., 2003).

Segundo Barcellos (1996) com o crescimento da produção houve um reflexo direto sobre a cadeia produtiva da pecuária condicionando e mobilizando um grande parque agroindustrial. A pecuária de corte nos cerrados, no período de expansão, sofre na atualidade, as conseqüências do modelo adotado. A exploração extrativista deflagrou processos de exaustão e degradação dos solos que além de diminuir a capacidade produtiva das pastagens impossibilita o solo de receber outras culturas, devido o seu esgotamento produtivo.

2.3. Processos de Degradação de Pastagens

Entende-se por degradação de pastagem o processo evolutivo da perda de vigor, de produtividade, de capacidade de recuperação natural das pastagens para sustentar os níveis de produção e qualidade exigida pelos animais, assim como, o de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, culminando com a degradação avançada dos recursos naturais, em razão dos manejos inadequados (Macedo, 2001). O processo de degradação de pastagens tem início com a queda do vigor e da produtividade da pastagem (Figura 1), à medida que se descem os degraus com a utilização da pastagem, avançam-se os processos de degradação.



Figura 1. Representação esquemática do processo de degradação de pastagens em suas diferentes etapas no tempo. Fonte: Macedo (2001).

Segundo Barcellos et al. (2000) estima-se que mais de 24 milhões de hectares de pastagens cultivadas estejam em algum estágio de degradação. Uma das alternativas para reverter ou amenizar os processos de degradação tem sido a implantação de sistemas de cultivos conservacionistas como, sistema de plantio direto (SPD) ou a integração lavoura pecuária (ILP). De acordo com Reeves (1995), as práticas de manejo do solo influenciam as condições físicas, principalmente pelo efeito da matéria orgânica, cujo aumento, influencia as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

No SPD, a relativa manutenção das propriedades físicas do solo é feita tanto pela atividade biológica como pelos canais deixados pelas raízes. Santos (1997), conclui que, o uso de pastagem em um sistema de rotação de cultura é altamente benéfico ao solo, pois aumenta a sua microporosidade, o que irá favorecer o reservatório de água e sua disponibilidade.

2.4. Sistemas de Cultivo

A escolha e utilização dos equipamentos agrícolas, nos diferentes sistemas de manejo do solo, são dependentes do tratamento que se quer dar ao solo para exploração agrícola. Para que um equipamento seja utilizado de maneira racional e eficiente, é necessário conhecer o sistema de manejo de solo a que vai atender.

2.4.1. Sistema de Preparo Convencional (SPC)

É difícil definir bem os tipos de cultivo principalmente o sistema de preparo convencional, contudo todos os sistemas que envolvem revolvimento do solo são considerados SPC. O SPC pode ser considerado uma combinação de uma aração (grade aradora ou arado de disco) e grade intermediária e/ou niveladora, feitas com a finalidade de criar condições favoráveis para o estabelecimento da cultura, embora haja ainda outros tipos de combinações, por isso é difícil generalizar este termo, sendo que ao referir ao convencional pode estar referindo a sistemas que podem ser completamente diferentes em relação às suas conseqüência sobre a qualidade de solo.

Os solos dos cerrados que antes eram limitantes por sua baixa fertilidade, com sistema de preparo convencional, onde há uma passagem excessiva de máquinas e manutenção do solo descoberto, vem conduzindo a vulnerabilidade dos sistemas de cultivo nos cerrados. Em condições tropicais ou subtropicais, o preparo do solo no SPC onde há o revolvimento do solo, tem como conseqüência, uma perda do horizonte superficial rico em matéria orgânica por erosão eólica e hídrica, assim como a mineralização rápida da matéria orgânica. Segundo Derpsch et al. (1986), o decréscimo desta matéria orgânica no solo, vem diminuir o rendimento das culturas ao longo dos tempos.

Os Latossolos são de estruturas pequenas e granular o que deixa este tipo de solo semelhante a solos arenosos que tem baixa retenção de água. O preparo convencional já vinha mecanizando intensamente estes solos, destruindo suas estruturas, reduzindo a porosidade do solo o que leva a formação de uma camada compactada (profundidade de 20 a 30 cm) e isso dificulta o enraizamento das plantas (Oliveira et al., 2002).

Quando o solo é compactado, sua porosidade e permeabilidade são reduzidas e a resistência à penetração é aumentada. Os fatores preponderantes do solo que determinam seu comportamento, quando está compactado, são: a granulometria, o teor de matéria orgânica, a

umidade do solo e o estado inicial de compactação (Silva et al., 2000b). Deste modo, tem surgido a necessidade de adotar sistemas mais conservacionistas.

2.4.2. Sistema de Plantio Direto (SPD)

Esta é uma prática de cultivo sem preparo físico do solo, mantendo a palha da cultura anterior na superfície, onde o solo deve ter mais de 70% de cobertura. Um dos maiores avanços no processo produtivo da agricultura brasileira foi a introdução do (SPD) no Sul do Brasil, a partir do início da década de 1970 (Barreto et al., 2004). O SPD surgiu no intuito de combater a erosão através do controle do escoamento da água de chuva por meio de resíduos que reduzem a velocidade da água em movimento dando mais tempo para sua infiltração. Atualmente são cultivados no Brasil cerca de 20 milhões de hectares sob plantio direto (Cervi, 2003), estando 25% dessa área localizada na região do cerrado.

O intenso processo de erosão hídrica, verificado nas décadas de 70 e 80, nas lavouras sob preparo convencional, foi um dos principais responsáveis pela qualidade e capacidade produtivas dos solos no Sul do Brasil (Conceição & Amado, 2002).

Já na década de 80 haviam trabalhos publicados mostrando os benefícios deste sistema ao solo. Dedecek et al. (1986) mostrou que a manutenção de uma vegetação de cobertura como a *Brachiaria decumbens*, reduz tanto os efeitos da erosividade da chuva como a enxurrada, o que irá diminuir as perdas de solo e água.

A manutenção dos nutrientes no ciclo biológico é parte essencial para a sustentabilidade na agricultura, sendo SPD um sistema bastante conservacionista do solo e água, mantendo os nutrientes no ciclo biológico. O SPD tem diversas vantagens dentre elas, maior período para plantar (porque o solo em plantio direto drena mais rápido que um solo recém gradeado em SPC e mantém a umidade por mais tempo, permitindo plantar por mais dias após a interrupção das chuvas), operação mais simples (não tem preparo do solo antes do plantio) e não tem problema de encrostamento da superfície do solo que dificulta a emergência das plântulas.

A impossibilidade de expandir a fronteira agrícola nessa região levou os produtores a buscarem alternativas de manejos capazes de recuperar a capacidade produtiva do solo. Neste contexto, destaca-se a utilização de culturas de cobertura no inverno e o sistema de plantio direto na palha (Conceição & Amado, 2002).

O SPD reduz em cerca de 75% as perdas de solo e em 20% as perdas de água, em relação às áreas onde há revolvimento do solo (Oliveira et al., 2002). No entanto o clima dos cerrados não é tão favorável à formação de palhada para cobertura do solo.

2.4.3. Integração lavoura-pecuária (ILP)

Desde a década de 70, estuda-se a implantação de pastagens na região do cerrado aliada a agricultura. No início da década de 90, houve um agravamento dos problemas relacionados à perda de produtividade e degradação de pastagens. Já nesta época houve uma busca por alternativas técnicas que recuperassem ou revertissem estas situações. A rotação de culturas anuais com pastagens foi indicada como uma das alternativas para atingir este propósito (Vilela et al., 2001).

A integração sustentável da lavoura e pecuária na região do cerrado é uma técnica que está em estudo na Embrapa desde 1978 e visa aprimorar o cultivo de grãos e a criação de gado na mesma área, além de promover a cobertura do solo com palhas, evitando assim a perda de umidade e minimizando as perdas de solo por erosão. É uma prática que deve ser usada em conjunto com rotação de culturas e plantio direto para aumentar o teor da matéria orgânica no solo.

Segundo Macedo et al. (2000) além de este sistema ser eficiente na melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo também quebra de ciclo de pragas e doenças, controle de invasoras, aproveitamento de subprodutos, pastejo de outono em pastagens anuais, melhorando e mantendo a produção animal e de grãos.

A integração entre cultivos anuais e pastagens já era apontada por Lal (1991), como uma alternativa para obter um manejo de solo e água sustentáveis nas regiões tropicais. A ILP prevê a redução no processo de abertura de novas áreas para atividades agrícolas, otimizando, de maneira sustentável, a capacidade de áreas improdutivas ou em processo de degradação.

O principal objetivo da ILP é a recuperação ou reforma de pastagens degradadas. Nesse sistema, as lavouras são utilizadas a fim de que a produção de grãos pague, pelo menos em parte, os custos da recuperação ou da reforma das pastagens. Para evitar outro ciclo de degradação, é necessário elaborar um cronograma de adubação de manutenção da pastagem recém-implantada (Alvarenga, 2004). É importante fazer o monitoramento da fertilidade para que a pastagem não sofra novo ciclo de degradação, devido ao esgotamento dos nutrientes que

entraram no sistema via adubação das lavouras. Então, é necessário cultivar lavouras novamente na área para reposição de nutrientes (Moraes, 1993).

O ILP também melhora as condições físicas e biológicas do solo com a pastagem na área de lavoura, devido à palha e as raízes deixadas no solo, com a decomposição aumenta o teor de matéria orgânica e as raízes formam uma rede de canalículos no solo de importância nas trocas gasosas e uma movimentação descendente de água (Moraes, 1993, Macedo e Zimmer, 1993). Produzem pasto, forragem conservada e grãos para alimentação animal na estação seca, pois a ILP possibilita que pastagens produzidas no consórcio sejam utilizadas durante a estação seca. A correção do perfil de solo proporciona melhor desenvolvimento do sistema radicular da forrageira que, assim, aprofunda-se no perfil e absorvem água a maiores profundidades, conferindo ao solo maior persistência durante a estação seca (Alvarenga, 2004).

Segundo Vilela et al. (2001), a rotação de culturas anuais com pastagens é indicada como uma das alternativas para evitar a perda de produtividade e degradação de pastagens, que vem se agravando desde início da década de 90. Deste modo, a integração dos sistemas de produção de culturas anuais e a pecuária se constituem num novo modelo para os agricultores, pecuaristas e profissionais da área técnica na região do cerrado. Para agricultores que buscam diversificar os sistemas de produção e superar os problemas advindos de cultivos anuais sucessivos, como a incidência de pragas, plantas daninhas e doenças este sistema integrado vem ganhando cada vez mais espaço nos cerrados.

O sistema de integração lavoura pecuária traz benefícios ao solo, à produtividade e economicidade do sistema de produção, tais como: aumenta as qualidades químicas, físicas e biológicas do solo pelo aumento da matéria orgânica do solo, esta por sua vez fornece energia e nutrientes aos organismos do solo que irão trabalhar na reciclagem de nutrientes e carbono nos ecossistemas agrícolas e diminui a incidência de plantas daninhas diminuindo a competição com a cultura principal, o que poderá aumentar a produtividade e minimizar o uso de herbicidas. Nas regiões tropicais e subtropicais onde são feitos cultivos mecanizados, a degradação do solo é mais acentuada, a mineralização da matéria orgânica chega a ser cerca de cinco vezes mais rápida que aquela observada em regiões temperadas (Sanchez & Logan, 1992).

2.5. Processos de perda de nutrientes

A fertilidade do solo é a capacidade do solo em fornecer os nutrientes essenciais, em quantidade e proporção adequadas, para o crescimento da planta. Esta capacidade é diminuída com as perdas dos nutrientes para subcamadas do solo.

Os nutrientes são fornecidos ao solo, principalmente, pela mineralização de matéria orgânica e pela aplicação de adubos químicos. Ao conhecer a fertilidade do solo permite a adequação das recomendações de corretivos e fertilizantes, que mesmo sendo adequada corre o risco de contaminar o meio ambiente, principalmente as águas subterrâneas.

A lixiviação determina a perda de elementos solúveis, como as bases trocáveis, da zona radicular para as camadas mais profundas do perfil do solo, podendo torná-los indisponíveis as culturas, e conseqüentemente, reduzir a produtividade por limitação nutricional. Assim, a lixiviação de íons provenientes da mineralização ou de fertilizantes deve ser uma constante preocupação (Santos et al., 2002).

O nitrogênio é um dos nutrientes de maior instabilidade no solo, estando propício a uma série de reações que, dependendo das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, este se apresenta de diferentes formas. Podendo então ser lixiviado, volatilizado, imobilizado pela biomassa microbiana ou absorvido pelas plantas (Paul & Clark, 1989).

O nitrogênio é um nutriente limitante para a produção de muitas culturas, anuais e também para as pastagens. No solo, a principal fonte de nitrogênio é a matéria orgânica e esta é influenciada pelo tipo de manejo do solo. Segundo Urquiaga & Zapata (2000), a maior parte do nitrogênio da matéria orgânica do solo não está disponível para as plantas.

O íon amônio, um cátion, permanece no solo na forma trocável, adsorvido pelas cargas negativas. Por outro lado o nitrato, devido a sua carga negativa, é repelido pela superfície das partículas do solo, permanecendo na solução, sendo assim muito móvel, por ser elemento afetado por uma dinâmica complexa e que não deixa efeitos residuais diretos das adubações, sendo o manejo adequado da adubação nitrogenada um dos mais difíceis (Raij, 1991). A menor evaporação e melhor estruturação ao longo do perfil e a taxa de infiltração de água em sistemas de semeadura direta favorece a movimentação do íon nitrato (Muzilli, 1983).

A lixiviação de íons é bastante afetada pela freqüência e intensidade das chuvas, que ao superar o consumo pelas plantas, drena, movimentando os elementos na solução do solo.

De acordo com Watanabe & Padre Junior (1979) as perdas de nitrato nos solos drenados são bastantes elevadas nos períodos das chuvas.

Segundo Moraes (1991) os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- são móveis no solo e suas perdas por lixiviação são bastante importantes, principalmente o nitrato. Este, ao se movimentar, carrega o cálcio, magnésio, potássio, sódio e outros cátions presentes na solução do solo.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÁMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L.G. de; MEDEIRO NETO, J. Caracterização da Região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J. (ed.) **Solos dos Cerrados**: Tecnologias e estratégias de manejo. Planaltina: Embrapa – CPAC; São Paulo: Nobel; p. 33-74, 1986.

ADDISCOTT, T. M.; WAGENET, R. J. Concepts of solute leaching in soils: a review of modelling approaches. **Journal of Soil Science** 36: 411-424, 1985.

ALVARENGA, R. C. Integração Lavoura – Pecuária. In: SIMPÓSIO DE PECUÁRIA DE CORTE. 3. **Anais...** Belo Horizonte-MG: UFMG, cd rom, 2004.

AYARZA, M.A.; VILELA, L. PIZARRO, E.A.; COSTA, P.H. Sistemas Agropastoriles baseados en leguminosas de usos múltiplos. P 175-194. in GUIMARÃES, E.P.; SANZ, J.I.; RAO, I.M.; AMEZQUITA, M.C.; AMEZQUITA, E. (eds.) **Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina**. 1st ed. Centro Internacional de Agricultura Tropical & Empresa de Pesquisa Agropecuária, Brasília, DF. 1999.

BARCELLOS, A.O. Sistemas extensivos e semi-intensivos de produção pecuária bovina de corte nos cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANAS, 1., 1996, Brasília, DF. **Anais...** Planaltina, DF : Embrapa-CPAC, p.130-136, 1996.

BARCELLOS, A.O., ANDRADE, R.P., KARIA, C.T., VILELA, L. Potencial e uso de leguminosas forrageiras dos gêneros *Stylosanthes*, *Arachis* e *Leucena*. In: A.M. Peixoto, C.G.S. Pereira, J.C. de Moura, V.P. de Faria (eds). **Anais** do 17o Simpósio sobre manejo da pastagem, Piracicaba-SP, FEALQ, p. 297-357, 2000.

BORTOLINI, C.G.; SILVA, P.R.; ARGENTA, G. Sistemas consorciados de aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.897-903, 2000.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y.M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J.P.; HÉNAULT, C.; MARAUX, F.; SEGUIN, B.; SINOQUET, H. An overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v.18, p.309-332, 2003.

BRISSON, N.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; JEUFFROY, M.H.; RUGET, F.; NICOUILLAUD, B.; GATE, P.; DEVIENNE-BARET, F.; ANTONIOLETTI, R.; DURR, C.; RICHARD, G.; BEAUDOIN, G.; RECOUS, S.; TAYOT, X.; PLENET, D.; CELLIER, P.; MACHET J.M.; MEYNARD J.M.; DELÉCOLLE R. STICS: A Generic Model for the Simulation of crops and their water and Nitrogen Balances. I. Theory and parameterisation applied to wheat and corn, **Agronomie** v.18, p. 311-346, 1998.

BARRETO, A. N.; SILVA, A. A. G. da; BOLFE, E. L. (Ed.). Irrigação e drenagem na empresa agrícola: impacto ambiental versus sustentabilidade. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 418 p.

CERVI, E.U. A revolução da palha. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n.73, p.8-12, 2003.

CIRAD. SARRA - Guide d'utilisation. Montpellier : CIRAD-CA. **Unité de Recherche "Gestion de l'eau"**. 1995. 68p.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T.J.C. Avaliação da qualidade do solo sob sistema de plantio direto em dois experimentos de longa duração no Rio Grande do Sul. **Revista Plantio Direto**, Ano XII- n. 72-nov/dez. 2002.

DEDECEK, R.A.; RESCK, D.V.S.; FREITAS, E. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em Latossolo Vermelho-Escuro dos cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10 p. 265-272, 1986.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N. e ROTH, HC.H. Results of studies from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no tillage techniques in Parana, Brasil. **Soil tillage Research.**, v.8 p. 253-263, 1986.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria-RS, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

GOEDERT, W. J. Uso e manejo dos recursos naturais do Cerrado: solo e clima. In: **ANAIS SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO**, 5., 1979, Brasília. Cerrado: uso e manejo. Brasília: Editerra, p. 475-498, 1980.

HANKS, J.; RITCHIE, J.T. eds. **Modeling plant and soil systems**. Madison, USA: ASA/CSSA/SSSA, 1991. 545p.

HERMANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.145-154, 1999.

JESSOP, R. S.; STEWART, L. W. Effects of crops residue, soil type and temperature on emergence and early growth of wheat. **Plant and Soil**. Dordrecht, v. 74, p. 101-109, 1983.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antonio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, 2003, 570 p.

LAL, R. Tillage and agriculture sustainability. **Soil and Tillage Research**, London, v. 20, p.257-283, 1991.

LOPES, A. S.; COX, F. R. Cerrado vegetation in Brazil: an edaphic gradient. **Agronomy Journal**, v. 69, p. 828-831, 1977.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 18., Piracicaba, 2001. **Anais**. Piracicaba, Universidade de São Paulo, p.257-283, 2001.

MACEDO, M. C. M. KICHEL, A. N.; ZIMMER, A. H. Degradação e alternativas de recuperação e renovação de pastagens. **Comunicado técnico** Nº 62, Embrapa Gado de Corte, p.1-4, 2000.

MACEDO, M.C.M.; ZIMMER, A.H. Sistema Pasto-Lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DE PASTAGEM, **Anais**. Jaboticabal-SP. UNESP. p. 216-245, 1993.

MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B.; ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de Tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.201-207, 2000.

MORAES, A. Pastagens como fator de recuperação de áreas degradadas. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DE PASTAGENS. 2. **Anais...** Jaboticabal.- SP: UNESP. p. 191-215, 1993.

MORAES, J. F. V. Movimento de nutrientes em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35 p. 95-97,1991.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 95-102, 1983.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.393-486, 2002.

OLIVEIRA, R.M. de. **Resposta do feijão de inverno a doses de nitrogênio no sistema de plantio direto e efeito de palhadas no desenvolvimento do mofo branco**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2001. 88p. (Tese Doutorado).

PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego, Academic Press, 1989. 275p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343p.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. **Sistema da avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3º ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS. 1994. 65 p.

REEVES, D.W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 1995, Passo Fundo. **Resumos...** Passo Fundo: Embrapa–CNPT. p. 127–130, 1995.

ROOS, L.C. Impacto econômico da integração agricultura-pecuária em plantio direto In: ANAIS DO ENCONTRO REGIONAL DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO. **Anais**, Uberlândia, MG. 1999.

SALATI, E.; LEMOS, H.M. Água e desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. eds. **Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo, Escrituras, p. 39-62, 1999.

SANCHEZ, P. A.; LOGAN, T. J. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. A. (Ed.). **Myths and science of soil of the tropics**. Madison: SSSA Special Publication 29. p. 35–46, 1992.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.12-16, 2002.

SANTOS, M. N. dos. **Influência de diferentes sistemas de manejo nos teores de carbono orgânico e de nutrientes e no tamanho e distribuição de poros em latossolo vermelho-escuro argiloso na região dos Cerrados**. Brasília: Universidade de Brasília, 1997. 133p. (dissertação de mestrado).

SILVA, L.S.; CAMARGO, F.A.O.; CERRETA, C.A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E.J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000a. 174p.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35(12):2485-242, 2000b.

SILVA, S.C. da.; ASSAD, E.D. Zoneamento de riscos climáticos para o arroz de sequeiro nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins e Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3, p.536-543, dez. 2001.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2º ed. Brasília. Embrapa Informações tecnológicas, 2004, 416 p.

SPAIN, J.M.; AYARZA, M.A.; VILELA, L. Crop pasture rotations in the Brazilian Cerrado. p.39-45. In: PEREIRA, R.C.; NASSER, L.C. (ed.) 8º Simpósio sobre o Cerrado. 1st International Symposium on Tropical Savannas. **Anais**. Embrapa Cerrados, Brasília, DF. 1996.

URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. **Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe**. Porto Alegre: Gênese, 2000. 110p.

VILELA, L; BARCELLOS, A.O.; SOUSA, D.M.G. **Benefícios da integração entre lavoura e pecuária**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2001. 21p. (EMBRAPACPAC. Documentos, n. 42).

WATANABE, I.; PADRE JUNIOR, B.C. Inorganic nitrogen in tropical soils: The of ammonium fertilizer in well and poorly drained soils in the rainy season. **Soil Science and Plant Nutrition**. v.25, n.4, p.627-635, 1979.

CAPÍTULO I

CONCENTRAÇÃO DE ÍONS NA SOLUÇÃO DE UM LATOSSOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

CONCENTRAÇÃO DE ÍONS NA SOLUÇÃO DE UM LATOSSOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as concentrações de íons na solução de solo, em parcelas experimentais submetidas aos seguintes sistemas de cultivo: lavoura contínua, pastagem contínua e integração lavoura-pecuária. O experimento foi iniciado em 1991, mas as coletas de amostras da solução do solo foram realizadas em 2005 e 2006. Para tanto, cápsulas porosas foram instaladas, nas profundidades de 20 e 150 cm e as soluções foram extraídas em seis datas, para cada ano. Foram determinadas, em laboratório, as concentrações dos seguintes íons nas soluções coletadas: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Mg^{2+} , e Ca^{2+} . Em termos gerais, a movimentação de ânions no solo, considerando as duas profundidades, apresentou concentrações na seguinte ordem de grandeza: $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$. Já a movimentação de cátions, apresentou concentrações na seguinte ordem: $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$. Em termos comparativos entre os sistemas de cultivo, a concentração dos íons na solução do solo, nas duas profundidades, mostrou a seguinte seqüência: lavoura contínua > integração lavoura-pecuária > pastagem contínua. As concentrações dos íons na solução de solo, na profundidade de 150 cm, sob pastagem contínua e integração lavoura-pecuária foram sempre mais baixas.

Palavra chave: solução do solo, lixiviação, sistemas de cultivo, pastagem, cerrado.

ÍON CONCENTRATION IN SOIL SOLUTION OF PLOTS UNDER CROP-PASTURE ROTATIONS

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the soil solution ion concentrations in experimental plots under the following systems: continuous crop, continuous pasture and crop-pasture rotations. The experiment was started in 1991, but the soil solution was collected during the years of 2005 and 2006. Ceramic caps were installed in the soil at two depths, 20 and 150 cm, and samples of soil solution were extracted in six dates for each year. The concentration of the following ions was measured: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} . In general terms, the pattern of anions movement was: $\text{NO}_3^- \gg \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$, and of cations was: $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$. When cropping systems were compared, the general pattern of ion movement was: continuous cropping $>$ crop-pasture rotations $>$ continuous pasture.

Key words: soil solution, leaching, crop rotation, pasture, cerrado

INTRODUÇÃO

O uso intensivo e o manejo inadequado dos solos podem causar vários impactos negativos no solo, tais como: compactação, erosão, decréscimo da matéria orgânica e a diminuição da disponibilidade dos nutrientes. A pesquisa, em cooperação com os produtores rurais, desenvolveu sistemas de cultivo mais sustentáveis para a região dos cerrados. Entre tais sistemas, pode-se destacar o plantio direto e a integração lavoura-pecuária. Segundo Spain et al. (1996) e Ayarza et al. (1999), com o uso destes sistemas é possível haver exploração mais sustentável da biodiversidade, com aumento da produção e da produtividade da agropecuária nos cerrados.

Os vários sistemas de cultivos interferem diretamente nas propriedades físicas químicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, sobre a disponibilidade e a dinâmica dos nutrientes no solo. Os elementos que estão em solução do solo, oriundos do próprio solo em sua fase sólida ou dos fertilizantes, estão diretamente disponíveis às plantas. No entanto para que a planta utilize estes elementos, vários fatores devem ser levados em consideração, tais como: pH, complexação iônica, capacidade de troca catiônica, dinâmica da mineralização da matéria orgânica e a dinâmica de absorção de nutrientes.

O sistema de plantio direto (SPD) mantém o solo coberto durante todo o ano, principalmente na entressafra e, devido ao não revolvimento do solo, há um retardamento na mineralização da matéria orgânica (MOS). No plantio convencional (SPC), a mineralização é afetada pela intensidade de revolvimento do solo, que influencia diretamente a temperatura, a umidade e a aeração do solo. A integração entre cultivos anuais e pastagens já era apontada por Lal (1991), como uma alternativa para obter um manejo de solo e água. Neste caso, a pastagem ou plantas de cobertura, seja leguminosa ou gramínea, utilizadas na entressafra, favorecem a absorção de nutrientes disponíveis para as plantas.

A concentração dos elementos na solução do solo é controlada por vários parâmetros físico-químicos do solo tais como: pH, complexação iônica e capacidade de troca catiônica. Os ânions SO_4^{2-} , Cl^- e NO_3^- provenientes da mineralização dos resíduos orgânicos, dos fertilizantes e da chuva são pouco adsorvidos pelos solos e ficam livres na solução do solo (Oliveira et al., 2002). Em virtude da associação iônica na solução do solo com a neutralização de cargas, os ânions promovem a presença dos cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) na solução do solo e esses elementos estarão também disponíveis para as plantas.

Porém, em determinadas condições, quando ocorre uma intensidade de chuva ultrapassando a capacidade retenção de água do solo, pode haver uma drenagem favorecendo uma movimentação descendente destes íons no perfil do solo. A lixiviação determina a perda de nutrientes da zona radicular para as camadas mais profundas do perfil do solo, podendo torná-los indisponíveis às culturas e, conseqüentemente, reduzir a produtividade por limitação nutricional. Assim, a lixiviação de íons provenientes da solução do solo ou de fertilizantes deve ser uma constante preocupação (Santos et al., 2002). A lixiviação de íons é um processo complexo com interação entre os processos hidrológicos do solo, o consumo de água pelas plantas e o manejo do solo.

O objetivo do trabalho foi comparar as concentrações de íons na solução de solo, (nas profundidades de 20 cm e 150 cm), para os seguintes íons: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , em áreas experimentais submetidas aos seguintes sistemas de cultivo: lavoura contínua, pastagem contínua e integração lavoura-pecuária, visando avaliar riscos potenciais de perdas de nutrientes por lixiviação nos vários sistemas de manejo. Complementarmente, o movimento de íons foi avaliado em solo sob lavoura contínua, com preparo convencional e plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental

O trabalho foi conduzido durante os anos agrícolas de 2004/2005 e 2005/2006, na área experimental da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina-DF, a 1.200m acima do nível do mar, segundo as coordenadas 15° 35' de latitude Sul e 47° 42'30' de longitude Oeste

Caracterização climática

Do ponto de vista climático, segundo a classificação de Koppen, a área está inserida no domínio morfoclimático do Cerrado, com clima tropical estacional (Aw). Apresenta duas estações bem definidas, sendo com verão quente e úmido e precipitação média anual entre 1.400 mm e 1.600 mm bem distribuída entre os meses de outubro a abril, e outra com inverno de temperaturas amenas e pouca pluviosidade, ocorrendo entre os meses de maio a setembro, acarretando uma elevada evapotranspiração e uma deficiência hídrica considerável nos solos.

As médias das temperaturas máxima e mínima são de 26,4 °C e 15,9 °C, respectivamente.

Solos

O solo das parcelas experimentais foi classificado como um Latossolo Vermelho (LV) argiloso (Sousa & Lobato 2004), as principais características físicas e químicas são apresentadas nos anexos 2 e 3.

Descrição do experimento e das parcelas experimentais

O experimento teve início em 1991, quando uma área de cerrado virgem foi desmatada para estabelecer os tratamentos de pastagens e culturas produtoras de grãos, (Tabela 1), onde dentro dos tratamentos tinha-se sistema de preparo convencional (SPC), sistema plantio direto (SPD), pastagem contínua (P) e sistema de integração lavoura-pecuária (ILP).

Após 1991, no sistema ILP a alternância entre pastagem e lavoura ocorreu a cada quatro anos (Tabela 5). As pastagens contínuas foram renovadas pela substituição do capim *Andropogon* pela *Brachiaria decumbens* em novembro de 1999. Na rotação lavoura pasto no sistema ILP, o capim *Andropogon* foi substituído pelo *Panicum maximum* cv. Tanzânia..

As pastagens contínuas foram renovadas pela substituição do capim andropogon pela *Brachiaria decumbens* em novembro de 1999. Na rotação lavoura pasto no sistema ILP, o capim andropogon foi substituído pelo *Panicum maximum* cv. Tanzânia.

Tabela 1. Representação esquemática das seqüências planejadas para o experimento, incluindo o sistema integração lavoura/pastagem.

Anos				
1991/92	1994/1995	1999/00	2004/08	
Pastagem contínua				P
Lavoura contínua				L
Pastagem	Lavoura	Pastagem	Lavoura	ILP
Lavoura	Pastagem	Lavoura	Pastagem	ILP

Entre os tratamentos originais do experimento, foram selecionados para a realização deste trabalho (Tabela 2): Lavoura contínua (L), com preparo convencional (SPC) e plantio direto (SPD), Pastagem contínua (P) e dois sistemas de integração lavoura-pecuária (LP e PL). Adicionalmente dois esquemas de adubação foram implementados, adubação de correção (AC) e adubação de manutenção (AM).

Tabela 2. Caracterização dos sistemas de cultivo selecionados e avaliados.

Sistema	Tipo de cultivo	Nível de fertilidade	Sigla
1-Lavoura contínua	Preparo convencional	Correção	L-SPC-AC
		Manutenção	L-SPC-AM
	Plantio direto	Correção	L-SPD-AC
		Manutenção	L-SPD-AM
2-Pastagem contínua	-----	Correção	P
3-Rotação Lavoura/ Pastagem	Plantio direto	Correção	LP-ILP-AC
4-Rotação Pastagem/ Lavoura	Plantio direto	Correção	PL-ILP-AC

A adubação de manutenção foi calculada com base no rendimento de grãos e a adubação de correção foi calculada baseada no nível de P disponível no solo. A adubação com micronutrientes, ocorreu somente até o ano de 1998, em todos os tratamentos, Anexo 1.

No ano agrícola 2004/2005, onde a cultura era soja (variedade EMGOPA 313) semeada dia 22/12/04, o experimento foi adubado no plantio com 250 kg/ha da formulação 2-20-18, sendo que os tratamentos com fertilidade AC receberam em cobertura mais 250 kg/ha da formulação 2-20-18.

No segundo ano agrícola (2005/2006), onde a cultura era sorgo (variedade BR304), semeada em 25/01/06, os tratamentos com adubação AM foram adubados no plantio com 175 kg/ha da formulação 2-20-20 e os tratamentos com fertilidade AC foram adubados no plantio com 350 kg/ha de 2-20-20, sendo 180 kg/ha no sulco + 170 kg/ha a lanço. Todos os tratamentos sob cultura anual receberam N em cobertura, sendo que os tratamentos com fertilidade AM receberam 30 kg/ha de N (uréia) e os tratamentos com fertilidade AC receberam 60 kg/ha de N (uréia) (Anexo 1).

No ano agrícola 2005/2006 foi feita também adubação com 200 N kg/ha 42 P₂O₅ kg/ha e 100 K₂O kg/ha na pastagem contínua (P) e na integração (ILP) nos tratamentos com adubação AC, na intenção de forçar um fluxo destes elementos para as camadas mais profundas (Anexo 1).

Em síntese, para o presente trabalho, foram selecionados sete tratamentos, conforme discriminado a seguir:

- L-SPC-AC - Lavoura contínua com preparo convencional e adubação corretiva gradual;

- L-SPC-AM - Lavoura contínua com preparo convencional e adubação de manutenção;
- L-SPD-AC - Lavoura contínua com plantio direto, sob vegetação espontânea e adubação corretiva gradual;
- L-SPD-AM - Lavoura contínua com plantio direto, sob vegetação espontânea e adubação de manutenção;
- P - Pastagem contínua;
- LP-ILP-AC - Sistema de rotação lavoura pecuária, antes se encontrava em pastagem e atualmente em fase de cultivo, no primeiro ano com soja e no segundo com sorgo, em plantio direto e adubação corretiva gradual;
- PL-ILP-AC - Sistema de rotação lavoura pecuária, encontrando-se atualmente em fase de pastagem, com plantio direto e adubação corretiva gradual.

Procedimentos de amostragem e análise

Para a coleta de amostras da solução do solo, foram instaladas no início da estação chuvosa, depois da implantação da cultura anual (dezembro de 2004 e janeiro de 2006), 84 cápsulas porosas nas entrelinhas de cultivo, nas profundidades de 20 cm e 150 cm, com seis repetições para cada profundidade. Utilizou-se cano de PVC (3,6 cm (1,5') de diâmetro, 60 cm e 180 cm de comprimento) com cerâmica porosa (Soil Moisture Equipment Corp, USA, modelo B01M3) em sua extremidade inferior e duas mangueiras, uma para fazer a sucção e outra para a retirada da solução de solo (Grossmann e Udluft, 1991).

Antes da instalação no solo, as cápsulas foram lavadas com HCl 0,1 mol L⁻¹, com utilização de vácuo, em seguida, lavadas com água destilada e deixadas por 45 minutos em água destilada e deionizada, visando eliminar as impurezas deixadas na primeira lavagem. Em seguida, realizou-se novamente a imersão das cápsulas em vasilhames de um litro que continham água destilada e deionizada, de forma semelhante à primeira etapa até o momento de instalação no campo. Segundo Silva et al. (2004), o pré-tratamento de cápsulas porosas de porcelana com HCl 0,1 mol L⁻¹ sob vácuo e lavagem com água destilada, deixando-as, em seguida, em água destilada e deionizada durante 4 h, é necessário e suficiente para condicioná-las de modo a não interferir no pH e teores de Ca e Mg da solução a ser extraída.

As soluções foram extraídas a 20 e 150 cm de profundidade no perfil, depois de cada período chuvoso, com coletas de amostras no ano 2004/2005 em 06/01/05, 20/01/05, 03/02/05, 01/03/05, 18/04/05 e 27/04/05 e para o ano 2005/2006 em 08/02/06, 15/02/06, 23/02/06, 10/03/06, 17/03/06, 30/03/06.

Foram realizadas análises dos teores de ânions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , H_2PO_4^- , e cátions K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} no laboratório de química de solos da Embrapa Cerrados, onde Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- foram determinados pela metodologia de cromatografia iônica, K^+ foi determinado por fotometria de emissão de chama e H_2PO_4^- , Mg^{2+} , e Ca^{2+} foram determinados no Espectrômetro de Emissão Atômica com fonte de plasma (ICP-AES).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista que os íons nitrato, potássio, magnésio e cálcio foram os mais abundantes na solução do solo, a discussão será inicialmente direcionada para estes íons.

Concentração do íon nitrato na solução do solo

Durante o ano 2004/2005, a concentração do ânion nitrato na solução do solo foi muito elevada, nas duas profundidades, nos tratamentos sob lavoura (L-SPC-AC e L-SPC-AM), sendo que as concentrações no L-SPC-AC alcançaram $8.500 \mu\text{M L}^{-1}$ na profundidade de 20 cm e $600 \mu\text{M L}^{-1}$ na de 150 cm (Figura 2, A e B). Após a terceira coleta, no entanto, as concentrações baixaram até zero e $200 \mu\text{M L}^{-1}$, para as profundidades de 20 e 150 cm, respectivamente.

Nos tratamentos L-SPD-AC e L-SPD-AM as curvas de distribuição a 20 cm são semelhantes aos L-SPC-AC e L-SPC-AM, com uma rápida diminuição das concentrações após a primeira coleta. No entanto, as concentrações iniciais são menores, alcançando apenas 2.700 e $980 \mu\text{M L}^{-1}$. A 150 cm as concentrações detectadas foram 129 e $120 \mu\text{M L}^{-1}$ sendo em ordem de quatro vezes menores que nos tratamentos L-SPC-AC e L-SPC-AM com concentrações de 593 e $469 \mu\text{M L}^{-1}$.

Os tratamentos PL-ILP-AC, LP-ILP-AC e P apresentaram valores próximos a zero nas duas profundidades durante todo o período de amostragem.

No ano agrícola 2005/2006, as concentrações do ânion nitrato na solução de solo foram também bastante elevadas, na profundidade 20 cm, exceto nos tratamentos sob

pastagem (P e PL-ILP-AC). Sendo que a 150 cm não foi possível a avaliação por falta de material, não foi coletado soluções do solo no período de estudo.

O nitrato foi o íon que apresentou maior concentração na solução do solo principalmente nos tratamentos L-SPC-AC e L-SPC-AM, na camada de 20 cm, nos dois anos de cultivo. A 150 cm os tratamentos L-SPC-AC e L-SPC-AM se destacaram também nos dois anos, apresentando superiores aos demais tratamentos (Figura 2, B e D). Segundo Bayer & Mielniczuk (1997), a maior lixiviação de nitrogênio no sistema de semeadura convencional é devido à maior decomposição da MOS e dos resíduos culturais incorporados ao solo propiciados por este sistema.

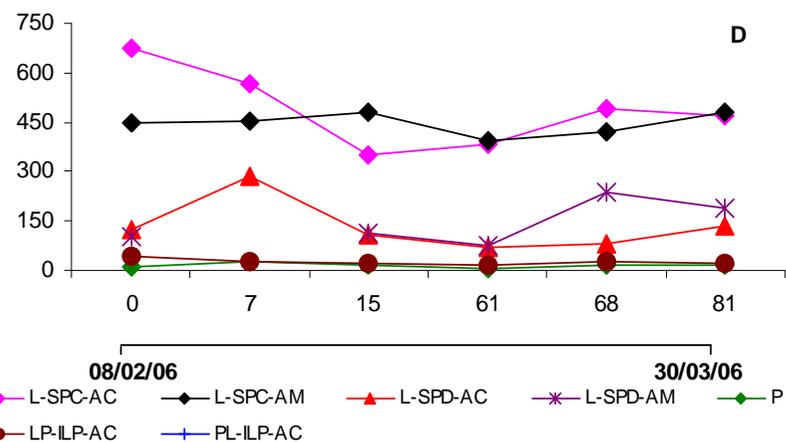
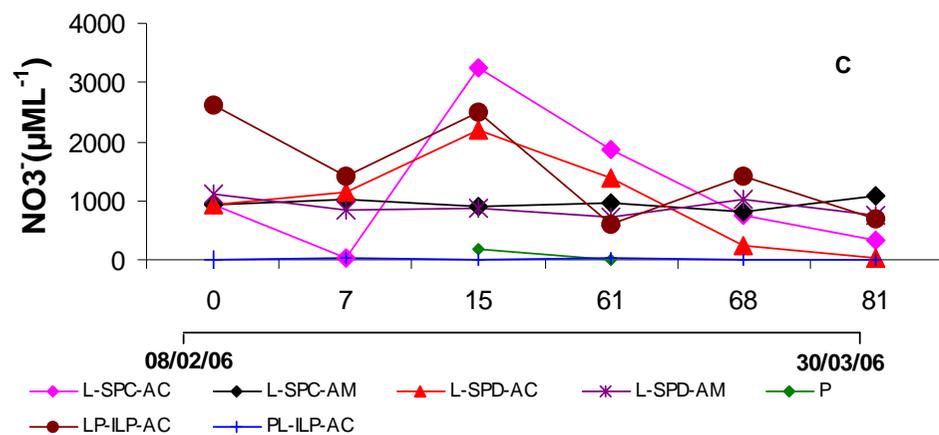
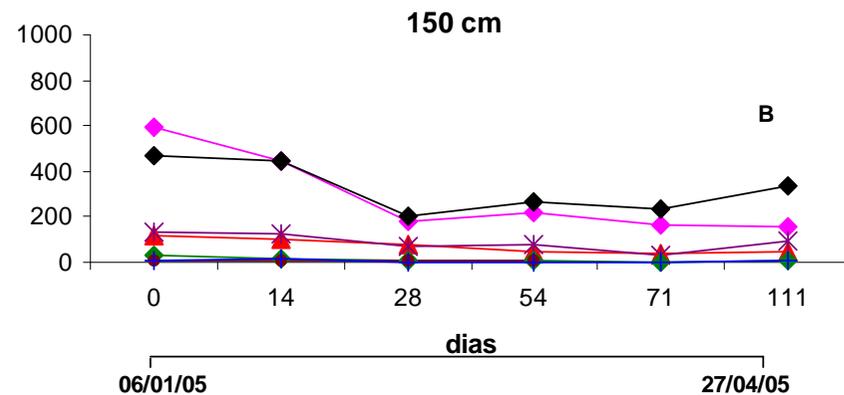
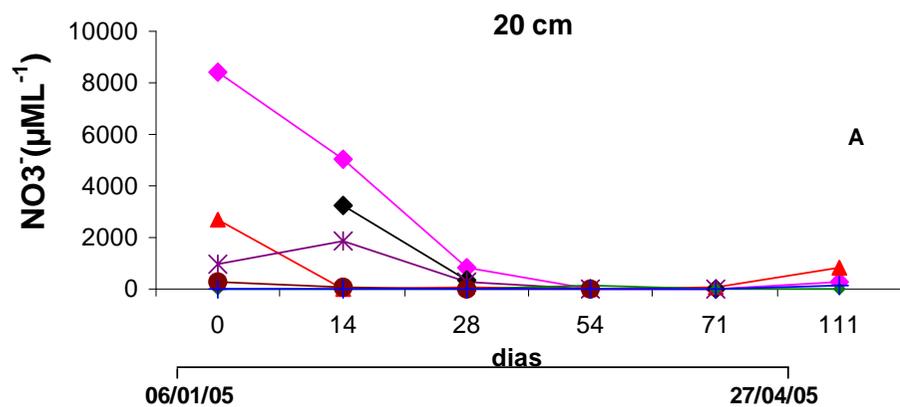


Figura 2. Concentrações do anion nitrato em solução de solo, de amostras coletadas nas profundidades de 20 e 150 cm, em seis datas, durante os anos agrícolas de 2004/2005 (A e B) e 2005/2006 (C e D), em solos sob sete sistemas de cultivo.

Concentração dos íons potássio, magnésio e cálcio na solução do solo

No ano 2004/2005, as curvas de distribuição dos cátions K^+ , Mg^{2+} , e Ca^{2+} na solução de solo seguem a mesma tendência do nitrato (Figura 3).

A 20 cm de profundidade, observa-se um rápido decréscimo das concentrações de K^+ , passando de $1.800 \mu M L^{-1}$, no tratamento L-SPC-AC, no início de plantio, a $65 \mu M L^{-1}$ no final da estação chuvosa (Figura 3, A). Como para o nitrato, os tratamentos de lavoura com preparo convencional apresentaram concentrações de K^+ mais elevadas do que os demais tratamentos. Aquele sob pastagem (P) também teve concentrações baixas.

Na profundidade de 150 cm, as concentrações não variaram no período de coleta. Entre os tratamentos também não houve diferença, exceto no tratamento L-SPD-AC que na segunda coleta alcançou uma concentração de $187 \mu M L^{-1}$ e decrescendo logo em seguida para um valor de $49 \mu M L^{-1}$, sendo que as concentrações foram de pelo menos 10 vezes menores que a 20 cm. A menor concentração foi encontrada no tratamento sob pastagem contínua (P), seguido dos tratamentos sob integração lavoura-pecuária (LP-ILP-AC), conforme mostrado na figura 3B. Segundo Rosolem et al. (2006), a cobertura vegetal aumenta a concentração de K^+ na superfície e diminui a lixiviação do nutriente no perfil do solo.

As curvas para o íon Mg^{2+} na solução são semelhantes às do íon K^+ e caracterizam um movimento acentuado deste nutriente no solo, apesar de que as concentrações foram menores que aquelas do K^+ (Figura 3, C e D).

A 20 cm de profundidade, observa-se um rápido decréscimo das concentrações, passando de $544 \mu M L^{-1}$ no tratamento L-SPC-AC, no início de plantio, a $34 \mu M L^{-1}$ no final da estação chuvosa, sendo que todos os tratamentos mostraram o mesmo comportamento. A 150 cm, embora não tenha ocorrido grande diferenciação entre os tratamentos, o L-SPC-AM e L-SPC-AC foram que apresentaram maior movimentação em profundidade, variando de 127 e $114 \mu M L^{-1}$ a 72 e $55 \mu M L^{-1}$ (Figura 3 C).

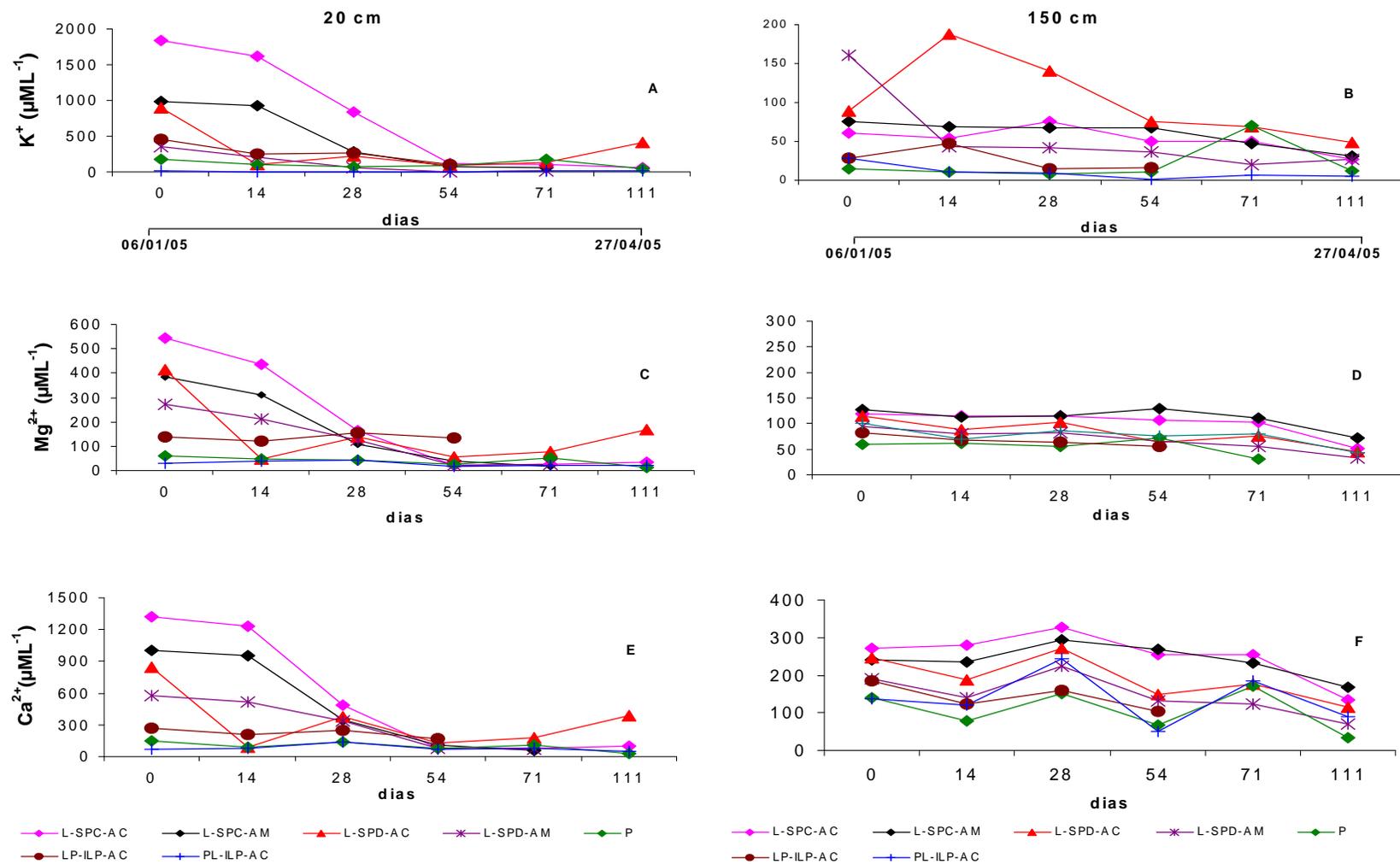


Figura 3. Concentrações dos íons cátions potássio, magnésio e cálcio em solução de solo de amostras coletadas nas profundidades 20 e 150 cm, em seis datas, no ano 2004/2005, em solos sob sete sistemas de cultivo.

As curvas de concentração para o íon Ca^{2+} na solução de solo são similares às para potássio e magnésio, em todos os tratamentos. Relato semelhante foi feito por Miranda et al. (2006), porém houve uma maior movimentação do cátion Ca^{2+} . A 20 cm de profundidade, observa-se um rápido decréscimo das concentrações, passando de $1.319 \mu\text{M L}^{-1}$ no tratamento L-SPC-AC, no início de plantio, a $99 \mu\text{M L}^{-1}$ no final da estação chuvosa (Figura 3 E).

Na profundidade de 150 cm, as concentrações não variaram no período de coleta e entre as parcelas também não houve diferença, exceto no tratamento L-SPC-AC e L-SPC-AM que alcançou uma concentração de 272 e $242 \mu\text{M L}^{-1}$, mantendo-se instável até um valor mínimo de 134 e $168 \mu\text{M L}^{-1}$, sendo que as concentrações foram quatro vezes menores que a 20 cm (Figura 3 F).

A 150 cm, as concentrações de K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} nos tratamentos sob lavoura (L-SPC-AC e L-SPC-AM e L-SPD-AC) são geralmente maiores que aquelas para o tratamento sob rotação lavoura-pastagem (LP-ILP-AC e PL-ILP-AC) e pastagem contínua (P), possivelmente devido às maiores concentrações de nitrato na solução do solo (Figura 3). Oliveira & Pavan (1994) verificaram que com a aplicação de gesso há uma intensa lixiviação de magnésio, prejudicando assim a absorção desse nutriente pela cultura da soja.

Os resultados obtidos para potássio, magnésio e cálcio no segundo ano de cultivo (2005/2006) são apresentados na figura 4. Na profundidade de 20 cm, as concentrações de K^+ , não variaram muito entre os tratamentos, do início para o final da estação chuvosa, sendo que a maior concentração foi encontrada no tratamento L-SPD-AC que era de $352 \mu\text{M L}^{-1}$ decrescendo para $31 \mu\text{M L}^{-1}$. No final do período de coleta, os tratamentos L-SPD-AC, L-SPD-AM, L-SPC-AC, L-SPC-AM e LP-ILP-AC não diferiram entre si e no tratamento P, a concentração de K^+ variou de $9 \mu\text{M L}^{-1}$ a $12 \mu\text{M L}^{-1}$ (Figura 4 A).

Na profundidade de 150 cm, as concentrações de K^+ foram bastante similares, exceto para o tratamento L-SPC-AC, onde a lixiviação foi mais intensa, variando de $254 \mu\text{M L}^{-1}$ e caindo para $114 \mu\text{M L}^{-1}$ na última coleta (Figura 4 B). Este fato pode estar relacionado com a adubação de correção e o potássio imobilizado pelos restos culturais, que com a decomposição da matéria orgânica vai sendo liberado lentamente, assim aumentando o teor do mesmo na solução do solo. Em trabalho realizado por Miranda et al. (2006) foi relatado que a lixiviação mais intensa do potássio ocorre em solo sem cobertura vegetal, fato observado também para cálcio e magnésio.

As curvas para os íons Mg^{2+} e Ca^{2+} na solução foram similares às curvas de K^+ , havendo uma maior concentração nos tratamentos L-SPD-AC, L-ILP-AC, no início da estação chuvosa, a 20 cm (Figura 4, C e E).

A 150 cm, embora não ocorra grande diferenciação entre os tratamentos, o L-SPC-AC e L-SPC-AM foram os que apresentaram maior concentração, de Mg^{2+} variando de 87 e $44 \mu\text{M L}^{-1}$, na primeira coleta e na última coleta 89 e $83 \mu\text{M L}^{-1}$, sendo que não houve diferença devido a adubação ser de correção ou manutenção. Os demais tratamentos não diferiram entre si (Figura 4, D e F).

As concentrações de Ca^{2+} na solução, a 20 cm, não variaram muito do início para o final das coletas, sendo que as maiores concentrações foram encontradas nos tratamentos L-SPD-AC, LP-IPL-AC que era de 819 e $960 \mu\text{M L}^{-1}$ no início das coletas decrescendo para 196 e $446 \mu\text{M L}^{-1}$. Os tratamentos L-SPD-AC, L-SPC-AC, PL-ILP-AC, L-SPC-AM e L-SPD-AM não diferiram muito entre si. Nas parcelas (P e PL-ILP-AC), as concentrações de Ca^{2+} foram menores variando de $155 \mu\text{M L}^{-1}$ a $108 \mu\text{M L}^{-1}$ no início das chuvas (Figura 4, E).

Na profundidade de 150 cm, as concentrações foram bastante similares entre os tratamentos, exceto para o tratamento L-SPC-AC onde a lixiviação foi mais intensa variando de $343 \mu\text{M L}^{-1}$, caindo para $312 \mu\text{M L}^{-1}$ na última coleta. Já no tratamento L-SPC-AM, as concentrações encontradas foram de $166 \mu\text{M L}^{-1}$ e $190 \mu\text{M L}^{-1}$ ocorrendo um pequeno acréscimo da lixiviação no final da estação chuvosa (Figura 4 F). Os demais tratamentos mantiveram-se constantes, sendo que a menor concentração foi encontrada no tratamento sob pastagem contínua (P). As concentrações foram de 1 a 2

vezes menores do que na profundidade de 20 cm. Segundo Ritchey et al. (1983) a presença de Ca^{2+} em camadas mais profundas evidencia sua lixiviação.

A similaridade das variações nas concentrações dos três cátions avaliados e do ânion nitrato pode ser devido ao equilíbrio entre os íons de carga negativa (principalmente o nitrato) e os de carga positiva (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}). Esta semelhança das curvas de distribuição de NO_3^- , com as dos cátions K^+ e Ca^{2+} e Mg^{2+} , pode indicar participação do mesmo no movimento destes cátions para camadas mais profundas (movimentação pareada). Tal fato foi também relatado por Moraes (1991).

Concentração dos Íons Cloreto, Sulfato e Fosfato na Solução do Solo

Nas tabelas 3 e 4 são apresentados os valores médios dos íons Cl^- , SO_4^{2-} e H_2PO_4^- , determinados na solução do solo, em duas profundidades e avaliados durante dois anos 2004/05 e 2005/06. Observa-se que as concentrações foram bastante baixas, quando comparadas com as dos íons NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} (Figuras 3 e 4).

As concentrações do ânion Cl^- foram mais elevadas nas primeiras coletas, na profundidade de 20 cm, principalmente no tratamento L-SPC-AC variando de $529 \mu\text{M L}^{-1}$ na primeira coleta a $23 \mu\text{M L}^{-1}$ na última coleta. Na profundidade de 150 cm sua concentração não variou muito entre os tratamentos, com concentrações médias de $200 \mu\text{M L}^{-1}$, exceto para o tratamento P, onde a concentração média foi de $70 \mu\text{M L}^{-1}$. As concentrações de Cl^- são geralmente mais elevadas no tratamento L-SPC-AC, o que está relacionado com a adubação com cloreto de potássio.

As concentrações de sulfato também foram baixas, com médias de 20 e $3 \mu\text{M L}^{-1}$ nas profundidades de 20 e 150 cm. Já o fosfato manteve suas concentrações baixas ao longo do período de coleta das soluções, em todos os tratamentos, variando de 1 a $7 \mu\text{M L}^{-1}$ na profundidade de 20 cm e 150 cm, respectivamente.

No segundo ano de cultivo (2005/06) as concentrações dos íons foram bastante baixa, foi detectado concentrações de SO_4^{2-} e H_2PO_4^- muito baixa em todos os tratamentos (Tabela 4) já o Cl^- as maiores concentrações foram encontradas no L-SPD-AC a 20 cm. A 150 cm as concentrações deste íon foi elevada, mostrando que este movimenta-se facilmente o perfil do solo, a maior concentração foi detectada no L-SPC-AC variando de 305 a $117 \mu\text{M L}^{-1}$.

Tabela 3. Concentrações de íons cloreto, sulfato e fosfato em solução de solo, de amostras coletadas na profundidade 20 e 150 cm, em seis datas, no ano 2004/2005, em solos sob sete sistemas de cultivo (nd – não determinado por falta de solução do solo).

Tratamento	20 cm				150 cm			
	pH	2004/2005			pH	2004/2005		
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻
	μM L ⁻¹	μM L ⁻¹	μM L ⁻¹		μM L ⁻¹	μM L ⁻¹	μM L ⁻¹	
L-SPC-AC	6	539	10	2	7	230	10	1
	6	721	17	2	7	297	13	2
	6	153	25	2	7	192	2	1
	7	31	30	5	7	190	1	6
	7	14	12	1	6	188	4	1
		23	31	2	6	213	1	2
L-SPC-AM	5	154	23	2	7	130	2	1
	5	413	8	2	7	216	0	1
	6	97	14	1	7	113	16	1
	6			3	7	157	2	5
	6	39	15	1	6	151	4	1
	nd	nd	nd	nd	6	197	4	2
L-SPD-AC	7	147	28	2	7	170	5	2
	7	76	41	1	7	243	7	1
	7	130	19	2	7	138	13	1
	7	54	58	4	7	189	29	5
	7	47	40	1	6	193	12	1
		78	71	2	7	245	14	2
L-SPD-AM	6	58	9	2	7	136	1	1
	6	189	26	2	7	203	3	1
	6	67	8	2	7	148	1	1
	7	14	17	4	7	137	3	4
	6	10	15	1	6	115	1	1
	nd	nd	nd	nd	6	185	2	2
P	6	139	6	2	7	59	3	2
	7	76	14	1	7	106	11	1
	7	38	6	1	7	66	2	1
	7	42	2	3	7	77	6	3
	7	18	nd	1	6	78	2	1
		27	4	2	7	92	19	2
LP-ILP-AC	7	203	22	2	7	145	0	2
	7	447	78	2	7	216	0	1
	7	207	32	7	7	126	1	2
	7	15	20	2	7	156	1	2
	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	nd	nd	nd	nd	6,64	nd	2,85	nd
PL-ILP-AC	7	21	17	1	7	212	5	1
	7	11	22	1	7	204	3	1
	7	9	11	1	7	253	9	1
	7	29	7	5	7	134	2	2
	6	11	7	1	6	148	1	2
	6	30	15	2	6	199	6	2

Tabela 4. Concentrações de íons cloreto, sulfato e fosfato em solução de solo, de amostras coletadas na profundidade 20 e 150 cm, em seis datas, no ano 2005/2006, em solos sob sete sistemas de cultivo (nd – não determinado por falta de solução do solo).

Tratamento	20 cm				150 cm			
	pH	2005/2006			pH	2005/2006		
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻
	μM L ⁻¹	μM L ⁻¹	μM L ⁻¹		μM L ⁻¹	μM L ⁻¹	μM L ⁻¹	
L-SPC-AC	5	97	0	0	5	271	0	0
	6	47	0	0	5	225	0	0
	5	427	0	0	5	117	0	0
	5	226	0	0	6	261	0	0
	5	237	0	0	5	305	0	0
	5	97	0	0	5	298	0	0
L-SPC-AM	6	34	0	0	5	145	0	0
	5	46	0	0	5	129	0	0
	5	48	0	0	5	215	0	0
	5	74	0	0	5	202	0	0
	5	72	0	0	6	199	0	0
	5	24	0	0	5	165	0	0
L-SPD-AC	6	293	0	0	6	218	0	0
	5	330	0	0	6	204	0	0
	6	913	0	0	6	187	0	0
	6	699	0	0	6	202	0	0
	6	192	0	0	5	263	0	0
	7	20	0	0	6	198	0	0
L-SPD-AM	5	351	0	0	6	102	0	0
	5	15	0	0	6	109	0	0
	6	33	0	0	6	167	0	0
	5	25	0	0	5	149	0	0
	5	33	0	0	5	186	0	0
	5	24	0	0	6	155	0	0
P	7	175	0	0		86	0	0
	7	131	0	0	6	124	0	0
	7	286	0	0		133	0	0
	7	73	0	0	6	123	nd	nd
	7	75	0	0	6	143	0	0
	7	47	0	0	6	151	0	0
LP-ILP-AC	6	526	0	0	6	181	0	0
	5	194	0	0	6	128	0	0
	6	714	0	0	7	185	0	0
	6	201	0	0	6	190	0	0
	7	215	0	0	6	213	0	0
	7	48	0	0	6	251	0	0
PL-ILP-AC	7	72	0	0	nd	nd	nd	nd
	6	47	0	0	nd	nd	nd	nd
	7	62	0	0	nd	nd	nd	nd
	6	11	0	0	nd	nd	nd	nd
	6	12	0	0	nd	nd	nd	nd
	6	6	0	0	6	196	0	0

CONCLUSÕES

1. Em termos gerais, a concentração de ânions no perfil do solo, considerando as profundidades de 20 e 150 cm, apresentou a seguinte ordem de grandeza: $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$.
2. A concentração de cátions no perfil do solo, considerando as profundidades de 20 e 150 cm, apresentou a seguinte ordem de grandeza: $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$.
3. A concentração dos ânions e cátions no perfil do solo teve um padrão similar, contudo é quantitativamente superior para o íon nitrato.
4. Em termos comparativos entre os sistemas de cultivo, a concentração dos íons na solução do solo, nas duas profundidades, mostrou a seguinte seqüência: lavoura sob preparo convencional > lavoura sob plantio direto > integração lavoura-pecuária > pastagem contínua.
5. As concentrações dos íons na solução de solo, na profundidade de 150 cm, sob pastagem contínua e integração lavoura-pecuária foram baixos, minimizando os riscos de lixiviação.
6. Em termos de potencial de perdas por lixiviação, a maior preocupação se refere ao íon nitrato, principalmente no solo sob lavoura contínua e preparo convencional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYARZA, M.A.; VILELA, L. PIZARRO, E.A.; COSTA, P.H. Sistemas agropastoriles baseados en leguminosas de usos múltiplos. P 175-194. in GUIMARÃES, E.P.; SANZ, J.I.; RAO, I.M.; AMEZQUITA, M.C.; AMEZQUITA, E. (eds.) **Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina**. 1st ed. Centro Internacional de Agricultura Tropical & Empresa de Pesquisa Agropecuária, Brasília, DF. 1999.

BAYER, C; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p. 105-112, 1997.

GROSSMAN, J. & UDLUFT, P. The extraction of soil water by the suction-cup method: a review. *Jornal of Soil Science*. V.42, p. 83–93, 1991.

LAL, R. Tillage and agriculture sustainability. **Soil and Tillage Research**, London, v. 20, p.257-283, 1991.

MIRANDA, J.; COSTA, L.M. da; RUIZH. A.; EINLOFT, R. Composição química da solução de solo sob diferentes coberturas vegetais e análise de carbono orgânico solúvel de deflúvio de pequenos cursos de água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V. 30, n 4, p. 633-647, 2006.

MORAES, J. F. V. Movimento de nutrientes em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, p. 95-97, 1991.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Redução da acidez do solo pelo uso de calcário e gesso e resposta da soja cultivada em plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21. Petrolina, 1994. **Anais**. Petrolina, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/EMBRAPA-CPATSA, 1994.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B. e BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, p.393-486, 2002.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; SOUSA, D. M. G. Relação entre o teor de cálcio no solo e o desenvolvimento de raízes avaliado por um método biológico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7 n.3, p. 269-75, 1983.

ROSOLEM, C. A.; GARCIA, R. A.; FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. Lixiviação de potássio no solo de acordo com suas doses aplicadas sobre palha de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v.30, n.5, p. 813-819, 2006.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.12-16, 2002.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; WONG, J. Liberação de cálcio e magnésio por cápsulas porosas de porcelana usadas na extração de solução do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 605-610, 2004.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2º ed. Brasília. Embrapa Informações tecnológicas, 2004, 416 p.

SPAIN, J.M.; AYARZA, M.A.; VILELA, L. Crop pasture rotations in the Brazilian Cerrado. P. 39-45. In PEREIRA, R.C.; NASSER, L.C. (ed.) **Anais do 8º Simpósio sobre o Cerrado**. 1st International Symposium on Tropical Savannas. 1st ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – CPAC, Brasília, DF. 1996.

CAPÍTULO II

SIMULAÇÃO DO FLUXO VERTICAL DE ÍONS EM LATOSSOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

SIMULAÇÃO DO FLUXO VERTICAL DE ÍONS EM LATOSSOLO SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

RESUMO

O objetivo do trabalho foi simular o fluxo vertical de água no solo, utilizando um modelo de simulação de fluxos e associar estes dados com os de concentrações de íons na solução do solo, na profundidade de 150 cm e, assim, estimar o potencial de perdas por lixiviação dos seguintes íons: NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , em áreas submetidas aos seguintes sistemas de cultivo: lavoura contínua, pastagem contínua e integração lavoura-pecuária. O experimento foi iniciado em 1991, mas a coleta de amostras da solução do solo foi realizada em 2005 e 2006. Para tanto, cápsulas porosas foram instaladas na profundidade de 150 cm e as soluções foram extraídas em seis datas, para cada ano. Foram determinadas, em laboratório, as concentrações dos seguintes íons nas soluções coletadas: NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} , e Ca^{2+} . Para estimar o fluxo dos íons no perfil do solo foi adotado o Sistema de Análise Regional de Risco Agroclimático (SARRA-Br). Em termos médios, considerando os sete tratamentos avaliados, o fluxo vertical de íons no perfil do solo, apresentou concentrações na seguinte ordem de grandeza: $\text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Em termos comparativos entre os sistemas de cultivo, o potencial de perdas por lixiviação destes íons na solução do solo, mostrou a seguinte seqüência: lavoura contínua sob preparo convencional $>$ lavoura contínua sob plantio direto $>$ integração lavoura-pecuária $>$ pastagem contínua.

Palavra chave: solução do solo, lixiviação, sistemas de cultivo, pastagem.

VERTICAL FLUX OF SOIL SOLUTION IONS IN PLOTS UNDER CROP-PASTURE ROTATIONS

ABSTRACT

The objective of this study was to simulate the water flux and evaluate the concentration of the at the ion soil solution depth of 150 cm, in experimental plots under the following systems: continuous crop, continuous pasture and crop-pasture rotations. The experiment was started in 1991, but the soil solution was collected during the years of 2005 and 2006. ceramic caps were installed at 150 cm depth and samples of soil solution were extracted in six dates for each year. The concentration of the following ions was measured: NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} . In order to estimate the vertical flux of ions in the soil profile it was adopted the SARRA-Br Model (System of Regional Analysis of Agroclimatic Risks). In general terms, the pattern of ions movement was: $\text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. When cropping systems were compared, the general pattern of potential ion leaching losses was: continuous cropping > crop-pasture rotations > continuous pasture.

Key words: soil solution, leaching, crop rotation, pasture.

INTRODUÇÃO

O fluxo da água do solo para a planta e desta para a atmosfera depende da disponibilidade hídrica do solo e da condução da água pelos diferentes órgãos da planta até as folhas, onde ocorre a regulação do fluxo transpiratório. De acordo com Matzenauer & Sutili (1983), o consumo de água pela cultura depende das condições meteorológicas que determinam demanda evaporativa da atmosfera, da tensão da água no solo, do solo e das características das plantas, tais como área foliar, sistema radicular e altura da planta.

O excesso de água em relação ao consumo da planta vai drenar para as camadas profundas. Este fluxo vertical de água no solo vai promover a movimentação de íons, podendo causar a lixiviação dos íons e resultar na saída de nutrientes da zona radicular para as camadas mais profundas do perfil do solo e, assim, torná-los indisponíveis às culturas, e conseqüentemente, reduzir a produtividade por limitação nutricional. Assim, a lixiviação de íons provenientes do solo ou de corretivos e fertilizantes deve ser uma constante preocupação (Libardi, 2000; Santos et al., 2002).

Os vários sistemas de cultivos interferem diretamente nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Em função das características da camada superficial do solo, da porosidade e da capacidade das plantas em utilizar a água e nutrientes, as perdas de nutrientes podem ocorrer associadas ao transporte pelo fluxo ou adsorvidas ao sedimento carregado pela enxurrada. Os sistemas conservacionistas do solo como o plantio direto e o cultivo mínimo, podem reduzir as perdas por erosão, em comparação ao sistema convencional (Walton et al., 2000).

O monitoramento da dinâmica dos íons é um processo complexo e necessita de informações relativas à concentração dos íons na solução do solo e a evolução da drenagem da água no perfil do solo. A determinação da concentração dos íons na solução do solo é geralmente feita com o emprego de metodologias para coletar a solução do solo, tais como os lisímetros, extração no solo com cerâmicas porosas e a extração de amostras de solo por centrifugação (Silva et al., 2004). O monitoramento no campo da drenagem necessita de um conjunto de metodologias para determinar a umidade do solo (TDR, sonda de nêutrons) e sucção do solo (tensiômetros), sendo processos que requerem maior dedicação, o que dificulta o trabalho.

Uma alternativa bastante utilizada para estimar a drenagem é o emprego de modelos de simulação. São vários os modelos disponíveis para drenagem (Brisson et al., 2003; Vancloster et al., 1994), porém poucos são simples de usar e necessitam de um pequeno conjunto de dados. Em várias regiões brasileiras, são restritas as informações disponíveis, inviabilizando o emprego de modelos de simulação mais complexos, porém mais precisos como o modelo STICS (Brisson et al., 2003). Estes modelos têm sido amplamente utilizados, podendo-se citar os trabalhos de zoneamento agroclimático das principais culturas de grãos no Brasil (soja, milho e arroz) desenvolvidos recentemente (Farias et al., 2001; Sans et al., 2001; Silva & Assad, 2001).

O modelo SARRA proposto por Forest & Clopes (1994) para a cultura do milho no Senegal foi introduzido no Brasil pelo CIRAD para desenvolver, junto com a Embrapa Cerrados o modelo SARRA-Br (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático-Brasil). Ele é composto de um módulo de balanço hídrico relacionado à produção por uma função empírica. O modelo SARRA foi calibrado na Região do Cerrado em estudo da evolução dos riscos agroclimáticos num latossolo sob pastagem, visando analisar a variação do estoque de água disponível do solo num período de 10 a 25 anos (Brunet & Silva, 2003).

O objetivo do trabalho foi simular o fluxo de água no solo, mediante adoção do modelo SARRA e associar estes dados com os de concentrações de íons na solução do solo (à profundidade de 150 cm) e, assim, estimar o potencial de perdas por lixiviação dos seguintes íons: NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , em áreas submetidas aos seguintes sistemas de cultivo: lavoura contínua, pastagem contínua e integração lavoura-pecuária. Complementarmente, o movimento de íons foi avaliado em solo sob lavoura contínua, com preparo convencional e plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental

O trabalho foi conduzido durante os anos agrícolas de 2004/2005 e 2005/2006, na área experimental da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina-DF, a 1.200m acima do nível do mar, segundo as coordenadas 15° 35' de latitude Sul e 47° 42'30" de longitude Oeste.

Caracterização climática

Do ponto de vista climático, segundo a classificação de Koppen, a área está inserida no domínio morfoclimático do Cerrado, com clima tropical estacional (Aw). Apresenta duas estações bem definidas, sendo com verão quente e úmido e precipitação média anual entre 1.400 mm e 1.600 mm bem distribuída entre os meses de outubro a abril, e outra com inverno de temperaturas amenas e pouca pluviosidade, ocorrendo entre os meses de maio a setembro, acarretando uma elevada evapotranspiração e uma deficiência hídrica considerável nos solos.

As médias das temperaturas máxima e mínima são de 26,4 °C e 15,9 °C, respectivamente.

Solos

O solo das parcelas experimentais foi classificado como um Latossolo Vermelho (LV) argiloso (Souza, 2004). As características químicas e físicas são apresentadas no anexo 2 e 3.

Descrição do experimento e das parcelas experimentais

O experimento teve início em 1991, quando uma área de cerrado virgem foi desmatada para estabelecer os tratamentos de pastagens e culturas produtoras de grãos, (Tabela 5), onde dentro dos tratamentos tinha-se sistema de preparo convencional (SPC), sistema plantio direto (SPD), pastagem contínua (P) e sistema de integração lavoura-pecuária (ILP).

Após 1991, no sistema ILP a alternância entre pastagem e lavoura ocorreu a cada quatro anos (Tabela 5). As pastagens contínuas foram renovadas pela substituição do capim *Andropogon* pela *Brachiaria decumbens* em novembro de 1999. Na rotação lavoura pasto no sistema ILP, o capim *Andropogon* foi substituído pelo *Panicum maximum* cv. Tanzânia..

As pastagens contínuas foram renovadas pela substituição do capim andropogon pela *Brachiaria decumbens* em novembro de 1999. Na rotação lavoura pasto no sistema ILP, o capim andropogon foi substituído pelo *Panicum maximum* cv. Tanzânia.

Tabela 5. Representação esquemática das seqüências planejadas para o experimento, incluindo o sistema integração lavoura/pastagem.

Anos				
1991/92	1994/1995	1999/00	2004/08	
Pastagem contínua				P
Lavoura contínua				L
Pastagem	Lavoura	Pastagem	Lavoura	ILP
Lavoura	Pastagem	Lavoura	Pastagem	ILP

Duas adubações foram consideradas (Tabela 6), adubação de correção (AC) e adubação de manutenção (AM), sendo que a adubação de manutenção foi calculada baseada no rendimento de grãos e a adubação de correção foi calculada baseada em P disponível no solo. A adubação com micronutrientes ocorreu somente até o ano de 1998, em todos os tratamentos, conforme Anexo 1.

No ano agrícola 2004/2005, onde a cultura era soja, semeada dia 22/12/04, o experimento foi adubado no plantio com 250 kg/ha da formulação 2-20-18, sendo que os tratamentos com fertilidade AC receberam mais 250 kg/ha da formulação 2-20-18, em cobertura.

No segundo ano, no ano agrícola 2005/2006, onde a cultura era sorgo, semeada 25/01/06, os tratamentos com adubação AM foram adubados no plantio com 175 kg/ha de 02-20-20 e os tratamentos com fertilidade AC foram adubados no plantio com 350 kg/ha da formulação 02-20-20, sendo 180 no sulco + 170 a lanço. Uma adubação nitrogenada complementar foi aplicada em cobertura na forma de uréia, com 30 kg/ha de N para os tratamentos com fertilidade AM e 60 kg/ha de N para os tratamentos com fertilidade AC (Anexo 1).

No ano agrícola 2005/2006 foi também feita adubação com 200 kg N /ha 42 kg P₂O₅ /ha e 100 kg K₂O /ha na pastagem contínua (P) e na integração (ILP) nos tratamentos com adubação AC, na intenção de forçar um fluxo destes elementos para as camadas mais profundas (Anexo 1).

Para o presente trabalho, foram selecionados sete tratamentos, de acordo com o tipo de sistema seguido pelo tipo de preparo (P, SPC, SPD e LPD) e o nível de fertilidade (AM e AC), como discriminado na tabela 7.

Tabela 6. Caracterização dos sistemas de cultivo selecionados e avaliados

Sistema	Tipo de cultivo	Nível de fertilidade	Sigla
1-Lavoura contínua	Preparo convencional	Correção	L-SPC-AC
		Manutenção	L-SPC-AM
	Plantio direto	Correção	L-SPD-AC
		Manutenção	L-SPD-AM
2-Pastagem contínua	-----	Correção	P
3-Rotação Lavoura/ Pastagem	Plantio direto	Correção	LP-ILP-AC
4-Rotação Pastagem/ Lavoura	Plantio direto	Correção	PL-ILP-AC

Em síntese, os tratamentos comparados foram:

- L-SPC-AC - Lavoura contínua com preparo convencional e adubação corretiva gradual;
- L-SPC-AM - Lavoura contínua com preparo convencional e adubação de manutenção;
- L-SPD-AC - Lavoura contínua com plantio direto sob vegetação espontânea e adubação corretiva gradual;
- L-SPD-AM - Lavoura contínua com plantio direto sob vegetação espontânea e adubação de manutenção;
- P-Pastagem contínua;
- LP-ILP-AC - Sistema de rotação lavoura pecuária, antes se encontrava em pastagem (Tanzânia) se encontrando atualmente em fase de cultivo, no primeiro ano soja e no segundo ano de cultivo sorgo com plantio direto e adubação corretiva gradual;
- PL-ILP-AC - Sistema de rotação lavoura pecuária se encontrando atualmente em fase de pastagem, com plantio direto e adubação corretiva gradual.

Descrição das variáveis de entrada e saída do modelo SARRA

O SARRA (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático) descrito em detalhes por Franquim & Forest (1977), é um modelo clássico de balanço hídrico de reservatórios com o passo de cálculo diário, que estima a drenagem em função das disponibilidades hídricas da região e do consumo de água pela planta (CIRAD, 1995).

A funcionalidade do modelo comprovada no Brasil por Brunet & Silva, 2003, para pastagens e por Farias et al. (2001); Sans et al. (2001) e Silva & Assad (2001), para as principais culturas de grãos.

Ele se apresenta como um modelo simples com as seguintes características: robustez, pouca exigência por dados de entrada, características e construção modular com fácil adaptação a diversos tipos de culturas. É composto por três módulos integrados entre si, quais sejam:

- SARRAMET descrito por Baron & Clopes (1996): Análise de dados climáticos (gerenciador de banco de dados meteorológicos);
- SARRABIL: Análise do balanço hídrico das culturas (para estimativa do balanço hídrico da cultura).
- SARRAZON: Análise do balanço hídrico a partir da cadeia agroclimática (para trabalhos de regionalização e zoneamento).

Neste trabalho fez-se uso do SARRAMET para análise de dados climáticos e do SARRABIL para simular o balanço hídrico das culturas com o passo de cálculo diário, a partir de um conjunto de parâmetros utilizados para descrever o solo, a cultura e o clima (Figura 5). O balanço hídrico foi calculado segundo Equação de fluxos de massa.

$$P + Irr = ETR + Dr + Esc + Ru, \quad (1)$$

onde:

P = chuva, mm;

Irr = Irrigação, mm;

ETR = Evapotranspiração real da cultura, mm;

Dr = drenagem (fluxo fertical), mm;

R = Escoamento superficial, mm;

Ru = Variação da água armazenada no perfil de solo explorado pelas raízes, mm.

As principais variáveis de entrada para o modelo SARRA são: precipitação pluviométrica diária (Pr), a evapotranspiração potencial (Etp), o escoamento superficial (Ru), a duração do ciclo fenológico das culturas (DAE), profundidade de raiz (Z), (Kc)

e a reserva útil (Ru) do solo em função do sistema radicular (CIRAD, 1995), conforme Figura 5.

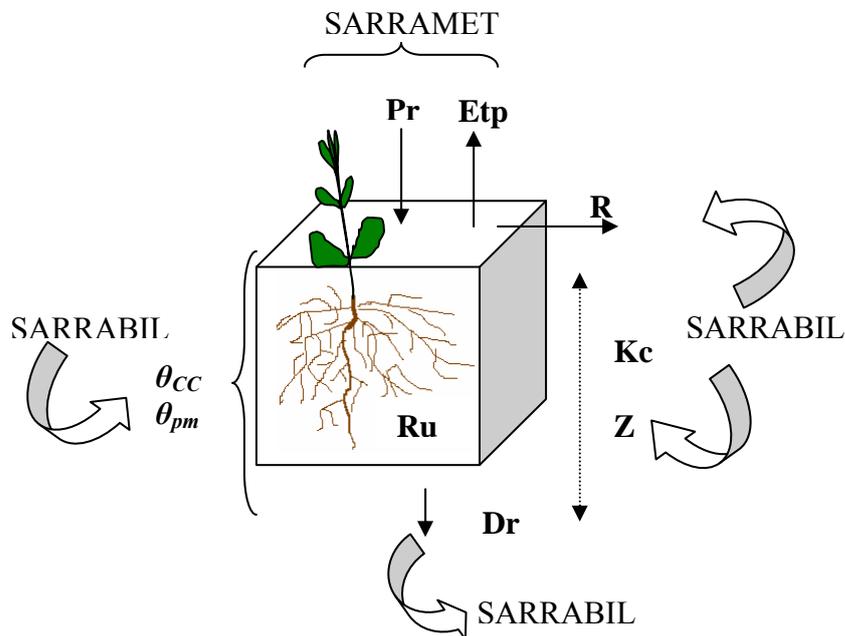


Figura 5. Processos de entrada e saída de água em um volume do solo (sistema solo-planta-atmosfera) durante um intervalo de tempo (Δt) para modelagem dos dados no (SARRA). Onde, precipitação (Pr), evapotranspiração (Etp), escoamento superficial (R), reserva útil de água (Ru), comprimento de raiz (Z), (Kc) e drenagem (Dr).

A demanda potencial da cultura (EPC) por água é dada pela Equação 2, enquanto a transpiração real pela Equação 3:

$$EPC = Kc \times ETP, \quad (2)$$

onde:

Kc = Coeficiente de cultivo;

ETP = Evapotranspiração potencial, mm.

$$ETR = EPC \times f(\text{EAGLEMAN}); \quad (3)$$

$$\text{EAGLEMAN} = a + b.Arm + c.Arm^2 + d.Arm^3, \quad (4)$$

$$a = -0,05 + 0,732/ETP;$$

$$b = 4,97 - 0,66ETP;$$

$$c = 8,57 + 1,56ET;$$

$$d = 4,35 - 0,88ETP.$$

A reserva útil de água (Ru) é função do tipo de solo. Ela é calculada a partir da diferença entre a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) e do ponto de murcha permanente (θ_{pm}).

Para simular o escoamento superficial usou-se a relação empírica determinada por Silva (2004) que estima o escoamento superficial (R, mm) nos sistemas de cultivo convencional e plantio direto, em função da quantidade de água precipitada (P, mm) como mostra a equação 9,

$$R = \alpha (P - P_{lim}) \quad (5)$$

onde, P_{lim} e α são os parâmetros empíricos do ajuste que significam, respectivamente, o valor limite da precipitação abaixo do qual não acontece escoamento superficial e a proporção de água escoada quando esse limite é ultrapassado, Tabela 7.

Tabela 7. Valores de chuva limite (L,mm) e escoamento superficial (R, %) para os sistemas de plantio convencional (SPC) e plantio direto (SPD) (Silva, 2004)

Tratamento	Coeficientes		Modelo
	α	P_{lim}	$R = \alpha (P - P_{lim})$
Plantio convencional	0,40	10	$R = 0.40 (P - 10)$
Plantio direto	0,20	20	$R = 0.20 (P - 20)$

Aquisição dos dados necessários para o modelo

Dados climáticos

Os dados climáticos foram medidos numa estação meteorológica Campbell, gerenciada pela Embrapa Cerrados e localizada a uma distância de aproximadamente 500 m das parcelas experimentais. Esses dados incluíram precipitação diária (mm), radiação solar ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), velocidade média diária do vento (m.s^{-1}), temperatura do ar máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%). A evapotranspiração potencial (mm dia^{-1}) foi estimada pelo método de PENMAN (1948).

Caracterização hidrodinâmica

O estudo das características hidrodinâmicas dos solos das parcelas restringiu-se, basicamente, na obtenção dos teores de umidade do solo θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na capacidade de campo (CC), correspondente à tensão de 0,1 atm, e no ponto de murcha permanente (PMP) para a tensão de 15,0 atm que serviu para o cálculo da capacidade de armazenamento de água do solo pela seguinte fórmula:

$$Ru \text{ (mm/m)} = \sum [(\theta_{cc} - \theta_{pm})] * Z \text{ (mm)} \quad (6)$$

onde: θ_{cc} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) capacidade de campo; θ_{pm} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ponto de murcha permanente e Z a espessura da camada de solo (150 cm).

θ_{cc} e θ_{pm} foram determinados a partir das curvas de retenção de água de solo. Em dezembro de 2004, foram coletados no ponto central da parcela em cada tratamento, três anéis volumétricos de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro no ponto médio das profundidades de 0-10, 10-20, 20-40, 40-70 cm, 70-140 cm e 140-150 cm em trincheiras de 2,0 x 1,5 x 1,0 m.

As três amostras indeformadas foram colocadas na bandeja de saturação durante pelo menos 24 horas. Após equilíbrio nos potenciais 0; 1; 3; 6; 10; 33; 84; 406; 1027; 1515 kPa, utilizando o método da centrifuga (Silva & Azevedo, 2002), foram determinados os respectivos conteúdos gravimétricos de água.

As curvas de retenção de água do solo (CRA), foram ajustados nos dados obtidos da centrifugação, utilizando-se o modelo de Van Genuchten (1980), adotando a restrição para $m=1-1/n$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \Psi)^n]^{1-1/n} \quad (7)$$

onde: θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) é o conteúdo de água volumétrico; θ_r e θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) são os conteúdos de água residual e saturado, respectivamente; Ψ (MPa) é a tensão de água no solo (módulo do potencial mátrico); α e n são parâmetros empíricos de ajuste do modelo. θ_{cc} e θ_{pm} foram calculados de acordo com o modelo ajustado para as sucções, 10 e 1500 kPa, respectivamente. Os valores de Arm para cada cultura são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores da capacidade de armazenamento de água dos solos das parcelas experimentais.

Parcelas	Ru mm	Profundidade (cm)
L-SPC-AC	103	150
L-SPC-AM	103	150
L-SPD-AC	109	150
L-SPD-AM	109	150
P	122	150
LP-ILP-AC	125	150
PL-ILP-AC	112	150

Cultura

Coeficientes culturais (Kc)

Os dados descendiais de Kc obtidos de acordo com os dados de (Macena, comunicação pessoal) e (Brunet, 2003) são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9. Coeficientes culturais de pastagem (*Brachiaria*), soja e sorgo (Fonte: Silva, comunicação pessoal).

Tratamento	Kc descendais																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,15	1,15	1,15	
Pastagem	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
Soja	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,15	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5						
Sorgo	0,15	0,15	0,2	0,4	0,7	0,9	0,95	1	1	0,95	0,7	0,35							

Profundidade radicular efetiva (Z, mm).

Foi adotada a profundidade de 150 cm para todas as culturas, por ter sido a profundidade em que foram coletadas as soluções do solo. Embora para a cultura da soja a profundidade efetiva seja de 50 cm, segundo Arruda (1989), citado por Sousa (2003).

Duração do ciclo fenológico.

Utilizou-se os ciclos fenológicos (duração do ciclo fenológico), que corresponde aos estádios vegetativos de cada cultura. As durações do ciclo de cada cultura são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10. Duração do ciclo fenológico para as culturas.

Cultura	Duração
L - (soja)	125 dias
L - (sorgo)	120 dias
P e PL (pastagem)	135 dias

Estimativa do fluxo vertical de íons (drenagem X concentração)

Durante os anos agrícolas 2004/05 e 2005/06, foram feitas análises químicas em amostras de soluções de solo, para determinar as concentrações dos íons na solução. As análises foram realizadas em laboratório e os resultados apresentados no capítulo I.

O cálculo para estimar a lixiviação de íons foi feito pelo produto da drenagem simulada pelo modelo SARRA, pelas concentrações dos íons na solução do solo a 150 cm.

$$\text{Lix } (\mu\text{M m}^{-2}) = \text{Dr (mm ou L m}^{-2}) \times \text{Con } (\mu\text{M L}^{-1}) \quad (8)$$

Onde; Lix é a lixiviação dos íons em $\mu\text{M m}^{-2}$; Dr, é drenagem em mm ou L m^{-2} e Con é a concentração dos íons em $\mu\text{M L}^{-1}$.

Para calcular as quantidades dos íons lixiviados em kg/ha:

$$\text{Lix (kg ha}^{-1}) = \text{Lix } (\mu\text{M m}^{-2}) * \text{PM(g)} * 100 \quad (9)$$

Onde PM é o peso molecular do íon considerado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa da drenagem

Drenagem pode ser definida como sendo a remoção do excesso de água do solo por percolação, representando o movimento descendente de água através do perfil do solo. Esse movimento pós-infiltração é denominado drenagem interna ou redistribuição

e se caracteriza em aumentar a umidade de camadas mais profundas pela água contida nas camadas superficiais inicialmente umedecidas (Jury et al., 1991). Quando a drenagem ultrapassa a profundidade das raízes, pode-se considerar que a água é perdida para as culturas.

Na figura 6 são apresentados valores das precipitações pluviométricas da estação chuvosa de 2004-2005 e da drenagem acumulada durante o período de simulação, para três tratamentos contrastantes: P, PL-ILP-AC e L-SPD-AC (Figura 6).

Analisando-se a Figura 6, observa-se que a maior drenagem aconteceu no sistema de lavoura contínua (L-SPD-AC), com 605 mm acumulados durante o período de experimento. Isto se deve ao fato de que neste tratamento existe cobertura vegetal permanente, que favorece a infiltração da água da chuva e minimiza o escoamento superficial. Isso está de acordo com Muzilli (1996), que afirmou que este sistema favorece a maior agregação de partículas, a melhoria da porosidade, beneficiando a aeração, a infiltração e o armazenamento da água no solo.

Os resultados mostraram também que a drenagem é mais elevada no início da estação chuvosa (dezembro-fevereiro), pois, com o início do ciclo da cultura da soja. Neste período o K_c da planta é bastante baixo (0,4-0,6) e a evapotranspiração da cultura limitada ou seja a demanda de água pela planta é bastante baixa.

Nos sistemas de integração lavoura-pecuária (PL-ILP-AC) e pastagem contínua (P) as drenagens acumuladas foram respectivamente de 398 e 383 mm, nestes tratamentos há uma planta consumindo água durante todo o ano, enquanto que nos sistemas L-SPD e L-SPC no período da entressafra não há uma cultura no solo e isto influencia na quantidade de água drenada.

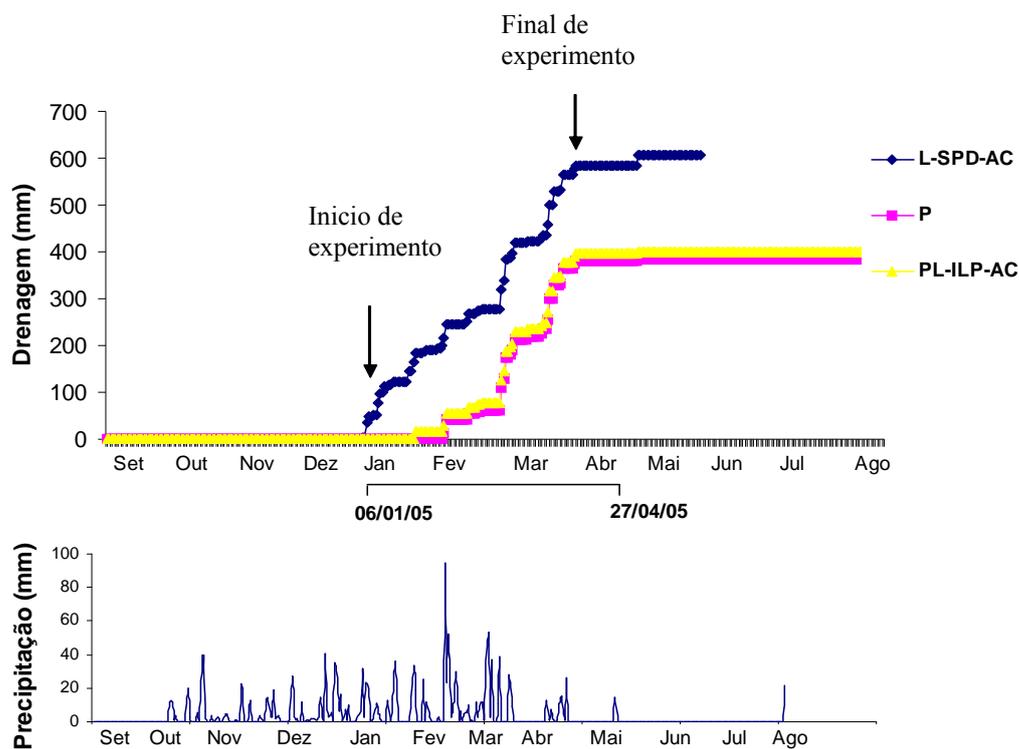


Figura 6. Drenagem cumulativa nos sistemas de cultivo lavoura contínua (L-SPD-AC), pastagem contínua (P) e integração lavoura-pecuária (PL-ILP-AC), no período de 2004/2005.

Na tabela 12 tem-se a drenagem total nos períodos de 2004/2005 e 2005/2006, nos sistemas de cultivo lavoura contínua (L-SPC-AC), (L-SPC-AM), (L-SPDC-AC), (L-SPD-AM), pastagem contínua (P) e integração lavoura-pecuária (PL-ILP-AC), (LP-ILP-AC).

Tabela 12. Drenagem total nos períodos do estudo no ano agrícola 2004/2005 e 2005/2006, nos sistemas de cultivo lavoura contínua (L-SPC-AC), (L-SPC-AM), (L-SPDC-AC), (L-SPD-AM), pastagem contínua (P) e integração lavoura/pecuária (PL-ILP-AC), (LP-ILP-AC).

L-SPC-A C	L-SPC-A M	L-SPD-AC	L-SPD-A M	P	LP-ILP-A C	PL-ILP-A C
Drenagem (mm) 2004/2005						
344	344	470	470	381	470	396
L-SPC-A C	L-SPC-A M	L-SPD-AC	L-SPD-A M	P	LP-ILP-A C	PL-ILP-A C
Drenagem (mm) 2005/2006						
117	117	155	155	53	155	55

No primeiro período de estudo, pode-se observar uma drenagem acumulada superior aos demais tratamentos no sistema de lavoura contínua L-SPD-AC, L-SPD-

AM e integração lavoura-pecuária LP-ILP-AC (470 mm) Tabela 12. Segundo Roth & Vieira, (1983), isso se deve ao efeito da cobertura morta aliada à estabilidade estrutural, o que irá elevar a infiltração de água no solo.

No segundo período estudado, foi observada maior drenagem nos sistemas de lavoura contínua L-SPD-AC, L-SPD-AM e integração lavoura-pecuária PL-ILP-AC (155 mm), sendo que as menores foram observadas nos sistemas pastagem contínua (P) e integração lavoura-pecuária LP-ILP-AC (53 e 55 mm) Tabela 13. A baixa drenagem se deve ao fato de que estes sistemas mantêm plantas em estágio vegetativo durante todo o ano.

Durante todo período avaliado, as maiores drenagens foram observadas no ano agrícola 2004/2005, o que pode estar relacionado a duas variáveis, precipitação e Kc das culturas, sendo que no primeiro período a precipitação foi maior (1.421 mm acumulados) e no segundo período foi menor (1.209 mm acumulados). Já o Kc para o segundo ano de estudo foi maior exceto para os tratamentos PL-ILP-AC e P onde o Kc foi o mesmo para os dois anos.

Sensibilidade do modelo quanto aos parâmetros de entrada

Quando é feita uma estimativa de drenagem de água através de modelos, alguns parâmetros, como a reserva útil de água no solo (CAD), oriundos de determinações laboratoriais e outros, como profundidade da raiz, índice de área foliar e Kc, que podem ser encontrados em bibliografias, podem estar sujeitos a variações que podem interferir nos resultados finais obtidos pelo modelo.

Variáveis como a CAD, geralmente são sujeitos a poucas variações, enquanto que o índice de área foliar, profundidade de raiz e Kc podem sofrer variações que podem afetar os resultados esperados, porque estão diretamente ligados com outros fatores de difícil controle como, umidade do solo, veranicos e tratos culturais, que irão definir o bom desempenho da planta.

Para estimar o erro que pode afetar a estimativa da drenagem pode ser feito o estudo da sensibilidade do modelo quanto à drenagem acumulada. São feitas simulações com diferentes valores dos parâmetros que servirão de entrada para o modelo, dentre

eles temos a CAD, a profundidade de raiz e o Kc, assim é possível verificar as variações da drenagem acumulada durante um dado período.

No presente trabalho foi feito estudo da sensibilidade do modelo quanto a CAD, a profundidade de raiz e o Kc. A sensibilidade do modelo nos dois primeiro parâmetros mostrou-se bastante fraca, sendo que a variação da drenagem acumulada não chegou a 10%. Para o Kc no entanto o modelo mostrou se bastante sensível (Figura 7). Trabalho desenvolvido por Duwig et al. (2003) também mostrou que, dentre outros, o parâmetro mais sensível é o Kc da cultura.

Na figura 7 são apresentados dados de sensibilidade do Kc, em três sistemas de cultivo lavoura contínua, com cultura da soja e do sorgo (L-SPC-AC) e integração lavoura pecuária cultura, com *Brachiaria brizantha* (PL-ILP-AC). No caso da soja e do sorgo, um acréscimo ou decréscimo de 50 % do Kc promove um aumento ou uma diminuição de apenas 22-35 % da drenagem. No caso da *Brachiaria* as mesmas variações do Kc induzem modificações muito mais importantes de até 52-68 %.

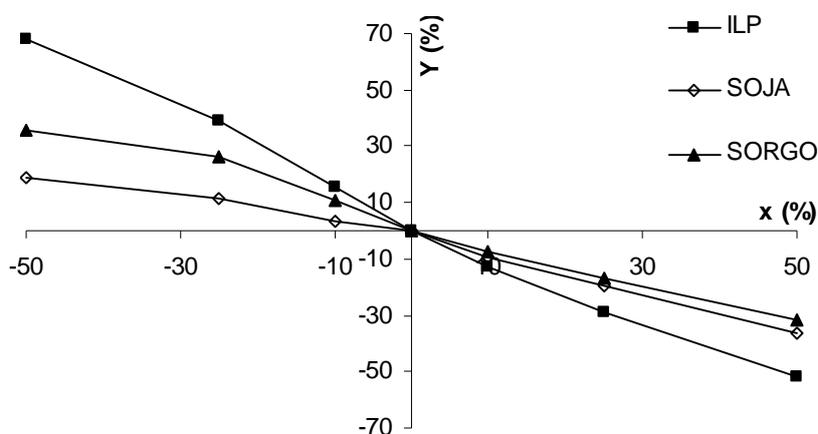


Figura 7. Análise de sensibilidade do modelo quanto ao parâmetro Kc relacionado às culturas de *Brachiaria brizantha* e soja em 2004/2005 e sorgo em 2005/2006.

Esta análise de sensibilidade mostra a dificuldade em trabalhar com modelagem utilizando dados bibliográficos, pois os dados fornecidos ao modelo estão sujeito a variações. Normalmente quando é estimado o Kc de uma cultura, a mesma se encontra em ótimas condições de desenvolvimento.

Para a simulação, este mesmo K_c pode estar sendo indicado para uma mesma cultura mas que esteja em varias condições de desenvolvimento. Para este trabalho, por falta de dados reais do K_c , os mesmos valores de K_c foram utilizados para o pasto em ótimas condições de desenvolvimento no sistema de integração lavoura-pecuária e para o pasto contínuo parcialmente degradado. Esta análise de sensibilidade mostra a relativa incerteza dos dados oriundos da modelagem.

Potencial de perdas por lixiviação

A lixiviação é descrita como sendo a remoção de íons em solução de um horizonte ou camada do solo. Considera-se que íons lixiviados não podem ser aproveitados para a nutrição mineral das plantas e, ainda, podem contaminar as águas dos lençóis subterrâneos.

Na figura 8 são apresentadas as quantidades de nitrato acumuladas, calculadas para os tratamentos (L-SPD-AC, PL-ILP-AC, P) para o ano 2004/2005 (ver Figura 6), segundo a equação 3. A lixiviação acumulativa no sistema de lavoura contínua (L-SPD-AC) alcançou valores de $28.651 \mu\text{M m}^{-2}$ enquanto que nos sistemas que incluem pastagem, os valores encontrados foram de apenas $1.141 \mu\text{M m}^{-2}$ para a integração lavoura-pecuária (PL-ILP-AC) e $2.474 \mu\text{M m}^{-2}$ para a pastagem contínua (P).

Os sistemas de rotação que incluem pastagem mantêm plantas consumindo água durante todo o período chuvoso. Já o sistema L-SPD-AC o consumo de água é somente no período de desenvolvimento da cultura anual. Estes fatos, entre outros, influem na movimentação de água e dos íons nitrato no perfil do solo, conforme registrado na figura 8.

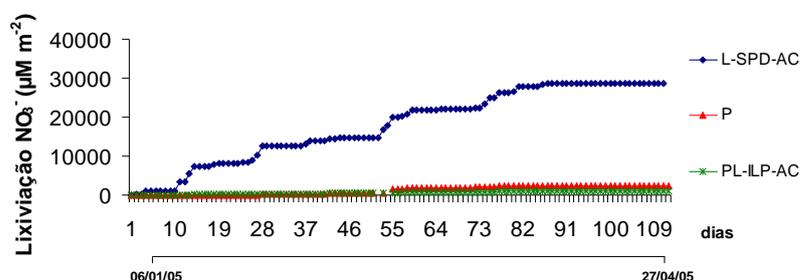


Figura 8. Lixiviação acumulativa de nitrato nos sistemas de cultivo lavoura contínua (L-SPC-AC), integração lavoura-pecuária (LP-ILP-AC) e (PL-ILP-AC) e pastagem contínua (P) no período de 2004/2005.

Isso mostra que apesar de valores de drenagem pouco variáveis (470, 381 e 396 mm) Tabela 12, a lixiviação pode alcançar níveis muito diferentes em relação as concentrações que são bastante variáveis.

As lixiviações totais dos íons nitrato, cálcio, magnésio e potássio, para cada ano e cada sistema de cultivo são apresentadas na Figura 9.

As Figuras 9A e 9C apresentando a estimativa da drenagem acumulativa ressaltam as variações bastante fracas deste parâmetro da equação 9. No entanto, são principalmente as variações das concentrações dos íons que explica as variações da lixiviação.

Observa-se um maior volume de água drenada no primeiro ano (2004/05), possivelmente em função da maior precipitação pluviométrica. Comparando a drenagem entre os tratamentos, verifica-se valor mais elevado para as áreas em que a superfície do solo estava mais protegida (plantio direto e pastagem). Nestas áreas deve ter ocorrido menor enxurrada e maior quantidade de água infiltrada, resultando em maior quantidade de água drenada.

O nitrato (NO_3^-) foi geralmente o íon encontrado em maior quantidade na solução de solo. Nas parcelas sob sistema de lavoura contínua com preparo convencional (L-SPC-AC e L-SPC-AM), a lixiviação acumulada chegou a 61 kg ha^{-1} para o primeiro ciclo, o que representa uma perda N de, aproximadamente, $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Figura 9 B). Segundo Edwards et al. (1972) alguns íons na solução do solo, são rapidamente deslocados no perfil, como o íon nitrato que é altamente solúvel em água e apresenta grande mobilidade no solo.

Nos tratamentos L-SPD-AC e L-SPD-AM, valores de 17 e 20 kg ha^{-1} , foram encontrados, respectivamente. As menores quantidades de nitrato, no entanto, foram observadas nos tratamentos P e PL-ILP-AC, com 1,5 e $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente.

As maiores perdas de NO_3^- nos sistemas de lavoura contínua com preparo convencional (Figura B e D) estão relacionadas com o revolvimento do solo e o aceleração da decomposição de restos vegetais e a menor absorção da planta na fase inicial do crescimento, devido seu sistema radicular ainda não estar desenvolvido.

Nestas condições, os elementos com menor energia de adsorção são facilmente carregados para as camadas mais profundas do solo.

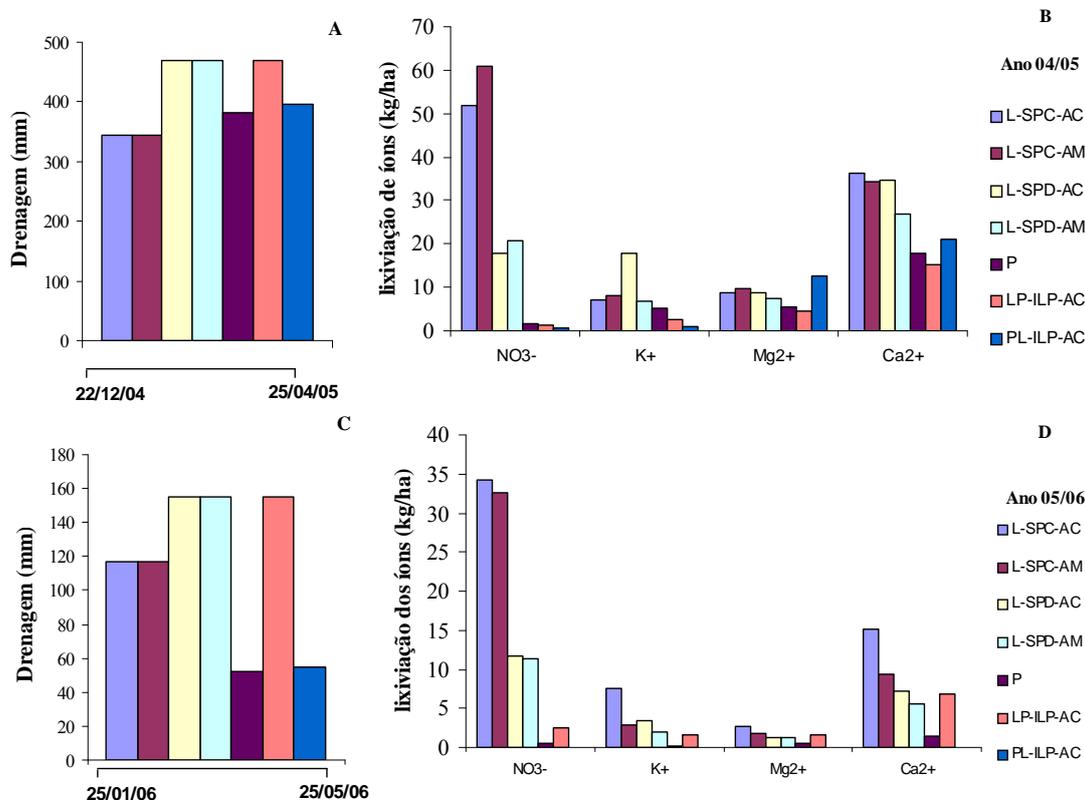


Figura 9. Estimativa da drenagem e da quantidade dos íons nitrato, potássio, magnésio e cálcio lixiviados no solo sob sete sistemas de cultivo: lavoura contínua (L-SPC-AC e AM) e (L-SPD-AC e AM), integração lavoura/pecuária (LP-ILP-AC) e (PL-ILP-AC) e pastagem contínua (P), no período de 2004/2005 e 2005/2006.

Quando comparados os dois anos de cultivos, para o segundo ano (05/06) as quantidades de nitrato foram menores, em ordem de 50%. Isso pode ser explicado devido o início das coletas de solução não terem coincidido, sendo que no segundo ano houve uma menor precipitação.

As maiores lixiviações do íon potássio foram registradas para as parcelas sob lavoura contínua, sendo que no sistema sob plantio direto (L-SPD-AC) houve um incremento na perda de 8 kg ha⁻¹, no primeiro ano (Figura 9 B). Para os demais tratamentos, as quantidades lixiviadas foram bastante similares, sendo que as menores lixiviações foram encontradas nos tratamentos LP-ILP-AC com 2 kg ha⁻¹ e PL-ILP-AC com 0,8 kg ha⁻¹ (Figura 9 B).

No segundo ano de estudo, as maiores lixiviações foram nas parcelas sob lavoura contínua, com 7 kg ha^{-1} no tratamento L-SPC-AC e 3 kg ha^{-1} no tratamento L-SPD-AC. A menor lixiviação foi observada na área sob pastagem com $0,2 \text{ kg ha}^{-1}$. Resultados obtidos por Moraes (1991) mostraram que a lixiviação do cálcio, magnésio e potássio foi intensa, tendo alcançado em alguns tratamentos a profundidade de 80 cm.

No que se refere ao íon magnésio, em geral as perdas por lixiviação foram inferiores quando comparadas com os demais íons avaliados. No tratamento PL-ILP-AC ocorreu a maior perda, com 12 kg ha^{-1} , o que não diferenciou muito dos tratamentos L-SPC-AC e AM e L-SPD-AC e AM onde as quantidades observadas foram de 8, 9, 8 e 7 kg ha^{-1} , conforme (Figura 9B) a menor perda foi observada do tratamento LP-ILP-AC 4 kg ha^{-1} .

Para o íon cálcio, as quantidades foram mais elevadas quando comparados aos demais cátions, para todos os tratamentos (Figura 9 B). Para alguns tratamentos, a quantidade de cálcio superou inclusive as de nitrato, mesmo naqueles sob pastagem e rotação lavoura-pastagem. Houve uma semelhança para este mesmo íon (Figura 9 D).

A elevada quantidade de cálcio na solução pode ser resultante da aplicação de calcário durante o decorrer do experimento (Tabela 6), especialmente para as parcelas com adubação corretiva (AC). Adicionalmente, a elevada concentração detectada na profundidade de 150 cm pode estar relacionada com a baixa adsorção dos cátions nas camadas superficiais, tendo em vista a baixa capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. Trabalho realizado por Quaggio et al. (1993), mostrou que a calagem promoveu aumentos nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em camadas profundas do solo, com reflexos no pH.

Espinoza & Reis (1984) também encontraram quantidades de cálcio superior às de potássio e magnésio em camadas profundas, registrando uma perda de cálcio da ordem $125 \text{ kg ha}^{-1}/\text{ano}$ no perfil do solo, além dos 105 cm de profundidade.

A hipótese mais provável para explicar a elevada quantidade de cálcio a 150 cm de profundidade é de que os íons de cálcio e os demais cátions (Mg e K), em excesso nas camadas superficiais, serviram de íon acompanhante na movimentação vertical dos íons de nitrato.

O fato de que se pode observar uma estreita relação entre a movimentação destes dois íons no solo, quando comparados os sete sistemas testados, evidencia tal hipótese. Mas esta hipótese não é totalmente satisfatória, pois não há um equilíbrio entre as cargas negativas do nitrato e as cargas positivas dos cátions.

Adicionalmente, outra hipótese para explicar a alta quantidade de cálcio detectado na solução do solo, a 150 cm, pode estar relacionada com a quantidade de íons bicarbonato (HCO_3^-) presente em solução. O HCO_3^- fica em equilíbrio com o CO_2 gasoso oriundo da decomposição da matéria orgânica da respiração das raízes e dos organismos do solo, de acordo com a reação abaixo e a equação 10.



A dissociação é regulada pela pressão do CO_2 (PCO_2) na atmosfera do solo equação 10 (Reuss e Johnson, 1986).

$$[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] = \text{PCO}_2 \cdot 10^{-7,81} \quad (10)$$

Com pH acima de 6, uma PCO_2 entre 0,002 e 0,1 atmosfera justificaria o balanço de cargas a 150 cm. Estes valores de PCO_2 são coerentes com dados da literatura (Buyanovsky & Wagner, 1983). O bicarbonato que não se move no solo ou move lentamente serviria para compensar as cargas de outros ânions possivelmente absorvidos pela planta durante a transferência até 150 cm.

Numa comparação geral entre tratamentos avaliados e íons medidos na solução do solo observa-se que a movimentação de íons em profundidade foi menor para aqueles sistemas sob pastagem e rotação lavoura-pastagem (P, LP-ILP-AC, PL-ILP-AC). Tais sistemas de cultivo mostraram serem mais eficientes na retenção de íons no perfil de solo e no aproveitamento dos nutrientes na solução de solo, em função de vários fatores, podendo-se destacar: a existência de plantas vivas durante todo o ano e a capacidade de manter o solo com mais alta qualidade, principalmente em termos de matéria orgânica e atividade biológica.

CONCLUSÕES

1. Em termos médios, considerando os sete tratamentos avaliados, o fluxo vertical de íons no perfil do solo, apresentou concentrações na seguinte ordem de grandeza: $\text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.
2. Em termos comparativos entre os sistemas de cultivo, o potencial de perdas por lixiviação destes íons na solução do solo, mostrou a seguinte seqüência: lavoura contínua sob preparo convencional > lavoura contínua sob plantio direto > integração lavoura-pecuária > pastagem contínua.
3. Em termos de potencial de perdas por lixiviação, a maior preocupação se refere ao íon nitrato, principalmente no solo sob lavoura contínua com preparo convencional.
4. A quantidade de água percolada no solo, até 150 cm de profundidade, foi elevada para todas as áreas avaliadas, contudo a quantidade de íons lixiviados está mais relacionada com a concentração destes íons na solução do solo.
5. O modelo SARRA-Br (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático-Brasil), foi um instrumento útil para estimar o fluxo vertical de água no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARON, C.; CLOPES, A. Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos (SARRAMET/SARRAZON) **Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento**. SARRA.CIRAD, França. 1996.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y.M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J.P.; HÉNAULT, C.; MARAUX, F.; SEGUIN, B.; SINOQUET, H. An overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v.18, p. 309-332, 2003.

BRUNET, D.; SILVA, F.A.M. Avaliação dos riscos agroclimáticos das pastagens sobre um latossolo no cerrado. **Anais**, XIII Congresso Brasileiro de Agroclimatologia. Santa Maria-RS, p.253-256, 2003.

BUYANOVSKY, G.A.; WAGNER, G.H. Annual cycles of carbon dioxide level in soil air. **Soil Science Society America Journal**. v. 47, p. 1139-1145, 1983.

CIRAD. **SARRA-Guide d'utilisation**. Montpellier. CIRAD-CA: Unité de Recherche "Gestion de l'eau". 1995. 68p.

DUWIG, C.; NORMAND, B.; VAUCLIN, M.; VACHAUD, G.; GREEN, S.R.; BECQUER, T. Evaluation of the WAVE model for predicting nitrate leaching for two contrasted soil and climate conditions. **Vadose Zone Journal**, v.2 p.76-89, 2003.

EDWARDS, D.M.; FISCHBACH, P.E.; YOUNG, L.L. Movement of nitrate under irrigated agriculture. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 73-75, 1972.

ESPINOZA, W.; REIS, A.E.G. dos. Lixiviação em latossolo vermelho-escuro de Cerrado II. Magnitude e variabilidade de fenômenos sob irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, n.1 p. 85-94, 1984.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FOREST, F.; CLOPES, A. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In: REYNIERS, F.N.; NETOYO, L. (Eds.). **Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale**: Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture Paris: J. Libbey, p.3-15, 1994.

FRANQUIM, P.; FOREST, F. Dès programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes de bilan hydrique. **Agronomie Tropical**, v. 32, n.1, p. 7-11, 1977.

JURY, W.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H. **Soil physics**. New York, 5.ed. John Wiley & Sons, 1991. 328p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Exatas, 2000. 509p.

MATZENAUER, R.; SUTILI, R. A água na cultura do milho. **IPAGRO Informa**, v. 26, p.17-32, 1983.

MORAES, J.F.V. Movimento de nutrientes em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n.1, 1991.

MUZILLI, O. A fertilidade do solo no contexto da agricultura sustentável. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 12., Águas de Lindóia (SP), 1996. **Anais...** Comissão de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas, 1996.

Penman, H. C. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. **Proceeding of the Royal Society of London**, v. A193, 120-145, 1948.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B.V.; GALLO, P.B.; MASCARENHAS, H.A.A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.28, n 3, 1993.

REUSS, J.O.; JOHNSON, D.W. Acid deposition and the acidification of soil and waters. *Ecological studies* n° 59, Springer-Verlag, New-York, 119 p. 1986.

ROTH, C.; VIEIRA, M.J. Infiltração de água no solo. **Plantio Direto**, Ponta Grossa, v.1, n.3, p.4, 1983.

SANS, L.M.; ASSAD, E.D.; GUIMARÃES, D.P.; AVELLAR, G. Zoneamento de riscos climáticos para o milho para a região centro-oeste do Brasil e para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria.v.9. Número especial, p. 527-535. 2001.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura do arroz irrigado.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.1, p.12-16, 2002.

SILVA, E.M.; AZEVEDO, J.A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1487-1494, 2002.

SILVA, F.A.M. Parametrização e modelagem de balanço hídrico em sistema de plantio direto no cerrado brasileiro. **Tese de Doutorado**, 218p. Campinas-SP, 2004.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A.; WONG, J. Liberação de cálcio e magnésio por cápsulas porosas de porcelana usadas na extração de solução do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.28, p.605-610, 2004.

SILVA, S.C.; ASSAD, E.D. Zoneamento de riscos climáticos para o arroz de sequeiro nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins e Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3, p.536-543, dez. 2001.

SOUSA, E. T. de; VASCONCELLOS, V. L. D.; ASSAD E. D. Simulação dos riscos climáticos no distrito federal para o plantio da soja de ciclo precoce e tardio. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Santa Maria – RS, p.759-760, 2003.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VANCLOOSTER, M.; VIAENE, P.; DIELS J., CHRISTIANENS K. WAVE: A mathematical model for simulating water and agro-chemicals in the soil and vadose environment. Release 2.0. References and user's manual. Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium. 1994.

WALTON, R.S.; VOLKER, R.E.; BRISTOW, K.L.; SMETTEM, K.R.J. Experimental examination of solute transport by surface runoff from low-angle slopes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.233, n.1-4, p.19-36, 2000.

ANEXOS

Anexo 1. Quantidades de calcário, nitrogênio, fósforo, potássio e gesso aplicados no experimento de rotação de culturas anuais-pastagem.

Ano-culturas	AM					AC					Gesso ² ..t/ha..
	Calcário ...t/ha...	N	P ₂ O ₅kg/ha.....	K ₂ O	Micros ¹	Calcário ..t/ha...	N	P ₂ O ₅kg/ha.....	K ₂ O	Micros ¹	
Culturas anuais											
1991-soja	3,4	0	53	30	11,7	5,8	0	98	98	63	2,8
1992-soja	0	0	50	30	10	0	0	100	100	0	0
1993-milho	0	35	50	30	1,0*	0	80	100	60	2*	0
1994-soja	0	0	50	30	10	0	0	100	100	0	0
1995-milho	0	40	50	50	11	0	80	100	100	22	0
1996-soja	0	0	50	30	10* ¹	0	0	90	90	0	0
1997-milho	0	40	49	29	0,8*	0	70	102	61	1,6*	0
1998-soja	0	0	42	42	0,6**	0	0	83	83	1,2**	0
1999-soja	1,0	0	50	50	0	1,7	0	100	100	0	0
2000-milho	0	5	50	45	0	0	5	50	45	0	0
2001-soja	0	0	50	50	0	0	0	100	100	0	0
2002-milho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003-soja	0	0	50	50	0	0	0	100	100	0	0
2004-soja	0	5	50	38	0	0	10	100	90	0	0
2005-sorgo	0	30	50	38	0	0	60	100	90	0	0
Culturas anuais após um ciclo com pastagens											
1995-milho	0	40	50	50	11	0	80	100	100	22	2,8
1996-soja	0	0	50	30	10	0	0	90	90	0	0
1997-milho	0	40	49	29	0,8*	0	70	102	61	1,6*	0
1998-soja	0	0	42	42	0,6**	0	0	83	83	1,2**	0
1999-soja	1	0	53	53	0	1,7	0	100	100	0	0
2000-milho	0	5	50	45	0	0	5	50	45	0	0
2001-soja	0	0	50	50	0	0	0	100	100	0	0
2002-milho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003-soja ⁵	0	0	50	50	0	0	0	100	100	0	0
2004-soja	0	5	50	38	0	0	10	100	90	0	0
2005-sorgo	0	30	50	38	0	0	60	100	90	0	0
Pastagens após um ciclo com culturas anuais											
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0
1999	1	0	16	16	0	1,7	0	16	16	0	0
2002	0	40	30	40	0	0	40	30	30	0	0
2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2004 - Marandu	0	5	50	38	0	0	10	100	90	0	0
2005 - Marandu	0	0	0	0	0	0	200	42	100	0	0
Pastagens contínuas											
1991	3,4	0	90	0	30	5,8	0	90	0	30	0
1994	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0
1997	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0
1999	1	0	44	44	0	1,0	40	44	44	0	0
2002	0	40	30	40	0	0	40	30	40	0	0
2002	0	0	30	60	0	0	0	30	60	0	0
2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	5	50	38	0	0	200	42	100	0	0

¹ Micronutrientes aplicados na forma de F.T.E. BR-12 (9% de Zn; 1,80% de B; 0,80% de Cu; 3,00% de Fe; 2,00% de Mn; e 0,10 % de Mo).

* Micronutrientes aplicados na forma de F.T.E. BR-10 (7% de Zn; 2,50% de B; 1,00% de Cu; 4,00% de Fe; 4,00% de Mn; 0,10 de Mo; e 0,10% de Co).

² Teor de água no gesso era de 22,6%.

** Zinco aplicado através da fórmula 05-25-15-0,4 (NPKZn) e ** através da fórmula 20-20-0,3 (PKZn)

⁵ Em 2003 e 2004 usou a fórmula 0-20-20+micro

]

Anexo 2. Caracterização química do solo na camada de 0-20 cm de profundidade.

Nº do Lab.	pH H ₂ O	Al	P	K	Ca	Mg	H+Al	T	V
		cmolc/dm ³	mg/l	mg/l	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³	%
L-SPD-AC	5.87	0	6.45	69	2.07	0.52	4.04	6.81	40.6%
L-SPC-AM	5.16	0.22	3.29	48	0.83	0.16	5.10	6.21	17.9%
L-SPC-AC	5.51	0.04	4.09	60	1.43	0.29	4.30	6.17	30.3%
L-SPD-AM	5.38	0.15	3.92	36	1.07	0.29	5.02	6.47	22.4%
P	5.96	0.04	2.32	44	1.59	0.47	4.18	6.35	34.2%
LP-ILP-AC	5.97	0	2.48	49	1.55	0.55	3.00	5.23	42.6%
PL-ILP-AC	5.8	0	2.48	26	1.84	0.42	4.32	6.65	35.0%

Anexo 3. Características físicas de amostras de solo, sendo (D_p) a densidade de partículas, (D_a) a densidade do solo, (θ_{cc}) a capacidade de campo e (θ_{pm}) o ponto de murcha permanente.

Tratamento	Prof. mm	Granulometria (%)			D_p Mg m ⁻³	D_a Mg m ⁻³	θ_{cc} m ³ m ⁻³	θ_{pm} m ³ m ⁻³
		Argila	Silte	Areia				
L-SPC-AC	100	69,0	5,0	22,28	2,8	1,1	0,4	0,2
L-SPC-AC	100	69,6	6,7	17,34	2,7	1,1	0,4	0,2
L-SPC-AC	200	72,1	4,9	15,99	2,7	1,1	0,4	0,3
L-SPC-AC	300	70,7	4,4	15,46	2,7	1,1	0,3	0,2
L-SPC-AC	700	68,1	4,4	21,46	2,9	1,0	0,3	0,2
L-SPC-AC	100	67,6	2,6	29,84	2,9	0,9	0,3	0,2
L-SPC-AM	100	60,5	11,5	25,95	2,7	1,1	0,4	0,3
L-SPC-AM	100	60,2	11,2	23,66	2,7	1,1	0,4	0,2
L-SPC-AM	200	62,7	9,2	22,97	2,8	1,1	0,4	0,2
L-SPC-AM	300	63,4	8,2	24,85	2,8	1,1	0,3	0,3
L-SPC-AM	700	67,5	3,4	27,48	2,8	1,0	0,3	0,2
L-SPC-AM	100	67,6	2,6	29,84	2,9	0,9	0,3	0,2
L-SPD-AC	100	69,0	5,0	28,03	2,8	1,1	0,4	0,2
L-SPD-AC	100	69,6	6,7	28,60	2,7	1,1	0,4	0,2
L-SPD-AC	200	72,1	4,9	28,13	2,7	1,1	0,4	0,3
L-SPD-AC	300	70,7	4,4	28,41	2,7	1,1	0,3	0,2
L-SPD-AC	700	68,1	4,4	29,13	2,9	1,0	0,3	0,2
L-SPD-AC	100	67,6	2,6	29,84	2,9	0,9	0,3	0,2
L-SPD-AM	100	60,5	11,5	25,95	2,7	1,1	0,4	0,3
L-SPD-AM	100	60,2	11,2	23,66	2,7	1,1	0,4	0,2
L-SPD-AM	200	62,7	9,2	22,97	2,8	1,1	0,4	0,2
L-SPD-AM	300	63,4	8,2	24,85	2,8	1,1	0,3	0,3
L-SPD-AM	700	67,5	3,4	27,48	2,8	1,0	0,3	0,2
L-SPD-AM	100	67,6	2,6	29,84	2,9	0,9	0,3	0,2
P	100	55,3	9,6	28,03	2,7	1,1	0,4	0,3
P	100	52,2	7,5	28,60	2,7	1,1	0,4	0,3
P	200	50,6	6,7	28,13	2,8	1,1	0,4	0,3
P	300	47,8	7,0	28,41	2,8	1,1	0,3	0,2
P	700	63,9	4,1	29,13	2,9	1,0	0,3	0,2
P	100	67,6	2,6	29,84	2,9	0,9	0,3	0,2
LP-ILP-AC	100	57,0	3,9	35,09	2,7	1,2	0,4	0,2
LP-ILP-AC	100	56,8	6,3	40,31	2,8	1,0	0,4	0,2
LP-ILP-AC	200	57,9	6,0	42,70	2,8	1,0	0,4	0,2
LP-ILP-AC	300	56,3	7,0	45,25	2,8	1,2	0,3	0,2
LP-ILP-AC	700	58,0	4,2	32,01	2,9	1,0	0,3	0,2
LP-ILP-AC	100	67,6	2,6	29,84	2,9	0,9	0,3	0,2
PL-ILP-AC	100	64,9	12,8	39,04	2,6	1,0	0,4	0,3
PL-ILP-AC	100	70,2	12,4	36,94	2,8	1,0	0,4	0,3
PL-ILP-AC	200	72,3	11,7	36,09	2,8	1,0	0,4	0,3
PL-ILP-AC	300	75,2	9,4	36,66	2,8	1,1	0,4	0,3
PL-ILP-AC	700	73,0	5,5	37,72	2,8	1,0	0,4	0,2
PL-ILP-AC	100	67,6	2,6	29,84	2,9	0,9	0,3	0,2
100 mm = 5 (0-10 cm)				700 mm = 75 (70-140 cm)				
100 mm = 5 (10-20 cm)				100 mm = 145 (140-150 m)				
200 mm = 25 (20-40 cm)								
300 mm = 45 (40-70 cm)								